

Міністерство освіти і науки
Український державний університет науки і технологій
Дніпровський державний технічний університет
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
Криворізький національний університет
Харківський національний університет радіоелектроніки
Херсонський національний технічний університет
Чорноморський державний університет імені П. Могили
Aalto University (Університет Аалто, Фінляндія)
American University of Central Asia (Бішкек, Киргизстан)
Tallinna Tehnikaülikool (Таллінн, Естонія)
AGH University of Science and Technology (Краків, Польща)
Politechnika Rzeszowska (Жешув, Польща)
Ariel University (Аріель, Ізраїль)
Michigan State University (Іст-Лансінг, США)
Leibniz Universitat Hannover, Institute of Photogrammetry and Geoinformation
(Ганновер, Німеччина)



МАТЕРІАЛИ
Міжнародної науково-технічної конференції
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ в
МЕТАЛУРГІЇ та МАШИНОБУДУВАННІ

MATERIALS
of Scientific and Technical International Conference
INFORMATION TECHNOLOGY IN
METALLURGY AND MACHINE BUILDING

22 квітня 2026 року

м. Дніпро

Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ITMM'2026: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 21 – 23 квітня 2026 р.) / Міністерство освіти і науки України, Український державний університет науки і технологій, Дніпропетровський національний університет імені О. Гончара, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» та ін. – Дніпро: УДУНТ, 2026. – 568 с.

Збірник друкується за рішенням Вченої Ради

Українського державного університету науки і технологій від 28.01.2026 р., № 6

Голова: Величко О.Г. член-кореспондент НАНУ, д.т.н., професор, директор ННІ «Дніпровський металургійний інститут» Українського державного університету науки і технологій (УДУНТ)

Заступник голови: Гнатушенко Вік.В. д.т.н., професор, професор кафедри інформаційних технологій і систем УДУНТ

Члени оргкомітету:

Радкевич А.В. д.т.н., професор, перший проректор УДУНТ

Камкіна Л.В. д.т.н., професор, декан факультету металургійних процесів та хімічних технологій УДУНТ

Програмний комітет:

Алпатов А.П. – д.т.н., професор (Дніпро, Україна)

Аушева Н.М. – д.т.н., професор (Київ, Україна)

Бахрушин В.Є. – д.ф.-м.н., професор (Запоріжжя, Україна)

Бодянський Є.В. – д.т.н., професор (Харків, Україна)

Бородянський К. – Ph.D. (Ariel University, Israel)

Гасик М.М. – д.т.н., професор (Aalto University, Espoo, Finland)

Гуда А.І. – д.т.н., професор (Дніпро, Україна)

Гнатушенко В.В. – д.т.н., професор (Дніпро, Україна)

Гожий О.П. – д.т.н., професор (Миколаїв, Україна)

Зеленцов Д.Г. – д.т.н., професор (Дніпро, Україна)

Зубов Д.А. – Ph.D. (American University of Central Asia, Kyrgyzstan)

Корсун В.І. – д.т.н., професор (Дніпро, Україна)

Heipke Christian – Prof. Dr.-Ing. Habil. (Leibniz Universitat Hannover, Institute of Photogrammetry and Geoinformation Ганновер, Німеччина)

Кліменко С.В. – к.т.н., доцент (Дніпро, Україна)

Купін А.І. – д.т.н., професор (Кривий Ріг, Україна)

Островська К.Ю. – к.т.н., доцент (Дніпро, Україна)

Петленков Э. – Ph.D. (Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, Estonia)

Редчиць Д.О. – д.ф.-м.н., с.н.с. (Дніпро, Україна)

Рудакова Г.В. – д.т.н., професор (Херсон, Україна)

Светличний Д.С. – д.т.н., професор (AGH University of Science and Technology, Krakow MP, Poland)

Селівьорстов В.Ю. – д.т.н., професор (Дніпро, Україна)

Селівьорстова Т.В. – к.т.н., доцент (Дніпро, Україна)

Светлак Г. – д.т.н., професор (Politechnika Rzeszowska, Rzeszow, Poland)

Сладковський О.В. – д.т.н., професор (Silesian University of Technology, Gliwice, Poland)

Тарабара В.В. – Professor, Dr.-Ing. (Michigan State University, USA)

Тогобицька Д.М. – д.т.н., професор (Дніпро, Україна)

Шинкаренко В.І. – д.т.н., професор (Дніпро, Україна)

Технічний секретар конференції: Бімалов Д.В.

У збірник включені тези доповідей, які були представлені на Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні – ITMM'2026».

Режим доступу: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/itmm>

СЕКЦІЯ 1

**СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І СИНТЕЗ ПРОЦЕСІВ У МЕТАЛУРГІЇ
ТА МАШИНОБУДУВАННІ**

SECTION 1

**SYSTEM ANALYSIS AND SYNTHESIS OF PROCESSES IN METALLURGY
AND MECHANICAL ENGINEERING**

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2026.01.001

ВПЛИВ НОМІНАЛЬНОЇ ТОВЩИНИ ШАРУ ЗА БЛИЗЬКИХ ЗНАЧЕНЬ VED НА ПОРИСТИСТЬ СПЛАВУ INCONEL 718, ВИГОТОВЛЕНОГО МЕТОДОМ LPBF

Аджамський С.В.¹, Кононенко Г.А.² [ORCID],

Подольський Р.В.³ [ORCID], Подольська О.А.⁴

¹ТОВ «АЛТ України», ІТСТ НАН України, докт. філ., Україна

²ТОВ «АЛТ України», ІЧМ НАН України, НТУ «Дніпровська Політехніка», докт. техн. наук., ст. досл., Україна

³ТОВ «АЛТ України», ІЧМ НАН України, ІПСУ НАН України, докт. філ., Україна

⁴ІЧМ НАН України, науковий співробітник, Україна

Анотація. У роботі досліджено вплив номінальної товщини шару на формування пористості сплаву Inconel 718, виготовленого методом лазерного плавлення в порошковому шарі (LPBF), за умови забезпечення близьких значень питомої об'ємної щільності енергії (VED). Виготовлено два дослідних зразки розміром 10×10×10 мм із близькими значеннями VED (40,2 та 39,9 Дж/мм³), але різною номінальною товщиною шару (40 та 60 мкм). Металографічний аналіз виконано на оптичному мікроскопі з подальшою кількісною оцінкою пористості методом аналізу зображень (ImageJ). Встановлено, що за близьких значень VED рівень пористості зразків є співставним, однак спостерігаються відмінності в розподілі розмірів пор. Для зразка з більшою товщиною шару зафіксовано наявність поодиноких пор більшого розміру (до 15...16 мкм), що може свідчити про підвищену схильність до формування дефектів типу Lack of Fusion. Отримані результати підтверджують, що використання показника VED як єдиного критерію оптимізації процесу є недостатнім, оскільки різні комбінації параметрів за близьких значень VED можуть призводити до відмінностей у морфології дефектів.

Ключові слова: LPBF; Inconel 718; об'ємна щільність енергії (VED); товщина шару; пористість; продуктивність процесу.

Лазерне плавлення в порошковому шарі (LPBF) добре зарекомендувало себе, як технологія для швидкого прототипування, реінжинірінгу, топологічної оптимізації та ін. Наразі всі ці операції необхідні для створення деталей складної форми, що містять інтегровані функціональні елементи, зокрема внутрішні канали охолодження, порожнини змінного перерізу, ґратчасті структури, енергопоглинаючі осередки та інші конструктивні рішення,

реалізація яких традиційними методами є технологічно складною або економічно недоцільною. Завдяки можливості пошарового формування матеріалу LPBF забезпечує високу ступінь свободи проектування, що дозволяє поєднувати геометричну складність із функціональною та зменшенням маси конструкції. Це особливо актуально для авіаційної, енергетичної та медичної галузей, де поєднання високих механічних властивостей, оптимізованої маси та ефективного тепловідведення визначає експлуатаційну надійність виробів.

Але слід врахувати, що досягнення необхідних механічних та експлуатаційних властивостей, конструкційної міцності необхідне формування високої відносної щільності деталі. Як відомо з ряду робіт [1-2], пора може слугувати концентратором, що сприяє первинному руйнуванню або є розвитком вже наявних магістральних тріщин. Таким чином, за наявності високої пористості, топологічна оптимізація буде ірраціональною, оскільки відносна щільність буде відігравати важливу роль в забезпеченні конструкційної міцності деталі.

Наразі перед дослідниками в області матеріалознавства постає ряд завдань в області дослідження LPBF- технології, серед яких є продуктивність процесу і взаємозв'язок «час-щільність» [3]. Для цього дослідники застосовують різні підходи до виготовлення деталей: застосування адаптивної фокусної плями для збільшення ширини пробігу лазера; підвищення швидкості нанесення порошку; збільшення номінальної товщини шару плавлення та інші різноманітні підходи. В більшості випадків це є дієвим, але це потребує додаткової підготовки обладнання до виготовлення деталей, раціоналізації параметрів, виконання додаткових операцій калібрування скануючих систем і навіть встановлення додаткових модулів обладнання, що значно збільшує загальний час процесу швидкого прототипування чи реінжинірингу [4]. Більше того, аналіз та співставлення результатів, отриманих після даних експериментів з раціональними параметрами, стає складнішим або неможливим. Часто автори приходять до доволі відомого показника об'ємної щільності енергії (VED), що дозволяє узагальнити багатопараметричний процес, який включає потужність, швидкість сканування, відстань між треками

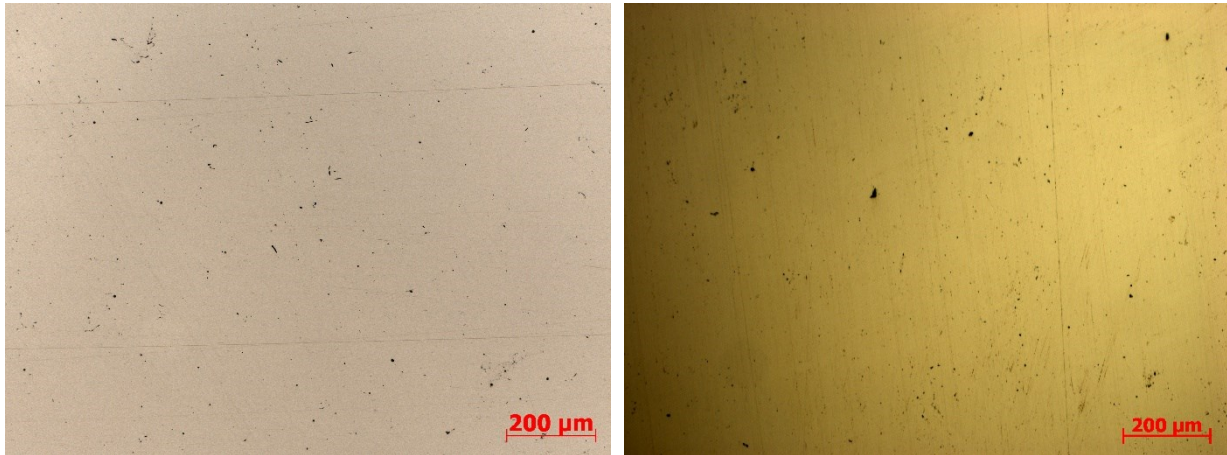
та номінальну товщину шару, для зручності надання рекомендацій. Але в більшості випадків ці рекомендації можуть включати взаємозалежні комбінації параметрів, які приводять до близьких (подібних) значень VED.

В даній роботі буде зроблено спробу проаналізувати металографічним способом вплив VED, яка забезпечується застосуванням різних технологічних параметрів, в тому числі з підвищеною продуктивністю за рахунок збільшення номінальної товщини шару, на відносну щільність зразків жароміцного сплаву Inconel 718.

В рамках роботи було виготовлено два дослідних зразка розмірами 10x10 x10 мм з близькими значеннями VED, а саме дослідний зразок №1: VED 40,2 Дж/мм³, потужність 195 Вт, швидкість сканування 1100 мм/с, відстань між треками 0,11 мм, номінальна товщина шару 40 мкм; дослідний зразок №2: VED 39,9 Дж/мм³, потужність 290 Вт, швидкість сканування 1100 мм/с, відстань між треками 0,11 мм, номінальна товщина шару 60 мкм. Дослідні зразки виготовлялись із жароміцного сплаву Inconel 718 з діапазоном розмірів частинок 25±15 мкм. Металографічні дослідження були виконанні на попередньо механічно підготовлених зразках. Дослідження виконувалось на оптичному світловому мікроскопі Axiovert 200 M MAT в світлопольному режимі освітлення. Пористість в зразках вимірювались з застосуванням програмного забезпечення ImageJ з використанням вбудованої функції «Аналіз частинок». Під час досліджень елементи розміром менше 2 мкм відфільтровувались для запобігання впливу потенційних дефектів, що сформувались в процесі підготовки зразків, на результат оцінки пористості.

Металографічний аналіз показав, що в дослідних зразках №1 та №2 присутні пори різного розміру, переважно пори мають сферичну форму, результати представлені на рис. 1. В результаті оцінки пористості встановлено, що розмір пор дослідного зразка 1 відповідає значенням 2...10 мкм, а для дослідного зразка №2 - 2...16 мкм. Слід зазначити, що в дослідному зразку №1 кількість пор в діапазоні 2...4 мкм більша порівняно з дослідним зразком №2. Але в дослідному зразку №2 було виявлено поодинокі пори розміром 10 мкм та більше. Виявлена пора розміром 15,5 мкм в дослідному зразку

№2 ймовірно є дефектом Lack of Fusion. Відповідно до побудованого графіку розподілу пор за розмірами можна зробити висновок, що переважно розмір пор для обох зразків відповідає значенням в діапазоні 3...4 мкм.



Дослідний зразок №1

Дослідний зразок №2

Рисунок 1 – Металографічний аналіз дослідних зразків

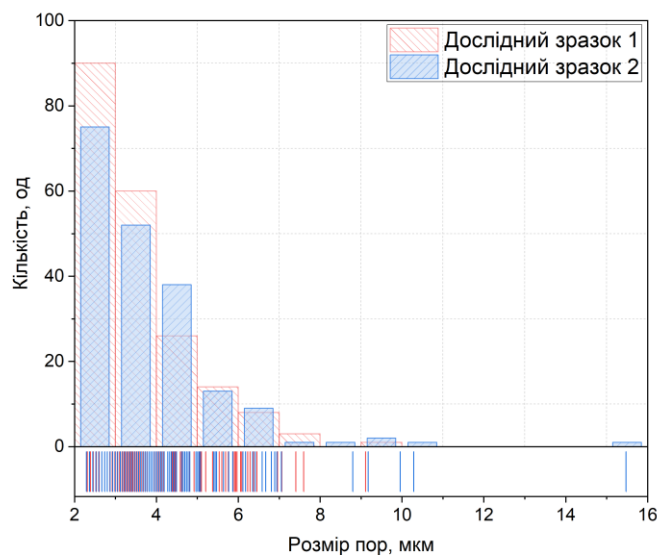


Рисунок 2 – Кількісна оцінка пористості дослідних зразків

Таким чином можна зробити попередній висновок, що за використання близьких VED та застосування різних технологічних параметрів, включно зі збільшенням номінальної товщини шару для підвищення продуктивності процесу, пористість має близький співставний рівень. Але слід зазначити, що за збільшення номінальної товщини шару порошку та застосування близьких значень VED розмір сформованих пор більший, що може вказувати на схильність до формування ймовірного дефекту Lack of Fusion. Враховуючи

вище зазначене, в подальшому є необхідність проведення більш детального аналізу даного ефекту на серії дослідних зразків для підтвердження даної залежності.

Висновки

1. Встановлено, що за близьких значень об'ємної щільності енергії ($VED \approx 40 \text{ Дж/мм}^3$) рівень пористості сплаву Inconel 718 є співставним незалежно від номінальної товщини шару під час реалізації LPBF-технології.

2. Збільшення товщини шару з 40 до 60 мкм призводить до формування поодиноких пор більшого розміру (до 15–16 мкм), що може свідчити про зміну механізму формування ванни розплаву та підвищену ймовірність формування дефектів типу Lack of Fusion.

3. Показано, що близькі значення VED не гарантують ідентичної морфології пор, оскільки різні комбінації технологічних параметрів можуть формувати відмінні умови кристалізації.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Shi X., Wang H., Feng W., Zhang Y., Ma S., Wei J., The crack and pore formation mechanism of Ti-47Al-2Cr-2Nb alloy fabricated by selective laser melting. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2020, 91. Id. 105247. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105247>.
2. Meng G., Zhang J., Li J., Jiang Z., Gong Y., Zhao J. Impact of pore defects on laser additive manufacturing of Inconel 718 alloy based on a novel finite element model: Thermal and stress evaluation, Optics & Laser Technology, 167, 2023, 109782, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109782>.
3. Antikainen A., Reijonen J., Lagerbom J., Lindroos M., Pinomaa T., Lindroos T. Single-Track Laser Scanning as a Method for Evaluating Printability: The Effect of Substrate Heat Treatment on Melt Pool Geometry and Cracking in Medium Carbon Tool Steel. JMEPEG - 2022. 31. 8418–8432. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06826-0>
4. Ackermann L., Roeder C., Gehring M., Cvecek K., Schmidt M. High-speed speckle averaging for phase-only beam shaping in laser materials processing. Optics and Lasers in Engineering – 2023. 165. id. 107537. <https://doi.org/10.1007/10.1016/j.optlaseng.2023.107537>

INFLUENCE OF NOMINAL LAYER THICKNESS AT CLOSE VED VALUES ON THE POROSITY OF INCONEL 718 ALLOY MANUFACTURED BY LPBF METHOD

S.V. Adjamsky, G.A. Kononenko, R.V. Podolskyi, O.A. Podolska

Abstract. *The work investigated the effect of the nominal layer thickness on the formation of porosity in the Inconel 718 alloy manufactured by the laser powder bed melting (LPBF) method, provided that similar values of the specific volumetric energy density (VED) were provided. Two test specimens measuring 10×10×10 mm were manufactured with similar VED values (40.2 and 39.9 J/mm³), but different nominal layer thicknesses (40 and 60 μm). Metallographic analysis was performed on an optical microscope with subsequent quantitative assessment of porosity using the image analysis method (ImageJ). It was found that at similar VED values, the porosity level of the samples is comparable, however, differences in the pore size distribution are observed. For the sample with a larger layer thickness, the presence of single pores of larger size (up to 15-16 μm) was recorded, which may indicate an increased tendency to the formation of defects of the Lack of Fusion type. The obtained results confirm that the use of the VED indicator as the only criterion for process optimization is insufficient, since different combinations of parameters at close VED values can lead to differences in defect morphology.*

Keywords: LPBF; Inconel 718; volumetric energy density (VED); layer thickness; porosity; process performance.

**ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ ДЕЗІНТЕГРАЦІЇ
ЗАГОТОВОК ІНТЕРМЕТАЛІДНИХ СПОЛУК ОТРИМАНИХ
ТЕРМОХІМІЧНИМ ПРЕСУВАННЯМ**

Белоконь Ю.О.¹ [ORCID], Гречаний О.М.² [ORCID],
Васильченко Т.О.³ [ORCID], Сагулякін О.Є.⁴ [ORCID]

¹ Запорізький національний університет, д-р техн. наук, професор, Україна

² Запорізький національний університет, Ph.D., доцент, Україна

³ Запорізький національний університет, канд. техн. наук, доцент, Україна

⁴ Запорізький національний університет, аспірант, Україна

Анотація. У роботі розглянуто проблему підвищення ефективності отримання інтерметалідних сполук як перспективних матеріалів машинобудування. Проаналізовано особливості застосування, а також недоліки традиційних методів виготовлення. Запропоновано використання термохімічного пресування як енергоефективного способу отримання заготовок інтерметалідних сполук із прогнозованими геометричними параметрами. Обґрунтовано доцільність визначення енергії дезінтеграції методом падаючого вантажу з використанням маятникового копра. Отримані результати дозволяють моделювати процеси подрібнення та обґрунтовано обирати промислове обладнання для досягнення заданої фракції матеріалу.

Ключові слова: інтерметалідні сполуки, енергоефективні технології, крихкі матеріали, метод падаючого вантажу, подрібнення матеріалів

Вступ. Сучасним викликом для машинобудівної галузі промисловості є отримання нових практичних матеріалів, що викликане обмеженістю характеристик класичних матеріалів в умовах постійного конструктивного удосконалення вузлів та деталей виробничих агрегатів. В даному контексті особливий інтерес представляють собою інтерметалідні сполуки, які часто використовують як зміцнюючі фази всередині звичайних сплавів [1]. Інтерметалідні сполуки відносяться до особливого типу матеріалів, які утворюються, коли декілька металів (в більшості випадків два, але інколи і більше) з'єднуються в строго визначеному стехіометричному співвідношенні і створюють нову кристалічну структуру, відмінну від структури вихідних

чистих металів. Завдяки такій властивості можливе отримання сплавів з унікальними властивостями. Наприклад завдяки високій твердості і жароміцності можливе використання титан-алюмінідів (TiAl) або нікель-алюмінідів (NiAl) при виготовленні високотемпературних деталей газових турбін та авіаційних двигунів [2]. Широко застосовуваний в медичному стентуванні сплав з пам'яттю форми – нітинол (NiTi), також відноситься до класу інтерметалідних сполук [3].

Сучасні методи, на кшталт плавлення, порошкова металургія, твердофазна дифузія тощо, передбачають отримання різних за своїми габаритними характеристиками форм заготовок інтерметалідних сполук – від великошматкової до порошкоподібної [4,5]. Таке різноманіття форми виготовлення інтерметалідних сполук дещо загальмовує подальше їхнє впровадження, адже в більшості випадків вони використовуються або як легуючі добавки або як функціональне поверхнєве напилення. При цьому технологічний процес введення інтерметалідних сполук передбачає їхнє використання у форматі дроту, порошку або, у випадку використання як лігатури – шматків певної фракції. Також до недоліків «традиційних» способів отримання інтерметалідних сполук можна віднести їхню досить низьку енергоефективність.

Таким чином питання визначення оптимального енергоефективного способу отримання заготовок інтерметалідних сполук з можливістю завчасного прогнозування їхніх геометричних характеристик є актуальним. За умови його вирішення виникає можливість визначення типу механічного обладнання для подрібнення заготовок з чіткою класифікацією вихідного продукту за розміром часточок. При цьому основним технологічним параметром для визначення класу промислового подрібнюючого обладнання буде виступати енергія дезінтеграції отриманих заготовок встановлена шляхом експериментальних досліджень.

Основний матеріал. Термохімічне пресування це відносно новий альтернативний енергоефективний метод отримання заготовок різних інтерметалідних сполук [6-8]. В залежності від обраного типу формуючого

устаткування термохімічне пресування дозволяє отримувати заготовки як круглого так і прямокутного поперечного перерізу. За умови використання одного типорозміру пресформи вагове відхилення отриманих заготовок інтерметалідних сполук при цьому складає не більше 5 %.

Подальше використання отриманих заготовок передбачає їхнє подрібнення до певної фракції. При цьому варто враховувати, що в більшості випадків інтерметалідні сполуки по своїй природі дуже крихкі і пластично не деформуються [9, 10].

Аналіз відкритих джерел [11, 12] з виявлення перспективного методу оцінки енергії дезінтеграції заготовок отриманих методом термохімічного пресування вказує на те, що найбільш перспективним є метод падаючого вантажу, а саме визначення енергії руйнування з використанням маятникового копра. Перевагою використання дослідницької схеми з маятниковим копром є простота організації експериментальної частини з визначення енергії руйнування дослідного зразка, а також можливість моделювання процесу подрібнення матеріалів в молоткових дробарках.

Висновки. Найбільш перспективним методом визначення енергії дезінтеграції заготовок, отриманих термохімічним пресуванням, є метод падаючого вантажу з використанням маятникового копра. Такий підхід дозволить виконати моделювання процесу руйнування в молоткових дробарках та в подальшому обґрунтовано обрати промислове обладнання для отримання необхідної фракції матеріалу.

Подяки

Дослідження проведено в межах конкурсу проведеного Національним фондом досліджень України на одержання грантів Президента України для підтримки наукових досліджень і розробок молодих вчених-докторів наук (до 40 років включно) за договором № 2025.03/0004.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Schneider A., Sauthoff G. Iron Aluminium Alloys with Strengthening Carbides and Intermetallic Phases for High-Temperature Applications. *steel research international*. 2004. Vol. 75, no. 1. P. 55–61. URL: <https://doi.org/10.1002/srin.200405927>

2. Pavlenko D. V., Belokon' Y. O., Tkach D. V. Resource-Saving Technology of Manufacturing of Semifinished Products from Intermetallic γ -TiAl Alloys Intended for Aviation Engineering. *Materials Science*. 2020. T. 55, № 6. C. 908–914. URL: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00386-1>
3. Kauffman G. B., Mayo I. The Story of Nitinol. *The Chemical Educator*. 1997. Vol. 2, no. 2. P. 1–21. URL: <https://doi.org/10.1333/s00897970111a>
4. Preparation of Highly Pure MnBi Intermetallic Compounds by Arc-Melting / H. Yoshida et al. *Materials Transactions, JIM*. 1999. Vol. 40, no. 5. P. 455–458. URL: <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.40.455>
5. Obtaining NiAl intermetallic compound using different milling devices / E. T. Kubaski et al. *Advanced Powder Technology*. 2012. Vol. 23, no. 5. P. 667–672. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2011.08.005>
6. Development of new composite materials based on TiN–Ni cermets during thermochemical pressing / Y. Belokon et al. *Results in Engineering*. 2022. P. 100724. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100724>
7. Development of composite materials based on TiN - Mo cermets during thermochemical pressing / Y. Belokon et al. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2023.05.006>
8. Exploring thermochemical pressing in the manufacture of TiN - W cermet-based composite materials / Y. Belokon et al. *International Journal of Thermofluids*. 2025. Vol. 25. P. 101020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.101020>
9. Cahn R. W. Intermetallics: New physics. *Contemporary Physics*. 2001. Vol. 42, no. 6. P. 365–375. URL: <https://doi.org/10.1080/00107510110084084>
10. Mechanical properties of porous Fe–Al intermetallics / H. Y. Gao et al. *Powder Metallurgy*. 2014. Vol. 58, no. 3. P. 197–201. URL: <https://doi.org/10.1179/1743290114y.0000000107>
11. Quality assurance of absorbed energy in Charpy impact test / C. L. F. Rocha et al. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 733. P. 012009. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/733/1/012009>
12. An Improved Indentation Method for Estimating Limits of Fracture Toughness in Brittle Films / K. K. Fu et al. *Advanced Materials Research*. 2015. Vol. 1095. P. 598–602. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1095.598>

**SUBSTANTIATION OF THE METHODOLOGY FOR RESEARCHING THE
DISINTEGRATION ENERGY OF INTERMETALLIC COMPOUNDS
PREPARATIONS OBTAINED BY THERMOCHEMICAL PRESSING**

Yuriy Belokon, Oleksii Hrechanyi, Tetiana Vasilchenko, Oleksandr Sahuliakin

Abstract. *The paper considers the problem of increasing the efficiency of obtaining intermetallic compounds as promising materials for mechanical engineering. The features of their application, as well as the shortcomings of traditional manufacturing methods, are analyzed. The use of thermochemical pressing is proposed as an energy-*

efficient method of obtaining blanks of intermetallic compounds with predicted geometric parameters. The feasibility of determining the disintegration energy by the falling load method using a pendulum impact hammer is substantiated. The results obtained allow modeling grinding processes and reasonably selecting industrial equipment to achieve a given fraction of material.

Keywords: *intermetallic compounds, energy-efficient technologies, brittle materials, falling weight method, material grinding*

Acknowledgments

The research was conducted within the framework of the competition held by the National Research Foundation of Ukraine for grants from the President of Ukraine to Support Research and Developments of Early Career Researchers – Doctors of Science (up to 40 years old inclusive) under contract No. 2025.03/0004.

**ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛІ
МІКРОМЕХАНІЧНОГО ЗМІЦНЕННЯ СПЛАВУ ALSI10MG В УМОВАХ
АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА**

Буштрук С.І.¹ [ORCID], Миронова Т.М.² [ORCID]

¹ Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

² Український державний університет науки і технологій, д.т.н., проф, Україна

Анотація. Для конструкційних алюмінієвих сплавів, таких як силумін, обов'язковим контролем якості є механічні випробування на розтяг із визначенням параметрів міцності та пластичності. Обов'язковість технологічного контролю для кожної партії може бути усунена за умови отримання стабільних повторюваних результатів, що можна досягти, зокрема, при застосуванні програмованих режимів виготовлення за адитивною технологією PBF-LB/M. Заміною експериментального визначення механічних властивостей може стати їх моделювання через параметри структури. У роботі виконується дослідження існуючої моделі мікроехемічного зміцнення сплаву за правилом сумішей, що розраховується на основі параметрів структури сплаву, визначених на зразках, що були виготовлені в різних умовах та за різних технологічних параметрів процесу. Розраховані показники межі плинності порівнюються з результатами виконаних випробувань на розтяг. Було визначено, що модель має бути доопрацьована через суттєву похибку, а способи визначення структурних параметрів матеріалу мають бути максимально спрощеними для можливості ширшого впровадження.

Ключові слова: лазерне плавлення металевого порошкового шару, силумін, мікроструктура, міцність, моделювання властивостей.

У практиці прийнятно-здавальних випробувань партій металопродукції з алюмінієвих сплавів обов'язковими є механічні випробування на розтяг з визначенням параметрів міцності та пластичності у випадках, коли передбачається використання для виробів, що мають забезпечувати заданий рівень конструктивної міцності. У разі застосування технології PBF-LB/M розміри партій для виготовлення заготовок чи деталей обмежуються розмірами робочої камери установки, що визначає кількість виробів, які можуть бути виготовлені за один виробничий цикл. Відповідно до усталених положень різних нормативних документів у сфері металургії і

машинобудування, партією вважають вироби, виготовлені з однієї сировини за однакових умов і одночасно. Водночас остання умова може бути переглянута для програмованих режимів виготовлення за адитивною технологією PBF-LB/M, що забезпечує високу повторювальність результатів, за умови сталих параметрів процесу. Таким чином, обов'язкові механічні випробування кожної окремої партії можуть бути замінені періодичними випробуваннями. У перспективі можливий перехід до контролю лише структурних параметрів, тоді як для визначення механічних властивостей доцільно буде використовувати розрахункові моделі, засновані на цих структурних параметрах.

Розрахункове визначення міцності сплаву можливе із застосуванням спрощених аналітичних моделей, що базуються на правилі сумішей. Для оцінювання межі плинності матеріалу узагальнюються внески різних механізмів мікромеханічного зміцнення, характерних для сплавів із певним структурним станом. Зазначені механізми детально описані в оглядовій роботі [1], а у роботі [2] було реалізовано моделювання за цим підходом.

Спираючись на результати вищезазначених робіт, виконано моделювання для визначення межі міцності за структурними параметрами, а також проведено експериментальну перевірку отриманих значень.

Горизонтальні зразки сплаву AlSi10Mg були виготовлені на двох машинах PBF-LB/M із різними технічними параметрами: з фокусним діаметром лазера ~0,05 мм (№1) і ~0,1 мм (№2), що впливало на вибір енергетичних параметрів процесу та температурні градієнти під час плавлення і кристалізації.

Визначення структурних параметрів, необхідних для виконання розрахунків, здійснювали із застосуванням растрової електронної мікроскопії (РЕМ-106И, детектор вторинних електронів) та рентгеноструктурного аналізу (ДРОН-3, випромінювання $K\alpha$ -Co). Зазначимо, що визначення розмірів наночасток кремнію та їх об'ємної частки в комірках α -Al не проводили через обмеження роздільної здатності мікроскопа. Дані щодо внеску механізму зміцнення дисперсними частками були запозичені з роботи [2].

Застосована аналітична модель мікромеханічного зміцнення сплаву AlSi10Mg, виготовленого за технологією PBF-LB/M, має вигляд [2]:

$$\sigma_y = f_{cell} \cdot (\sigma_0 + \Delta\sigma_{preci} + \Delta\sigma_{bound} + \Delta\sigma_{ss} + \Delta\sigma_{disloc}) + f_{net} \cdot \sigma_{load}, \quad (1)$$

σ_y – межа плинності алюмінієвого сплаву, що визначається;

σ_0 – межа плинності чистого алюмінію;

$\Delta\sigma_{preci}$ – зміцнення дисперсними частинками за механізмом Орована;

$\Delta\sigma_{bound}$ – зміцнення за рахунок подрібнення структури за ефектом Холла-Петча;

$\Delta\sigma_{ss}$ – зміцнення за рахунок переходу кремнію в твердий розчин;

$\Delta\sigma_{disloc}$ – зміцнення за рахунок накопичення дислокацій;

σ_{load} – вклад каркасу кремнію, що прийнято для умов рівномірного навантаження одночасно з α -Al;

f_{net} і f_{cell} – об'ємна частка каркасу кремнію та комірок α -Al відповідно.

Алгоритми розрахунку за окремими механізмами зміцнення, а також інформація щодо застосованих констант детально наведено в роботах [1-3].

За результатами виконаного моделювання (див. табл. 1) для зразків №1 і №2 отримані значення межі плинності ($\sigma_y^{розрах}$) суттєво відрізняються від експериментальних ($\sigma_y^{експ}$), визначених у ході контрольних випробувань: розбіжність сягає 64–68% порівняно з 21%, отриманими при моделюванні авторами роботи [2].

Таблиця 1
Результати моделювання межі плинності та фактичні результати випробування у порівнянні з попереднім дослідженням.

Зразок	σ_0 , МПа	$\Delta\sigma_{preci}$, МПа	$\Delta\sigma_{bound}$, МПа	$\Delta\sigma_{ss}$, МПа	$\Delta\sigma_{disloc}$, МПа	σ_{load} , МПа	f_{net} , %	$\sigma_y^{розрах}$, МПа	$\sigma_y^{експ}$, МПа
№1	10	158	72	159	178	380	22,5	525	320
№2			70	105	187		22,8	489	291
Дослід. [2]			66	71	37		12,0	346	286

Значні розбіжності пов'язані зі стрімким зростанням впливу окремих механізмів зміцнення, а насамперед твердорозчинного ($\Delta\sigma_{ss}$) та дислокаційного ($\Delta\sigma_{disloc}$). Обидві зазначені складові визначено із застосуванням параметрів структури, отриманих за результатами рентгеноструктурного аналізу, що зумовлює необхідність їх детальнішого порівняння з відповідними параметрами, наведеними в роботі [2].

Розрахунок зміцнення за рахунок твердого розчину виконували на основі даних щодо концентрації кремнію в кристалічній ґратці α -Al, що визначали по зміні параметра кристалічної ґратки відносно чистого алюмінію, яка має лінійну залежність аж до концентрації в твердому розчині на рівні 11%, на основі даних з монографії [4]. Параметр кристалічної ґратки у свою чергу визначався на основі усереднених даних шести характерних піків на рентгенограмі, що забезпечувало доволі високу точність. В роботі [2] визначення концентрації кремнію в α -Al виконувалось методом енергодисперсійної спектроскопії в просвічувальному електронному мікроскопі. В обох випадках отримані значення концентрації кремнію перебувають у діапазонах, характерних для технології PBF-LB/M, і не викликають сумнівів.

Розрахунок зміцнення за рахунок накопичення дислокацій виконували на основі даних щодо їх щільності, яку визначали через мікродеформацію, розраховану за методом Уільямсона-Холла. У роботі [2] ці дані щодо щільності дислокацій були запозичені з іншого дослідження, що виконувалось на зразках надрукованих в зовсім інших умовах. Оскільки саме параметр вмісту дислокацій впливає на найбільш вагомий, згідно табл. 1, механізм структурного зміцнення ($\Delta\sigma_{\text{disloc}}$), то його визначення на однакових зразках має критичне значення.

Попри значну похибку у визначенні межі плинності на зразках №1 і №2 спостерігається зв'язок у співмірному зростанні з фактичними експериментальними даними — в 1,07 та 1,1 раз відповідно.

Отримані фактичні експериментальні показники межі плинності на зразках №1 і №2 знаходяться на гранично високому рівні та навіть перевищують діапазон вказаний в стандарті VDI 3405 Blatt 2.1 [5], що визначений для зразків надрукованих в горизонтальному положенні (239–292 МПа).

Висновки

1. Застосовано аналітичну модель для визначення межі плинності сплаву AlSi10Mg, що підтвердило коректність тенденції взаємозв'язку механізмів

структурного мікромеханічного зміцнення з експериментально визначеною характеристикою. Водночас розраховані значення межі плинності характеризуються доволі високою похибкою порівняно з даними експерименту, яка в умовах даного дослідження зросла до 64–68% порівняно з результатами попередніх досліджень інших авторів (21%). Це зумовлено отриманням параметрів структури для розрахунків, відмінних від наведених у попередніх роботах, що може бути пов'язано з відмінністю методів їх визначення. Отримані результати свідчать про необхідність подальшого вдосконалення моделі для забезпечення достовірності розрахунків.

2. Методи дослідження структурних параметрів потребують стандартизації та максимального спрощення з метою розширення можливостей застосування цієї моделі не лише для наукового прогнозування, але й для здійснення контролю якості показників механічних властивостей.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Li, Feng, et al. "Eutectic aluminum alloys fabricated by additive manufacturing: A comprehensive review." *Journal of Materials Science & Technology* (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2025.06.016>
2. Macías, Juan Guillermo Santos, et al. "Influence on microstructure, strength and ductility of build platform temperature during laser powder bed fusion of AlSi10Mg." *Acta Materialia* 201 (2020): 231-243. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.10.001>
3. Zhao, Lv, et al. "Review on the correlation between microstructure and mechanical performance for laser powder bed fusion AlSi10Mg." *Additive Manufacturing* 56 (2022): 102914. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102914>
4. Mondolfo, L.F. (1976) *Aluminum Alloys: Structure and Properties*. Butterworths and Co., Ltd., London, 806. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-408-70932-3.50404-6>
5. VDI 3405 Blatt 2.1 Additive Fertigungsverfahren - Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) - Materialkennndatenblatt Aluminiumlegierung AlSi10Mg. -2020-08 – 7.

STUDY OF THE APPLICABILITY OF A MICROMECHANICAL STRENGTHENING MODEL TO ALSI10MG ALLOY UNDER ADDITIVE MANUFACTURING CONDITIONS

Serhii Bushtruk, Tetiana Myronova

Abstract. *For structural aluminum alloys such as silumin, tensile testing to determine strength and ductility parameters is a mandatory quality control procedure. The*

requirement for technological control of each batch can be reduced provided that stable and reproducible results are achieved, which can be ensured, in particular, by using programmed manufacturing regimes in additive PBF-LB/M technology. The experimental determination of mechanical properties may be replaced by their modeling based on structural parameters. This work investigates an existing micromechanical strengthening model of the alloy based on the rule of mixtures, calculated using structural parameters determined from samples produced under different conditions and process parameters. The calculated yield strength values are compared with the results of tensile testing. It was found that the model requires further refinement due to a significant error, and the methods for determining the structural parameters of the material should be simplified as much as possible to enable wider implementation.

Keywords: *laser-based powder bed fusion, silumin, defects in materials, norms and methods of control, strength, modeling of properties.*

АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ В ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ ЖАРОСТІЙКОГО СПЛАВУ ЗІ ЗНИЖЕНОЮ ЩІЛЬНІСТЮ

Гречаний О.М.¹ [ORCID], Васильченко Т.О.² [ORCID],

Заневський А. Ю.³ [ORCID], Обуденіков Б.С.⁴ [ORCID]

¹Запорізький національний університет, Ph.D., доцент, Україна, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, Ph.D., доцент, Україна

²Запорізький національний університет, к.т.н., доцент, Україна, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, к.т.н., доцент, Україна

³Запорізький національний університет, магістрант, Україна

⁴Запорізький національний університет, магістрант, Україна

Анотація. Виконано системний аналіз сучасного електротермічного обладнання, що використовується для отримання високоміцних жаростійких сплавів на основі нікелю зі зниженою щільністю в лабораторних умовах. Актуальність дослідження обумовлена потребами авіаційної та енергетичної галузей у матеріалах, здатних працювати при високих температурах, циклічних навантаженнях та агресивних середовищах при одночасному зниженні масових характеристик конструкцій. Проведено порівняльний аналіз електродугових печей, вакуумно-дугового та електрошлакового переплаву, вакуумно-індукційних і електронно-променевих систем. Встановлено, що вакуумно-індукційне плавлення забезпечує оптимальний баланс між чистотою металу, точністю легування, гомогенністю структури та енергоефективністю. Показано перспективність створення мобільних лабораторних комплексів для дослідження жаростійких сплавів нового покоління.

Ключові слова: жаростійкі сплави, нікелеві сплави, вакуумно-індукційне плавлення, електротермічне обладнання, легування, вакуум.

Вступ. Сучасне авіабудування та енергетичне машинобудування потребують матеріалів, здатних працювати в умовах високих температур, змінних навантажень та агресивних середовищ [1]. Особливий інтерес представляють жаростійкі нікелеві сплави зі зниженою щільністю, що дозволяють підвищити ресурс газотурбінних установок при одночасному

зниженні маси конструкційних елементів. Суттєвим стримуючим фактором у розробці жаростійких сплавів нового покоління є обмеженість подальшого вдосконалення традиційних нікелевих систем. В умовах інтенсивного розвитку сучасних технологій застосування «класичних» нікелевих жаростійких сплавів поступово втрачає актуальність. Зокрема, в авіаційній галузі потенціал жаростійких нікелевих матеріалів практично вичерпаний, що обумовлено роботою при температурах до 85 % температури солідуса, що фактично відповідає граничному рівню їх експлуатаційної жаростійкості [2, 3].

За таких умов особливої актуальності набуває проведення комплексного системного аналізу сучасних технологічних підходів до отримання експериментальних жаростійких нікелевих сплавів V покоління в умовах дослідницьких лабораторій. У зв'язку з цим науково-практична задача дослідження полягає у формуванні науково обґрунтованих критеріїв вибору технологічного обладнання та визначенні його найбільш раціонального типу, здатного забезпечити лабораторне отримання експериментальних сплавів із заданим комплексом фізико-механічних та експлуатаційних властивостей. Реалізація такого підходу дозволить підвищити ефективність досліджень і забезпечити відтворюваність характеристик перспективних жаростійких матеріалів в умовах лабораторного виробництва.

Основний матеріал. Аналіз джерел у вільному доступі дозволив визначити, що для отримання жаростійких сплавів можуть використовуватися електродугові печі, установки вакуумно-дугового переплаву, електрошлакового переплаву, вакуумно-індукційні та електронно-променеві системи.

Встановлено, що електродугові печі характеризуються відносною технологічною простотою та можливістю плавлення широкого спектра металевої сировини, включаючи тугоплавкі компоненти. Разом з тим їх застосування супроводжується підвищенням ризиком забруднення металу неметалевими включеннями та складністю забезпечення високої стабільності хімічного складу [4, 5].

Технології вакуумно-дугового та електрошлакового переплаву забезпечують високий рівень рафінування металу та формування однорідної структури зливка. Однак їх використання в лабораторних умовах обмежується високими енергетичними витратами, складністю технологічної підготовки та необхідністю використання попередньо виготовлених електродів [6, 7].

Електронно-променеве плавлення забезпечує отримання матеріалів надвисокої чистоти та є перспективним для переробки високореакційної або спеціальної металевої сировини. Водночас значна вартість обладнання та складність експлуатації обмежують широке використання даної технології в лабораторній практиці [8].

Найбільш універсальною технологією для лабораторного отримання експериментальних сплавів є вакуумно-індукційне плавлення. Даний метод забезпечує ефективне видалення газових домішок, точне дозування легуючих елементів та інтенсивне електромагнітне перемішування розплаву, що сприяє підвищенню хімічної та структурної однорідності матеріалу [9]. Додатковою перевагою є відносно компактні габарити обладнання та можливість його адаптації до умов дослідницьких лабораторій з обмеженими енергетичними ресурсами.

Висновки. Підсумовуючи все вищесказане можна відзначити, що проведений системний аналіз електротермічного обладнання для отримання жаростійких нікелевих сплавів у лабораторних умовах, вказує на те, що вакуумно-індукційне плавлення є найбільш ефективним методом отримання сплавів зі зниженою щільністю. Завдяки обґрунтування дослідження визначена перспективність створення мобільних лабораторних комплексів для дослідження нових жаростійких матеріалів.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Potapov O. M. Composites: prospects for the use in the space and rocket equipment. *Kosmichna nauka i tehnologiya*. 2015. Vol. 21, no. 5(96). P. 69–74. <https://doi.org/10.15407/knit2015.05.069>
2. Zalewski P., Kachel S., Motyl K. Space rocket for air-rocket system. *Journal of Konbin*. 2023. Vol. 53, no. 2. P. 45–64. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.7125>.

3. Aircraft Gas Turbine Engine Testing / S. Fábry et al. *Acta Avionica Journal*. 2019. P. 39–44. <https://doi.org/10.35116/aa.2019.0016>
4. Visuri V.-V., Echterhof T. Electric Arc Furnace Steelmaking. *Metals*. 2025. Vol. 15, no. 12. P. 1285. URL: <https://doi.org/10.3390/met15121285>
5. Some Problems on Large Electric Arc Furnace. *DENKI-SEIKO[ELECTRIC FURNACE STEEL]*. 1960. Vol. 31, no. 4. P. 206–213. URL: <https://doi.org/10.4262/denkiseiko.31.206>
6. 14. Gruber H. Consumable-electrode vacuum arc melting. *JOM*. 1958. Vol. 10, no. 3. P. 193–198. URL: <https://doi.org/10.1007/bf03397883>
7. Physicochemical comparison of electroslog remelting with consumable electrode and electroslog refining with liquid metal / G. Polishko et al. *Ironmaking & Steelmaking*. 2018. Vol. 46, no. 8. P. 789–793. URL: <https://doi.org/10.1080/03019233.2018.1428419>
8. On the melting of zirconium alloys from scraps using electron beam and induction furnaces – recycling process viability / L. A. T. Pereira et al. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9, no. 3. P. 4867–4875. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.006>
9. Casting of Titanium Alloys in Centrifugal Induction Furnaces / A. Karwiński et al. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2014. Vol. 59, no. 1. P. 403–406. URL: <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0068>

ANALYSIS OF EQUIPMENT FOR CREATING A HEAT-RESISTANT ALLOY WITH REDUCED DENSITY IN LABORATORY CONDITIONS

Oleksii Hrechanyi, Tetiana Vasilchenko, Anton Zanevskyi, Bohdan Obudenikov

Abstract. A systematic analysis of modern electrothermal equipment used to obtain high-strength heat-resistant nickel-based alloys with reduced density in laboratory conditions has been performed. The relevance of the study is due to the needs of the aviation and energy industries for materials capable of operating at high temperatures, cyclic loads and aggressive environments while simultaneously reducing the mass characteristics of structures. A comparative analysis of electric arc furnaces, vacuum arc and electroslog remelting, vacuum induction and electron beam systems has been performed. It has been established that vacuum induction melting provides an optimal balance between metal purity, alloying accuracy, structural homogeneity and energy efficiency. The prospects for creating mobile laboratory complexes for studying new generation heat-resistant alloys have been shown.

Keywords: heat-resistant alloys, nickel alloys, vacuum induction melting, electrothermal equipment, alloying, vacuum

ПРОБЛЕМИ КЕРУВАННЯ НАЗЕМНИМИ ПРИСТРОЯМИ ЗА ДОПОМОГОЮ СИНЕРГЕТИЧНОГО ПІДХОДУ

Зайцев В.Г. [ORCID]

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, канд. фіз.-мат. наук,
доцент, Україна*

Анотація. В даній роботі розглянуті проблеми керування автономними наземними (або літальними) пристроями та основі їх математичних моделей керування. У якості основного метода використано синергетичний підхід побудови керування для різних траєкторій руху апарату. Розглянуто рух його безпосередньо по прямій, колу та кривій типу синусоїди. Головним тут є проблема планування цілеспрямованого руху, який можливо розкласти на вказані типи. Але виникає завдання перемикання руху апарату з одного типу на інший, яке пов'язано з багатьма впливами на його динаміку в умовах невизначеності та врахування зовнішніх нелінійних ефектів. Тому виникає питання як краще визначитися з цієї проблемою.

Ключові слова: безпілотні наземні пристрої, математичне моделювання, синергетичне керування.

Вступ. Еволюція методів керування пройшла шлях від класичних ПД-регуляторів до оптимальних (LQR), робастних (зокрема H^∞), адаптивних та інтелектуальних підходів (нечітка логіка, нейромережі), а також прогнозного керування модельного типу (MPC), яке дозволяє прямо враховувати обмеження, оптимізувати енерговитрати та компенсувати збурення в горизонті прогнозу [1,3,6]. Водночас MPC потребує значних обчислювальних ресурсів і якісних моделей. На цьому тлі синергетичний підхід вирізняється поєднанням аналітичної керованості, робастності та плавності сигналів. Його сутність — у введенні макрозмінних та стабілізації інваріантів, що формують «синергетичний атрактор» і забезпечують збіжність траєкторій незалежно від початкових умов, зі зниженими піками навантажень на приводи [2].

Основний матеріал. У роботі змодельоване рух автономних мобільних роботів (AMP) у двовимірному середовищі [7]. Спираючись на синергетичний підхід, виведено замкнені формули сигналів керування для трьох базових

траєкторій — прямолінійної, кругової та синусоїдальної [5]. Для кожного режиму синтезовано керуюче прискорення, що забезпечує стійке стеження та нечутливість до зовнішніх збурень. Отримані результати дають змогу зіставити ефективність розглянутих законів керування та підібрати оптимальні параметри макрозмінних під різні сценарії руху. Синергетичний підхід поєднує теоретичну строгість і практичну дієвість, є універсальним інструментом для побудови адаптивних алгоритмів керування, придатних до реальної експлуатації АМР. Завдяки здатності формувати гладке, надійне й робастне керування в умовах невизначеності метод відкриває перспективи для формування руху автономних наземних систем.

Математична модель руху мобільного гусеничного робота у векторі стану $x=[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T$ має наступну форму:

$$\dot{x}_1 = x_3 \cos x_4, \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = x_3 \sin x_4, \quad (2)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{u_1 - R_t}{m}, \quad (3)$$

$$\dot{x}_4 = x_5, \quad (4)$$

$$\dot{x}_5 = -\frac{Bu_2}{2I_z} - \frac{Mr}{I_z}, \quad (5)$$

Основна мета керування – забезпечити стійке переміщення робота з довільного початкового стану в задану точку робочого простору (x_1^*, x_2^*) . У синергетичній теорії сукупність критеріїв якості задається системою інваріантів. Перший інваріант (підмножина цілей) для робота формулюється як

$$\mathring{a} = \{x_1 = x_1^*, x_2 = x_2^*\} \quad (6)$$

Це означає, що в усталеному режимі координати центра мас робота повинні збігатися з заданими координатами цільової точки. Першим кроком синтезу є розв’язання підзадачі стабілізації кута орієнтації робота. Для цього використовуємо підсистему (4)–(5). Вводимо бажаний кут орієнтації θ_0 , який згодом буде пов’язаний із положенням робота відносно цільової точки. Перша макрозмінна задається як

$$\Psi_1 = x_5 + k_1(x_4 - \theta_0) \quad (7)$$

де $k_1 > 0$ – константа налаштування. Сенс їх вибору: член $x_4 - \theta_0$ – похибка за кутом; член x_5 – кутова швидкість. Умова $\Psi_1 \approx 0$ означає одночасно розворот робота до кута θ_0 і згасання кутової швидкості. Відповідно до методу синергетичного керування Ψ_1 – макрозмінна повинна задовольняти основне функціональне рівняння

$$\Psi_1 + \lambda_1 \dot{\Psi}_1 = 0, \lambda_1 > 0 \quad (8)$$

Обчислюємо похідну $\dot{\Psi}_1$, використовуючи модель (4), (5). Звідси визначаємо «зовнішній» закон керування поворотом

$$u_2 = \frac{2I_z}{B} \left[k_1(x_5 - \dot{\theta}_0) + \lambda_1 \Psi_1 - \frac{M_r}{I_z} \right].$$

Приймаємо стандартне синергетичне припущення про різні часові масштаби: підсистема обертального руху працює значно швидше за поступальний рух. Тому на «повільному» часовому масштабі можна вважати що $x_4 \approx \theta_0$, $x_5 \approx 0$. Тоді з (1)–(5) отримуємо наступну декомпозовану модель поступального руху:

$$\dot{x}_1 = x_3 \cos x_4, \quad \dot{x}_2 = x_3 \sin x_4, \quad \dot{x}_3 = \frac{u_1 - R_t}{m}. \quad (9)$$

На цьому рівні керування u_2 уже надано законом для Ψ_1 , а змінна θ_0 розглядається як відома функція, що формується координатним рівнем синтезу. Щоб керувати швидкістю, яка одночасно обмежена зверху, вводимо наступну другу макрозмінну $\Psi_2 = x_3 - V_{max} \tanh(\varphi)$, де $V_{max} > 0$ максимально допустима швидкість, $\varphi(x)$ – внутрішня керуюча змінна. З умови $\Psi_2 \rightarrow 0$ автоматично випливає обмеження $|x_3| \leq V_{max}$. Як і раніше, функціональне співвідношення типу (8) для Ψ_2 має вигляд

$$\Psi_2 + \lambda_2 \dot{\Psi}_2 = 0, \lambda_2 > 0.$$

З урахуванням (9) визначається наступний «зовнішній» закон керування тягою

$$u_1 = R_t - m[V_{max}(1 - \tanh^2(\varphi))\dot{\varphi} - \lambda_2(x_3 - V_{max} \tanh(\varphi))].$$

Для замикання визначення структури керування можливо, наприклад, покласти внутрішню змінну $\varphi = k_\varphi \rho$, $\rho = \sqrt{(x_1 - x_1^*)^2 + (x_2 - x_2^*)^2}$, тобто пропорційною відстані до цільової точки. Тоді з $\Psi_2 = 0$ маємо $x_3 = V_{max} \tanh(k_\varphi \rho)$, і

швидкість автоматично зменшується при наближенні до цілі. Щоб безпосередньо забезпечити виконання інваріанту (6), вводимо координатні макрозмінні: $\Psi_3 = x_1 - x_1^*$, $\Psi_4 = x_2 - x_2^*$. Для них використовуємо функціональні співвідношення типу (8):

$$\dot{\Psi}_3 + \lambda_3 \Psi_3 = 0, \lambda_3 > 0, \dot{\Psi}_4 + \lambda_4 \Psi_4 = 0, \lambda_4 > 0.$$

З урахуванням декомпозованої моделі $\dot{x}_1 = x_3 \cos \theta_0$, $\dot{x}_2 = x_3 \sin \theta_0$ одержуємо систему $x_3 \cos \theta_0 + \lambda_3(x_1 - x_1^*) = 0$, $x_3 \sin \theta_0 + \lambda_4(x_2 - x_2^*) = 0$. З неї знайдемо бажаний кут орієнтації $\theta_0 = \arctan2(\lambda_4(x_2 - x_2^*)/\lambda_3(x_1 - x_1^*))$, а також бажану швидкість

$$x_3 = -\lambda_3 \frac{x_1 - x_1^*}{\cos \theta_0} = -\lambda_4 \frac{x_2 - x_2^*}{\sin \theta_0}.$$

Якщо одночасно врахувати обмеження швидкості, задане макрозмінної θ_0 , то фактичне значення x_3 береться як

$$x_3 = V_{\max} \tanh(k_{\varphi} \rho),$$

а кут θ_0 визначається формулою вище. Потім θ_0 підставляється в закон керування u_2 , а $x_3(t)$ – у закон керування u_1 .

Вище сформовано синергетичний закон керування для переміщення мобільного гусеничного робота до цільової точки на основі моделі (1)–(5) та синергетичних макрозмінних Ψ_1 , Ψ_2 . На практиці рух робота може бути ускладнено наявністю перешкод у робочій області, тому додатково розглянемо задачу обходу перешкоди квадратної форми. Принципово важливо, що загальна структура синергетичного керування не змінюється: макрозмінні Ψ_1 , Ψ_2 та закони керування u_1 , u_2 залишаються такими ж, а модифікація стосується лише формування бажаного напрямку руху θ_0 на координатному рівні. При цьому вважаємо, що повний стан робота (x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5) відомий безпосередньо з математичної моделі, тобто додатковий «пристрій спостереження» не використовується. На рис. 1 наведено результати візуалізації моделювання траєкторії руху робота з позначенням ключових точок маршруту P0, P1, P2, що відповідають фактичним поворотам та зміні напрямку руху.

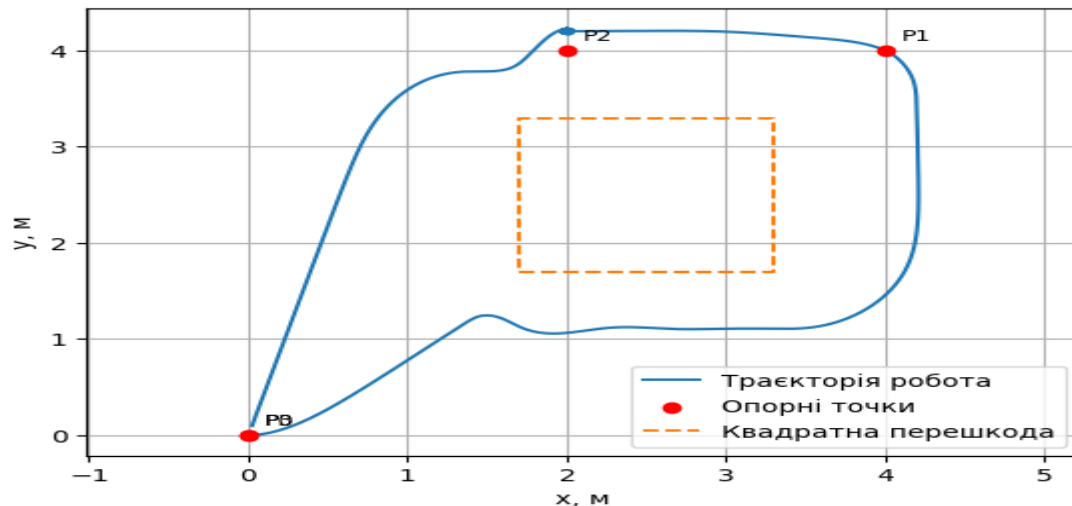


Рисунок 1– Рух гусеничного робота з об’їздом квадратної перешкоди та проміжними опорними точками

Висновки

Вище сформовано керування руху АМР з проміжними опорними точками, яке дозволяє з урахуванням координат перешкоди, виконувати переміщення пристрою у визначену точку площини руху. Для літальних пристроїв можливо використання руху по колу, синусоїдального руху. В таких випадках потрібно використовувати відповідні рівняння для макрозмінних Ψ_i . Проблему часу перемикання керування з одного типу на інший потрібно вирішувати відповідно до поставленого завдання пристрою.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Siegwart R., Nourbakhsh I., Scaramuzza D. Introduction to Autonomous Mobile Robots. – 2nd ed. – MIT Press, 2011. - 447 pp.
2. Kolecnikov A.A. Cunergetuchna teoriya upravlinnya. Energoatomizdat. -1994. 344 s. [in Russian].
3. Mellinger D., Kumar V. Minimum Snap Trajectory Generation and Control for Quadrotors. IEEE ICRA, 2011.- pp. 41-47.
4. Gorbylin V.P., Gylyazkui L.A., Cergienko I.B. Pochanovka ta matematichni modeli problem optimizatsii litalnux apparativ z dunamichnumu depo// Fundamentakni I prukladni problemu Computer Science // Control Systems and Computers, N1, 2019, Article 1, (279), pp. 3-10.
5. Nechepurenko V.A. Metodu keryvany BPLA iz zactocyvanym kompyternogo zopy. Texnichni nauku. № 5, 2024. –s. 217-225 [in Ukrainian].
6. Pavlov S., Novoselov S. Keryvannya mobilnum avtonomnum robotom z bukoructanyam ROS. Universum: Texnichni nauku, 2024.Vol. 5. s/87-92 [in Ukrainian].

7. Malu S. K., Majumdar J. Kinematics, Localization and Control of Differential Drive Mobile Robot // Global Journals of Research in Engineering. – 2014. – Vol. 14, Issue H1. – P. 1–7.

PROBLEMS OF MANAGING GROUND DEVICES USING A SYNERGETIC APPROACH

V.G. Zaytsev

Abstract. *This work examines the problems of controlling ground or aerial vehicles based on their mathematical control models. A synergetic approach to control design for different motion trajectories of the vehicle is used as the main method. The motion directly along a straight line, a circle and a sinusoidal-type curve is considered. This is the problem of planning its purposeful movement, which can be decomposed into the specified types. However, the task arises of switching the vehicle's movement from one type to another, which is associated with many influences on its dynamics under conditions of uncertainty and accounting for external nonlinear effects. Therefore, the question arises of how best to address this problem.*

Keywords: *unmanned ground vehicles, mathematical modeling, synergetic control.*

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ВСТАНОВЛЕННЯ ВПЛИВУ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ НА СТРУКТУРУ ВАЛКОВИХ ЧАВУНІВ

Іванова Л.Х.¹ [ORCID], Селівьорстов В.Ю.² [ORCID],

Хитько О.Ю.³ [ORCID], Білий А.П.⁴ [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, д.т.н., проф., Україна

²Український державний університет науки і технологій, д.т.н., проф., Україна

³Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доц., Україна

⁴Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доц., Україна

Анотація. Метою досліджень було встановлення карбідоутворюючої здатності різних РЗМ у білих валкових чавунах. Для досягнення цієї мети була поставлена наступна задача – установити вплив хімічних елементів церієвої та ітрієвої підгруп РЗМ на мікроструктуру валкового чавуну. Обґрунтувати вибір РЗМ для обробки білих валкових чавунів. Виявлені закономірності впливу рідкісноземельних елементів церієвої підгрупи – самарію та церію та ітрієвої підгрупи – гадолінію та ітрію при швидкості охолодження, що має місце у валковій ливарній формі на процеси структуроутворення білих чавунів для прокатних валків. Встановлені закономірності впливу рідкісноземельних елементів підгруп на процеси структуроутворення білих чавунів для прокатних валків: карбідоутворююча здатність РЗМ ітрієвої підгрупи була у 5,2 рази більшою за церієву підгрупу.

Ключові слова: валковий чавун, рідкісноземельний метал, структурний складник, карбідоутворююча здатність, модифікування чавуну, мікроструктура чавуну, структуроутворення

Вступ. Чавунні прокатні валки є складними виливками, в яких поверхневий робочий шар представлений білим (або половинчастим з кулястим або пластинчастим графітом), а серцевина – сірим чавуном з графітом таких же форм [1]. Якість литих чавунних валків, їх службові властивості залежать від багатьох факторів, але, головним чином, від фізико-хімічних властивостей застосовуваних розплавів і процесів, що протікають у період затвердіння та подальшого охолодження в ливарній формі. Застосовувані на прокатних станах нині валки з модифікованого чавуну різноманітні за розмірами та призначенням, виготовляються з різною

структурою та механічними властивостями. Кафедра ливарного виробництва Українського державного університету науки і технологій понад шістдесят років займається дослідженням впливу різних факторів на якість литих чавунних валків. [2-4]. Одним з важливих питань для теорії та практики виробництва чавунних прокатних валків є дослідження впливу рідкісноземельних металів на структуру валкових чавунів.

Мета роботи. Визначити вплив двох підгруп рідкісноземельних металів на структуру матеріалу прокатних валків, обрати перспективну групу рідкісноземельних металів.

Основний матеріал. Для виконання поставлених у роботі завдань використовували стандартні методи контролю, апробовані методи дослідження та сучасне обладнання для отримання чавунів, проведення хімічного, металографічного аналізу. Мікроскопічне дослідження проводили на оптичних метало-мікроскопах МІМ-8М та Neophot 21 при збільшеннях 12...1300. Шліфи досліджували до та після травлення. Як основний травник використовували 2% -ний розчин азотної кислоти в етиловому спирті (ніталь). Кількість структурних складників визначали точковим методом Глаголева у 20 полях зору зі збільшенням 400, що забезпечувало достатню достовірність. Мікротвердість структурних складових чавунів визначали на приладі ПМТ-3 за ГОСТ 9450-76 при навантаженні 0,49Н та збільшенні 487. Точність вимірювання діагоналі відбитка становила 0,07 мкм. Мікротвердість структурних складових чавунів визначали на приладі ПМТ-3 за ГОСТ 9450-76 при навантаженні 0,49Н та збільшенні 487. Точність вимірювання діагоналі відбитка становила 0,07 мкм. Величину мікротвердості розраховували як середню 50 вимірів. Для модифікування чавунних розплавів використовували індивідуальні РЗМ із вмістом домішок %: церій – 0,41, ітрій – 0,24, гадоліній – 0,29, самарій – 0,46. Було проведено серію плавок на чавуні постійного хімічного складу: С 3,49; Si 0,30; Mn 0,05; P 0,005; S 0,2; Fe решта після кристалізації зі швидкістю охолодження 5,5 град/с.

Мікроструктура вихідного немодифікованого чавуну. Зразок з немодифікованого чавуну після кристалізації мав структуру доевтектичного

білого чавуну (БЧ): дендрити аустеніту були оточені ледебуритною евтектикою стільникового типу з мікротвердістю H_{50} 7512 МПа. Евтектоїдне перетворення аустеніту проходило з утворенням трооститу, мікротвердість якого була 3883 МПа, рідко зустрічалися ділянки пластинчастого перліту. Перетворення ледебуритного аустеніту частіше відбувалося з поділом фаз, цементит нашаровувався на евтектичному, ферит виділявся окремо.

Мікроструктура чавунів, модифікованих РЗМ церієвої групи. Дослідження проводили на доевтектичних чавунах, виплавлених на постійній шихті. При модифікуванні досліджуваного базового чавуну зростаючими кількостями самарію чавун з його залишковим вмістом 0,094% мав структуру доевтектичного БЧ, у порівнянні з базовим чавуном зросла кількість аустеніту до 40,5%, а також знизилася кількість ледебуриту М7 і підвищилася його мікроледебуриту і Па8 мікро. При евтектоїдному перетворенні утворювався троостит з вищою мікротвердістю H_{50} 3991 МПа.

При підвищенні концентрації елемента-модифікатора до 0,198% при кристалізації більшість рідини перетворювалася на аустеніт, кількість якого досягала 56,2%. Решта рідини, що залишилася, зазнавала евтектичного перетворення з утворенням тонкого ледебуриту і ділянок з конгломератною структурою. Після затвердіння при охолодженні від евтектичної до евтектоїдної температури відбувалося виділення вторинного цементиту, який ріс в аустеніті у вигляді пластин. Евтектоїдне перетворення проходило в основному з утворенням тонкодиференційованого перліту (трооститу). Значення мікротвердості карбідної фази і мартенситу в чавунах із залишковим вмістом самарію 0,198% були в середньому на 10% вище порівняно з чавуном, що містить 0,094% модифікатора. Подальше підвищення концентрації самарію в чавуні (до 0,423%) призводило до різкого зменшення кількості ледебуриту, майже вся евтектична рідина зазнавала розпаду з утворенням конгломератної структури, тобто спостерігалось роздільне зростання дендритів аустеніту та цементитних пластин. Дрібні ледебуритні колонії зустрічалися дуже рідко. Після затвердіння вторинний цементит виділявся у вигляді пластин. Крім того, деякі дендритні гілки аустеніту переохолоджувалися до температури

мартенситної області. При вмістах самарію 0,821% кристалізація ледебуриту повністю придушувалася, евтектичне перетворення проходило з поділом фаз. Кількість мартенситу у структурі чавуну зростала.

При модифікуванні базового чавуну церієм отримані близькі результати щодо зміни структури матриці. У межах досліджених концентрацій (0,113...0,948%) було отримано БЧ, у матриці яких кількість перліту зростала від 66,4 до 72,5%. У чавуні із вмістом церію 0,113% порівняно з базовим чавуном зросла кількість аустеніту та знизилася кількість ледебуриту (30,6%), а також його мікротвердість до 6992 МПа. При евтектоїдному перетворенні утворювався перліт з нижчою мікротвердістю H_{50} 3790 МПа. При підвищенні вмісту церію до 0,208 і 0,392% при кристалізації більшість рідини перетворювалася на аустеніт, кількість якого досягала 68,0%. Решта рідини, що залишилася, зазнавала евтектичного перетворення з утворенням тонкого ледебуриту і ділянок з конгломератною структурою.

Евтектоїдне перетворення проходило в основному з утворенням тонкодиференційованого перліту (трооститу) з мікротвердістю 4280 МПа. Слід зазначити, що з концентраціях 0,113...0,392% в ледебуритних колоніях зустрічався аномальний ферит. При вмістах церію 0,651 і 0,948% кристалізація ледебуриту в чавуні повністю придушувалася, евтектичне перетворення проходило з поділом фаз. Мікротвердість карбідів досягала максимальних значень – 9463 та 9571 МПа відповідно. При евтектоїдному перетворенні утворювався троостит з мікротвердістю 4373 МПа.

Таким чином, а) максимальну кількість карбідів (без урахування карбідів у ледебуриті стільникового типу) було отримано при 0,821% самарію, 0,948% церію; б) середній вміст РЗМ цієї підгрупи становив 0,885%; в) середній вміст карбідної складової – 27,1%.

Мікроструктура чавунів, модифікованих РЗМ ітрієвої групи. У первинній структурі чавуну з залишковим вмістом 0,020% гадолінію дендрити аустеніту займали 34,5%, решта 65,5% припадали на ледебурит і цементит, що був продуктом роздільної кристалізації евтектичних фаз.

Існують критичні вмісти індивідуальних РЗМ, які забезпечували максимальну кількість карбідів у структурі чавуну. Середній залишковий вміст елементів ітрієвої підгрупи в чавуні було на 8% менше, ніж церієвої. Максимальна кількість карбідів (без урахування карбідів у ледебуриті стільникового типу) була отримана при 0,900% гадолінію та 0,731% ітрію. Середній вміст РЗМ цієї підгрупи становив 0,816%. Середній вміст карбідної складової 36,4%, що на 34% більше, ніж церієвої підгрупи.

Подальше підвищення вмісту індивідуальних РЗМ сприяло зменшенню кількості надлишкових карбідів у структурі чавунів. У чавунах із залишковим вмістом гадолінію 0,190; 0,900 і 1,446% при евтектичній кристалізації відбувався повний поділ фаз, і первинна структура складалася з дендритів аустеніту та цементиту. Вторинний цементит при подальшому охолодженні після затвердіння виділявся з аустеніту як тонких пластин. Евтектоїдне перетворення аустеніту при малому вмісті гадолінію призводило до утворення тонкого перліту з мікротвердістю 3883 МПа. Зі збільшенням вмісту гадолінію в чавуні мікротвердість перліту зростала, у структурі утворювався троостит, мікротвердість якого досягала 5120 МПа.

Вплив модифікування ітрієм було аналогічним впливу самарію: воно виражалось в зменшенні кількості ледебуриту, кристалізація якого повністю пригнічувалася при 0,731% ітрію, збільшенні мікротвердості цементиту і матриці (трооститу), в перетворенні частини аустеніту в мартенсит, частка якого.

Отже, для модифікування БЧ існують критичні змісти індивідуальних РЗМ, що забезпечували максимальну кількість карбідів у структурі БЧ. Так, максимальна кількість карбідів (без урахування карбідів у ледебуриті стільникового типу) була отримана при 0,314% самарію та 0,900% гадолінію, а також при 0,731% ітрію, 0,651% церію. Подальше підвищення вмісту індивідуальних РЗМ сприяло зменшенню кількості надлишкових карбідів у структурі чавунів. Як випливає з даних кількісного металографічного аналізу, при постійній швидкості охолодження кількість та тип структурних складових чавуну залежать від виду та залишкового вмісту індивідуального РЗМ.

Визначення карбідоутворюючої здатності РЗМ. Металографічний аналіз модифікованих індивідуальними РЗМ чавунів та розрахунок середніх відносних величин кількості карбідної складової на одиницю залишкового вмісту РЗМ показали, що за карбідоутворювальною здатністю досліджуваних РЗМ ітрієвої групи мали в середньому показник $845+747=796$, а досліджуваний $193+114=154$.

Таким чином, в інтервалі досліджених концентрацій РЗМ їх вплив на структурні зміни валкового БЧ був аналогічним. Модифікування білого чавуну РЗМ забезпечувало зміну типу карбідної евтектики та дисперсності перліту. Найбільша зміна структури модифікованого БЧ спостерігалася при залишковому вмісті самарію 0,423% або гадолінію 0,190%, а також ітрію 0,731%, і церію 0,651%. Підвищення дисперсності та мікротвердості перліту, поява в структурах мартенситу та пластинкова будова карбідної евтектики повинні сприяти підвищенню зносостійкості та міцності БЧ. Таким чином, незважаючи на те, що середній залишковий вміст елементів ітрієвої підгрупи в чавуні було на 8% менше, карбідоутворююча здатність цієї підгрупи була у 5.2 рази більшою за церієву підгрупу. Зазначені індивідуальні особливості РЗМ необхідно враховувати при виборі високоефективних складів КМ.

Висновки

Виявлені закономірності впливу рідкісноземельних елементів церієвої підгрупи – самарію та церію та ітрієвої підгрупи – гадолінію та ітрію на процеси структуроутворення білих чавунів для прокатних валків.

Встановлено, що в інтервалі досліджених концентрацій РЗМ та швидкості охолодження вплив РЗМ на структурні зміни валкового БЧ був аналогічним. Модифікування білого чавуну РЗМ забезпечувало зміну типу карбідної евтектики та дисперсності перліту. Карбідоутворююча здатність РЗМ ітрієвої підгрупи була у 5,2 рази більшою. Це дало можливість обґрунтувати тип основу комплексного модифікатора для досягнення необхідних властивостей матеріалу прокатних валків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кривошеев А. Є. Литі валки. Теоретичні та технологічні основи виробництва. – М.: Металургвид, 1957. – 360 с.
2. Білай Г. Є. Дослідження впливу модифікації на кристалізацію чавуну, структури і властивостей листопрокатних валків: Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.323 / Дніпропетр. металург. і-т. – Дніпропетровськ, 1967. – 23 с.
3. Колотило Є. В. Дослідження і удосконалення виробництва листопрокатних валків з модифікованих чавунів: Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.04 / Дніпропетр. металург. і-т. – Дніпропетровськ, 1977. – 23 с.
4. Іванова Л. Х. Теоретичні основи та практичні методи одержання литих прокатних валків із комплексномодифікованих чавунів: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.04 / Націон. металург. академія України. – Дніпропетровськ, 2008. – 35 с.

SYSTEM APPROACH TO DETERMINING THE EFFECT OF RARE-EARTH METALS ON THE STRUCTURE OF ROLL CAST IRONS

Lyudmila Ivanova, Vadim Selivorstov, Alexander Khitko, Alexander Belyi

Abstract. *The aim of the study is to determine the carbide-forming ability of various rare-earth metals in white roll cast irons. To achieve this goal, the following task was formulated: to establish the influence of chemical elements of the cerium and yttrium subgroups of rare-earth metals on the microstructure of roll cast iron, as well as to substantiate the selection of rare-earth metals for the treatment of white roll cast irons.*

Regularities of the influence of rare-earth elements of the cerium subgroup (samarium and cerium) and the yttrium subgroup (gadolinium and yttrium) on the structure formation processes of white cast irons for rolling rolls under cooling rates typical for roll casting molds have been established. It has been shown that the individual effects of the studied subgroups of rare-earth metals on the microstructure differ in terms of their residual content ranges.

Modification of white cast iron with rare-earth metals leads to changes in the type of carbide eutectic and the dispersion of pearlite. It has been established that the carbide-forming ability of rare-earth metals of the yttrium subgroup is 5.2 times higher than that of the cerium subgroup. This made it possible to substantiate the composition of the base of a complex modifier to achieve the required properties of roll materials.

Keywords: *roll cast iron, rare-earth metal, structural constituent, carbide-forming ability, cast iron modification, cast iron microstructure*

REFERENCE

1. Kryvosheyev A. YE. Lyti valky. Teoretychni ta tekhnolohichni osnovy vyrobnytstva. – M.: Metalurhvyd, 1957. – 360 s. [in Ukrainian].
2. Bilay H. YE. Doslidzhennya vplyvu modyfikatsiyi na krystalizatsiyu chavunu, struktury i vlastyvostry lystoprokatnykh valkyv: Avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.323 / Dnipropetr. metalurh. i-t. – Dnipropetrovs'k, 1967.– 23 s. [in Ukrainian].
3. Kolotylo YE. V. Doslidzhennya i udoskonalennya vyrobnytstva lystoprokatnykh valkyv z modyfikovanykh chavuniv: Avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.16.04 / Dnipropetr. metalurh. i-t. – Dnipropetrovs'k, 1977.– 23 s. [in Ukrainian].
4. Ivanova L. KH. Teoretychni osnovy ta praktychni metody oderzhannya lytykh prokatnykh valkyv iz kompleksnomodyfikovanykh chavuniv: Avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.16.04 / Natsion. metalurh. akademiya Ukrayiny. – Dnipropetrovs'k, 2008. – 35 s. [in Ukrainian].

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОМПЛЕКСНОГО РАФІНУВАННЯ ЧАВУНУ

Кисляков В.Г.¹ [ORCID], Маначин І.О.² [ORCID],
Руденко О.Л.³ [ORCID], Похвалітий А.А.⁴ [ORCID]

¹Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАНУ, к.т.н., Україна

²Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАНУ, к.т.н., ст.д., Україна

³Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАНУ, к.т.н., Україна

⁴Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, к.т.н., Україна

Анотація. Метою роботи є встановлення закономірностей поведінки та розподілу домішок у чавуні під час комплексної обробки на високотемпературній моделі, з урахуванням впливу термодинамічних і кінетичних факторів, для оптимізації процесів очищення та підвищення якості металу. Особливої цінності набувають дослідження на високотемпературних моделях, що передбачають роботу безпосередньо з рідким чавуном. Виконано розрахунки для умов інжекційної обробки чавуну з метою комплексного видалення домішок у лабораторній індукційній печі ємністю 100 кг. Проведено 5 послідовних обробок. Обробки супроводжувалися відбором проб чавуну і шлаку, заміром температури, а також фіксацією виданого реагенту. Під час проведення обробок було відпрацьовано технологічні параметри інжектування, які дали змогу вести обробку технологічно, без підвищеної бурності. Проведений аналіз вмісту домішок у чавуні показав, що з урахуванням умов проведення експерименту мають місце процеси десульфурзації, знекремнювання та дефосфорації, у тому числі одночасно.

Ключові слова: чавун, комплексна обробка, сірка, кремній, фосфор, моделювання.

Вступ. Комплексна обробка чавуну, що включає видалення сірки, кремнію і фосфору має переваги перед стандартною технологією поетапного рафінування чавуну у вигляді зменшення загального циклу плавки, теплових втрат і зменшення витрат у подальшому конвертерному переділі. У розглянутій технології як реагент пропонується використовувати суміш на основі $\text{CaO-Na}_2\text{CO}_3\text{-FeO}$. Важливим інструментом удосконалення технології є моделювання процесів видалення та поведінки домішок у розплавленому металі.

Основний матеріал. Дослідники різних країн проводили роботи по моделюванню технологічних процесів на «гарячих» моделях. Так, наприклад, вітчизнянні дослідники [1] відповідно до запропонованої технологічної схеми проводили моделювання одностадійного видалення частини кремнію і десульфурацію передільного чавуну. Серед закордонних дослідників можна відзначити роботу [2], в якій оцінено здатність видалення фосфору і сірки з розплавленого металу за допомогою флюсів $\text{CaO-SiO}_2\text{-CaF}_2$. Також можна відзначити роботу [3], в якій автори в лабораторних умовах досліджували реакції десульфурації та дефосфоризації у розплавленому металі.

Лабораторні дослідження проводилися на базі лабораторії кафедри металургії ім. проф. В.І. Логінова Дніпровського державного технічного університету (м. Кам'янське).

Перед початком лабораторних досліджень було проведено монтаж і налагодження обладнання, який містив у собі вибір місця і розміщення дозувального пристрою, встановлення сполучних шлангів, усунення недоліків, пов'язаних з експлуатацією обладнання. Було відпрацьовано методику обслуговування обладнання та усунення можливих аварійних ситуацій. Перед проведенням обробок з чавуном було здійснено «холодні» випробування всього обладнання, які підтвердили його готовність до виконання експериментальної частини досліджень.

Для отримання рідкого розплаву використовували чушки чавуну, які попередньо зважували та поступово завантажували в піч у міру їх розплавлення. Загальна маса завантаженого чавуну становила 72,5 кг. Тривалість процесу плавлення чушок склала 1 годину 20 хвилин. Протягом цього часу шляхом розсіву було підготовлено суміш реагентів, яку засипали в дозувальний пристрій у міру витрачання. Після отримання рідкого розплаву в нього вводили алюміній, масу якого фіксували в протоколі плавки.

Було проведено 5 послідовних обробок, на початку і наприкінці кожної проводили відбір проби чавуну і шлаку, а також проведено заміри температури. Проводилася фіксація кількості виданого реагенту за показаннями ваг до і після обробки. Під час проведення обробок було відпрацьовано технологічні

параметри інжектування, які дали змогу вести обробку технологічно, без підвищеної бурності.

На основі даних хімічного аналізу чавуну було проведено аналіз ефективності видалення домішок із чавуну при застосуванні рафінуючої суміші на основі $\text{CaO-Na}_2\text{CO}_3\text{-FeO}$ з присадкою алюмінію. Полученные зависимости приведены на рис. 1.

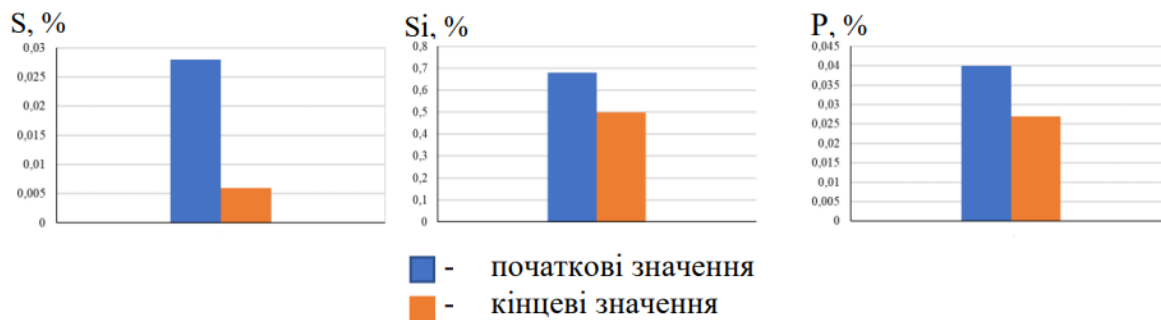


Рисунок 1 – Ефективність видалення домішок в лабораторних дослідженнях.

Висновки.

Визначено параметри газодинамічної системи інжектування та технологічні параметри введення суміші, які забезпечили технологічність проведення обробки. Проведено аналіз вмісту домішок у чавуні, який показав, що з урахуванням умов проведення експерименту мають місце процеси десульфурзації, знекремнювання та дефосфорації, у тому числі одночасно, що дає змогу казати про перспективність суміші, що застосовувалася.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. A. G. Chernyatevich, E. N. Sigarev, A. V. Berezina (2011). Refining of hot metal with organization of isolated reaction zones for the removal of silicon and sulphur *Steel in Translation*, Volume 41, Number 4, 307–310. <https://doi.org/10.3103/S0967091211040036>
2. A. Hernandez, A. Romero, F. Chavez, M. Angeles, R. D. Moral (1998) Dephosphorization and Desulfurization Pretreatment Iron with $\text{CaO-SiO}_2\text{-CaF}_2\text{-FeO-Na}_2\text{O}$ Slags *ISIJ International* 38(2):126-131 <https://doi.org/10.2355/isijinternational.38.126>
3. Mori, K., Wada, H. & Pehlke, R.D. (1985) Simultaneous desulfurization and dephosphorization reactions of molten iron by soda ash treatment. *Metall Trans B* 16, 303–312. <https://doi.org/10.1007/BF02679721>

HIGH-TEMPERATURE MODELING OF THE INTEGRATED CAST IRON REFINING PROCESS

V.G. Kislyakov, I.O. Manachyn, O.L. Rudenko, A.A. Pohvalityi

Abstract. *The aim of this work is to identify patterns in the behavior and distribution of impurities in cast iron during comprehensive processing on a high-temperature model, taking into account the influence of thermodynamic and kinetic factors, in order to optimize purification processes and improve metal quality. Studies using high-temperature models, which involve working directly with molten cast iron, are of particular value. Calculations were performed for the conditions of injection treatment of cast iron with the aim of comprehensive impurity removal in a 100-kg laboratory induction furnace. Five consecutive treatments were conducted. The treatments were accompanied by sampling of cast iron and slag, temperature measurement, and recording of the reagent dosage. During the treatments, the technological parameters of the injection were optimized, which allowed the treatment to be carried out efficiently without excessive turbulence. An analysis of the impurity content in the cast iron showed that, given the experimental conditions, desulfurization, desiliconization, and dephosphorization processes occur, including simultaneously.*

Keywords: *cast iron, complex processing, sulfur, silicon, phosphorus, modeling.*

**КЛАСИФІКАЦІЯ ПРОСТОРОВИХ СТАНІВ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ КАРТ
ВИСОТ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ
СИСТЕМ СЕНСОРНОГО СОРТУВАННЯ РУД**

Кондрашов Д.А.¹ [ORCID], Музика І.О.² [ORCID],

Купін А.І.³ [ORCID], Балик Д.К.⁴ [ORCID]

¹ Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, аспірант, Україна

² Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, к.т.н., доцент, Україна

³ Криворізький національний університет, м.Кривий Ріг, д.т.н.,професор, Україна

⁴ТОВ "НВП Гамаюн", м.Кривий Ріг, інженер-програміст вбудованих систем, Україна

Анотація. У роботі розглядається задача автоматичної класифікації просторових станів об'єктів (одиначний, об'єднаний, накладений) у системах прецизійного сенсорного сортування рудної сировини. Запропоновано підхід на основі перетворення тривимірних хмар точок, отриманих від лазерного сканера, у двовимірні карти висот з подальшою класифікацією за допомогою згорткових нейронних мереж (CNN). Досліджено вплив розмірності сітки (32×32, 64×64, 128×128) та архітектури моделі на якість класифікації. Проведено порівняльний аналіз п'яти архітектур: MLP, базова CNN, CNN+Dropout, CNN+L1 та поглиблена CNN. Встановлено, що поглиблена CNN на реальних даних забезпечує точність до 92% на валідаційній вибірці при розмірності 64×64.

Ключові слова: сенсорне сортування руд, карта висот, лазерне сканування, згорткова нейронна мережа, машинне навчання, класифікація, хмара точок, перенавчання, аугментація.

Вступ. Ефективність гірничо-збагачувальних комбінатів значною мірою залежить від якості первинного сортування рудної сировини. Сучасні системи сенсорного сортування використовують різноманітні типи сенсорів – від оптичних камер до 3D лазерних сканерів. Однак традиційні детерміновані алгоритми демонструють обмежену ефективність в умовах накладання та зближення шматків руди на конвеєрі: частка помилкових спрацювань може досягати 15–25%. Лазерне сканування дозволяє отримувати геометричну інформацію, інваріантну до умов освітлення та оптичних властивостей поверхні, однак автоматична інтерпретація таких даних залишається складною

задачею. Це обумовлює доцільність застосування методів машинного навчання для аналізу карт висот.

Основний матеріал

Задача та метод формування карт висот. Розглядається задача трикласової класифікації: одиночний об'єкт (Single), візуально об'єднані об'єкти (United) та накладені об'єкти (Overlapped). Карта висот формується із хмари точок $\{(x_k, y_k, z_k)\}$ за формулою:

$$H(i, j) = \max \{ z_k \mid (x_k, y_k) \in \text{cell}(i, j) \} \quad (1)$$

де $\text{cell}(i, j)$ – область простору X-Y для клітинки (i, j) регулярної сітки. Клітинки без точок заповнюються нулем; матриця нормалізується до діапазону $[0, 1]$. Така проєкція зберігає геометричну інформацію і є інваріантною до умов освітлення.

Датасет та аугментація. На першому етапі використовувалися синтетичні дані (по 500 зразків на клас), що підтвердило коректність підходу (точність >99%). Реальний датасет сформовано з CSV-файлів лазерного сканування фізичних зразків рудної сировини для трьох розмірностей сіток (32×32 , 64×64 , 128×128). Аугментація здійснювалася ротацією на 90° , 180° , 270° , що збільшило обсяг вибірки вчетверо та забезпечило інваріантність моделі до орієнтації об'єктів на конвеєрі. Реальні дані характеризуються наявністю дефектів: пропуски значень, нерівномірність поверхні, артефакти сканування.

Вплив розмірності. Порівняння трьох розмірностей сітки на реальних даних показало (таблиця 1): розмірність 32×32 забезпечує стабільне навчання з мінімальним перенавчанням (train/val: 0.94/0.91); розмірність 64×64 дає найкращий баланс якості та узагальнення (0.98/0.90); розмірність 128×128 призводить до явного перенавчання (1.0/0.85). Таким чином, оптимальною є розмірність 64×64 .

Таблиця 1

Точність класифікації залежно від розмірності карти висот

Розмірність	Train accuracy	Val accuracy	Перенавчання
32×32	0.94	0.91	Мінімальне
64×64	0.98	0.90	Помірне
128×128	1.00	0.85	Значне

Архітектури нейронних мереж. Досліджено п'ять архітектур. MLP (базова лінія) не враховує просторову структуру даних. Базова CNN містить два згорткові блоки Conv2D + MaxPooling. CNN+Dropout та CNN+L1 додають механізми регуляризації для зменшення перенавчання. Поглиблена CNN (Deer CNN) – основна запропонована архітектура: Conv2D(16) → Pool → Conv2D(32) → Pool → Conv2D(64) → Pool → Dense(64) → Dense(3, softmax), активація ReLU, оптимізатор Adam (lr=0.001), функція втрат – categorical cross-entropy. Поступове збільшення фільтрів 16→32→64 дозволяє виявляти ознаки від низькорівневих (границі, градієнти) до складних просторових структур.

Результати порівняльного аналізу. Навчання на реальних даних 64×64 (розбиття 70/30, 50 епох, Early Stopping). Поглиблена CNN досягає 92% точності на валідаційній вибірці, що на 29 в.п. перевищує MLP (63%) та на 9 в.п. – базову CNN (83%). CNN+Dropout показує найменше перенавчання (різниця train/val лише 2%), але абсолютна точність дещо нижча (89%). Аналіз помилок виявив, що класи United та Overlapped найчастіше плутаються між собою в граничних випадках, тоді як клас Single розпізнається надійно (>95%) у всіх архітектурах.

Висновки

1. Підхід на основі перетворення хмар точок у карти висот із подальшою класифікацією за допомогою CNN є ефективним методом розпізнавання просторових станів об'єктів у системах сенсорного сортування руд.

2. Поглиблена CNN (3 блоки Conv2D+Pool, фільтри 16→32→64) забезпечує найвищу точність – 92% на реальних даних (64×64), перевищуючи базовий MLP на 29 в.п.

3. Оптимальною розмірністю карти висот є 64×64: забезпечує найкращий баланс між деталізацією просторової інформації та узагальнювальними властивостями моделі.

4. Ротаційна аугментація (0°/90°/180°/270°) ефективно збільшує обсяг датасету та забезпечує інваріантність моделі до орієнтації об'єктів. Напрями подальших досліджень: архітектури ResNet/EfficientNet, крос-датасетна валідація, оптимізація для роботи в режимі реального часу.

ЖИТЕПАТҮПА / REFERENCE

1. Chalapathy R., Chawla S. Deep Learning for Anomaly Detection: A Survey // ACM Computing Surveys. – 2019. – Vol. 51, No. 5. – DOI: 10.1145/3299869.
2. Gholami A. et al. A Survey of Quantization Methods for Efficient Neural Network Inference // Low-Power Computer Vision. – 2021. – DOI: 10.1201/9781003162810-13.
3. Parisi G. I. et al. Continual Lifelong Learning with Neural Networks: A Review // Neural Networks. – 2019. – Vol. 113. – DOI: 10.1016/j.neunet.2019.01.012.
4. Peukert S. et al. A Review of Sensor-Based Sorting in Mineral Processing // Minerals. – 2022. – Vol. 12, No. 11. – DOI: 10.3390/min12111364.
5. Qi C. R. et al. PointNet++: Deep Hierarchical Feature Learning on Point Sets // NeurIPS. – 2017. – P. 5099–5108.
6. Rai S. et al. Application of Machine Learning Algorithms for Mineral Classification // Minerals Engineering. – 2021. – Vol. 170. – DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107054.
7. Robben C., Wotruba H. Sensor-Based Ore Sorting Technology in Mining // Minerals. – 2019. – Vol. 9, No. 9. – DOI: 10.3390/min9090523.
8. Wang M., Deng W. Deep Visual Domain Adaptation: A Survey // Neurocomputing. – 2018. – Vol. 312. – DOI: 10.1016/j.neucom.2018.05.083.

CLASSIFICATION OF SPATIAL OBJECT STATES BASED ON HEIGHT MAPS USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS FOR ORE SENSOR SORTING SYSTEMS

Dmytro Kondrashov, Andrew Kupin, Ivan Muzyka, Dmytro Balyk

Abstract. *This paper addresses the problem of automatic classification of spatial object states – single, united (close but non-overlapping), and overlapped – in precision sensor-based ore sorting systems. A method for transforming 3D point clouds obtained from a laser scanner into 2D height maps is proposed, followed by classification using convolutional neural networks (CNN). The influence of grid resolution (32×32, 64×64, 128×128) and model architecture on classification quality is investigated. A comparative analysis of five architectures is conducted: MLP, basic CNN, CNN+Dropout, CNN+L1, and Deep CNN. Results demonstrate that the Deep CNN achieves up to 92% validation accuracy on real data at 64×64 resolution, outperforming the MLP baseline by 29 percentage points.*

Keywords: *sensor ore sorting, height map, laser scanning, convolutional neural network, machine learning, classification, point cloud, overfitting, data augmentation.*

АНАЛІЗ КУТА ЗСУВУ ТА ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ТОЧІННІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ Ti-6Al-4V ЗА ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР

Пастернак С.М.¹ [ORCID]

¹Національний університет «Львівська політехніка», аспірант, Україна

Анотація. У роботі проведено дослідження кута зсуву та пластичної деформації при точінні титанового сплаву Ti-6Al-4V за умов попереднього нагріву заготовки від 20 до 700 °C. За допомогою моделювання в середовищі DEFORM-2D із використанням моделі Johnson–Cook встановлено, що підвищення температури сприяє термічному розм'якшенню матеріалу та зниженню опору зсуву.

Результати моделювання демонструють поступове зростання середнього кута зсуву з 34° до 36,2° при збільшенні швидкості різання та температури, особливо у діапазоні 700 °C. Виявлено, що на стаціонарному етапі кут зсуву стабілізується, оскільки температура в зоні різання досягає 800–900 °C внаслідок інтенсивної деформації та тертя. Попередній нагрів до 500 °C забезпечує більш стабільний перехід до квазістаціонарного режиму порівняно з обробкою за кімнатної температури. Аналіз сумарної пластичної деформації показав її відносну стабільність, що підтверджує визначальний вплив кінематики процесу та геометрії інструмента на цей параметр.

Ключові слова: Ti-6Al-4V, титановий сплав, кут зсуву, чисельне моделювання, DEFORM-2D, модель Johnson–Cook, ортогональне різання, пластична деформація, температура заготовки, швидкість різання.

Вступ. Сучасне машинобудування потребує впровадження високоефективних методів обробки важкооброблюваних матеріалів, серед яких особливе місце посідає титановий сплав Ti-6Al-4V. Широке застосування цього сплаву в авіакосмічній та медичній галузях зумовлене його високою питомою міцністю, проте низька теплопровідність матеріалу призводить до концентрації значних теплових потоків безпосередньо у зоні різання. Це суттєво впливає на термомеханічний механізм деформації та інтенсивність зношування інструменту. Ключовим параметром, що визначає енергоємність, напружено-деформований стан та силові характеристики процесу, є кут зсуву. Саме він формує геометрію первинної зони пластичної течії, визначаючи характер стружкоутворення. Дослідження динаміки зміни цього кута за умов

попереднього термічного впливу є критично важливим для оптимізації технологічних параметрів та підвищення продуктивності обробки титанових сплавів [1,2] .

Результати дослідження та їх аналіз

Кут зсуву розглядається як один із ключових параметрів процесу стружкоутворення, що визначає геометрію зони деформації, напружено-деформований стан матеріалу та силові характеристики різання. Моделювання ортогонального процесу різання виконано з використанням програмного комплексу DEFORM-2D із залученням термомеханічної моделі матеріалу Johnson–Cook, яка дозволяє враховувати спільний вплив деформації, швидкості деформації та температури на напруження течії [3]. Розрахунки проведено для температур заготовки 20, 300, 500 та 700 °С при швидкостях різання 60 і 100 м/хв за сталого значення подачі. Аналіз полів еквівалентних деформацій дав змогу ідентифікувати положення первинної зони зсуву та визначити середні значення кута зсуву [4,5].

У перші мілісекунди різання спостерігається підвищений кут зсуву, що є наслідком попереднього нагріву заготовки. На початковій стадії контакту інструмента з матеріалом (зона 1) заготовка перебуває у термічно розм'якшеному стані, внаслідок чого зменшується опір зсуву та формується більший кут зсуву. За цих умов пластична деформація концентрується вздовж похилої площини зсуву з меншими енергетичними витратами (рис.1).

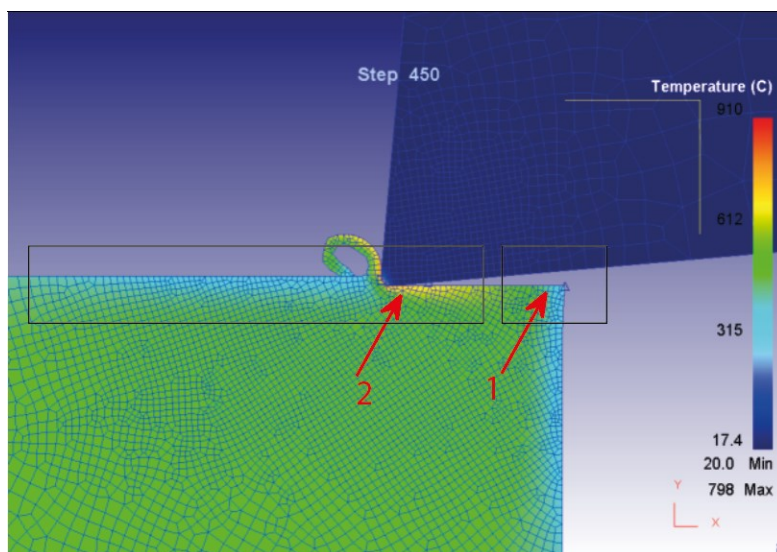


Рисунок 1 - Температурне поле в зоні різання при точінні нагрітої заготовки

На стаціонарному етапі формування стружки (зона 2) зміна кута зсуву є незначною, оскільки внаслідок інтенсивної деформації та тертя температура в первинній зоні зсуву швидко досягає 800–900 °С незалежно від початкової температури заготовки. Це забезпечує стабілізацію термічного розм'якшення та перехід процесу зсуву в квазістаціонарний режим.

Отримані результати свідчать про поступове зростання кута зсуву зі збільшенням температури заготовки. У діапазоні низьких і помірних температур (до 500 °С) зміна цього параметра є незначною, тоді як при температурі 700 °С спостерігається більш виражене його зростання, що пов'язано з інтенсивним термічним розм'якшенням матеріалу та зниженням опору пластичній деформації в зоні зсуву.

Аналіз часових залежностей кута зсуву показав, що початкова температура заготовки суттєво впливає на перехідні режими різання. За кімнатної температури характерним є різке врізання інструмента з помітними коливаннями кута зсуву, що зумовлено високою жорсткістю матеріалу та поетапним формуванням пластичної зони. У подальшому процес поступово переходить у стаціонарний режим. Натомість при попередньому нагріванні заготовки до 500 °С процес різання з перших моментів характеризується стабільною поведінкою, що свідчить про готовність матеріалу до квазістаціонарного пластичного зсуву. Отримані кількісні дані щодо значень кута зсуву для різних режимів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Значення кута зсуву для різних режимів різання

t, °С	v = 60 м/хв	v = 100 м/хв
20	32,66	34,01
300	33,80	34,58
500	34,35	35,54
700	34,40	36,18

Кількісний аналіз результатів моделювання показав, що зі зростанням температури від 20 до 700 °С середнє значення кута зсуву збільшується приблизно з 34° до 36,2°, причому основна частина зростання припадає на

високотемпературний діапазон. Така тенденція узгоджується з термомеханічною природою процесу різання, за якої зниження напружень течії призводить до переорієнтації площини зсуву під більшим кутом до напрямку різання.

Дослідження сумарної (effective) пластичної деформації, показало її відносну стабільність у широкому температурному інтервалі. Незначне зростання цього параметра при підвищених температурах вказує на те, що рівень накопиченої деформації визначається переважно кінематичними умовами процесу та геометрією інструмента, тоді як температура головним чином впливає на локалізацію деформації та величину напружень у зоні зсуву.

Висновки

На основі чисельного моделювання в DEFORM-2D встановлено, що початкова температура заготовки суттєво впливає на термомеханічний стан зони різання сплаву Ti-6Al-4V. Підвищення температури до 700 °C призводить до зростання кута зсуву з 33° до 37° через термічне розм'якшення матеріалу та зниження опору деформації. Вплив попереднього нагріву найбільш відчутний на стадії вривання, тоді як у стаціонарному режимі процес стабілізується під дією локального тепловиділення. Сумарна пластична деформація залишається відносно стабільною, що підтверджує домінування кінематичних чинників над температурними.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. H. A. Kishawy and A. Hosseini, Machining Difficult-to-Cut Materials. Cham: Springer, 2019.
2. D. A. Stephenson and J. S. Agapiou, Metal Cutting Theory and Practice, 3rd ed. CRC Press, Taylor and Francis Group, 2016.
3. DEFORM, Metal Forming Simulation Software. Accessed: Nov. 5, 2025. [Online]. Available: <https://www.deform.com/>
4. C. Kılıçaslan, “Modelling and Simulation of Metal Cutting by Finite Element Method,” Master’s thesis, İzmir Inst. of Technol., İzmir: Turkey, 2009.
5. J. P. Davim, Ed., Machining of Titanium Alloys, Berlin: Springer, 2014.

ANALYSIS OF SHEAR ANGLE AND PLASTIC DEFORMATION IN TURNING OF Ti-6Al-4V TITANIUM ALLOY AT ELEVATED TEMPERATURES

Serhiy Pasternak

Abstract. *This study investigates the shear angle and plastic deformation during the turning of Ti-6Al-4V titanium alloy under conditions of workpiece preheating from 20 to 700 °C. Using DEFORM-2D simulation with the Johnson–Cook constitutive model, it was established that increasing the temperature promotes thermal softening of the material and reduces shear resistance.*

The simulation results demonstrate a gradual increase in the average shear angle from 34° to 36.2° with increasing cutting speed and temperature, particularly in the 700 °C range. It was found that at the steady-state stage, the shear angle stabilizes because the temperature in the cutting zone reaches 800–900 °C due to intense deformation and friction. Preheating to 500 °C provides a more stable transition to the quasi-steady-state regime compared to machining at room temperature. Analysis of the total (effective) plastic strain showed its relative stability, confirming the dominant influence of process kinematics and tool geometry on this parameter.

Keywords: *Ti-6Al-4V, titanium alloy, shear angle, numerical simulation, DEFORM-2D, Johnson–Cook model, orthogonal cutting, plastic deformation, workpiece temperature, cutting speed.*

**КРИТИЧНІ ФАКТОРИ КОРОЗІЙНО-ВТОМНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ СТАЛІ 17Г1С
МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ В УМОВАХ НЕПОВНОГО
ЗАВАНТАЖЕННЯ ГТС**

Петрина Д.Ю.¹ [ORCID], Глеб А.Т.² [ORCID]

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
д.т.н., професор, Україна

²Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
аспірант, Україна

Анотація. Представлено результати дослідження впливу нестационарних режимів неповного завантаження магістральних газопроводів на критичні показники циклічної тріщиностійкості сталі 17Г1С, що перебувала в експлуатації понад 35 років та зроблене порівняння зі сталлю у вихідному стані. Експериментально встановлено, що структурна деградація («робоче старіння») та специфіка навантаження (зміна коефіцієнта асиметрії R , частоти f циклу навантаження і зростання динамічної складової) спричиняють значне зниження порогів тріщиностійкості. Виявлено потужний синергічний ефект між низькочастотними циклами та агресивним експлуатаційним середовищем, що призводить до майже трикратного прискорення корозійно-втомного руйнування сталі порівняно з проектними режимами. Результати роботи можуть бути використані для уточнення методик прогнозування залишкового ресурсу трубопроводів в умовах змінених технологічних режимів експлуатації.

Ключові слова: трубна сталь 17Г1С, корозійно-втомне руйнування, низькочастотне навантаження, циклічна тріщиностійкість, структурна деградація, неповне завантаження ГТС, коефіцієнт асиметрії.

Вступ. Значна частина магістральних газопроводів (ГТС) експлуатується понад проектний ресурс (понад 35 років) і змушена працювати в нестационарних режимах, зокрема в умовах неповного завантаження. Це спричиняє циклічні зміни внутрішнього тиску, що є каталізатором розвитку втомних пошкоджень у трубних сталях типу 17Г1С. Тривала експлуатація викликає структурну деградацію металу («робоче старіння»), накопичення мікропошкоджень та підвищення чутливості до агресивного експлуатаційного середовища (волога, конденсат, CO_2 , H_2S , продукти корозії).

Особливу небезпеку становлять: асиметрія циклу навантаження (R): Режими неповного завантаження ГТС характеризуються асиметричними циклами з додатним середнім напруженням ($R = 0.3...0.5$), що зміщує середнє напруження в область розтягу та прискорює ріст тріщин порівняно з проектними режимами.

Одним з основних чинників, що характеризують неповне завантаження магістральних трубопроводів є частота навантаження f . Зі зменшенням частоти навантаження швидкість росту тріщини $\frac{dl}{dN}$ стабільно зростає. Це вказує на переважання часозалежних чинників деградації — корозійного впливу та впливу наводнення.

Спільна дія циклічного навантаження та агресивного середовища активізує корозійно-втомні механізми руйнування, сприяючи локалізації пластичної деформації та знижуючи опір матеріалу поширенню тріщин.

Незважаючи на значні дослідження втоми металів [1-6], комплексний вплив саме режимів неповного завантаження (низькі частоти, змінні R та корозійне середовище) на циклічну тріщиностійкість тривалоексплуатованих сталей 17Г1С залишається недостатньо систематизованим, що обмежує точність прогнозування залишкового ресурсу.

Основний матеріал. Об'єктом дослідження була низьколегована трубна сталь 17Г1С, відібрана з ділянки трубопроводу, який перебував в експлуатації понад нормативний термін служби (35+ років). Для порівняльного аналізу використовувався матеріал із нової труби тієї ж марки.

Випробування на ріст втомних тріщин проводили на сервогідравлічній машині, використовуючи стандартні компактні зразки типу СТ (Comprast Tension) відповідно до вимог ASTM E647. Використовувалися асиметричні цикли навантаження з додатним середнім напруженням ($R = 0.1-0.5$) для моделювання режимів неповного завантаження. Частота навантаження встановлювалася на рівні $f = 1.0$ Гц та $f = 0.1$ Гц (а також $f = 0.02$ Гц для аналізу впливу низьких частот), характерному для експлуатаційних коливань тиску. Частина випробувань проводили в корозійному середовищі, що імітує

експлуатаційні умови (водний розчин електроліту NS_4 з контрольованим pH та насиченням CO_2/H_2S).

Циклічна тріщиностійкість оцінювалася кінетичною діаграмою втомного руйнування (КДВР) — залежністю швидкості росту втомної тріщини dl/dN від розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK у вершині тріщини. Середньоамплітудні ділянки описувалися формулою Періса $\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^n$.

Аналіз КДВР на повітрі продемонстрував систематичне зміщення кривої для експлуатованої сталі в область вищих швидкостей росту тріщини dl/dN порівняно з неексплуатованим станом. Експлуатаційна деградація призводить до зниження порогового значення ΔK_{th} , полегшуючи зародження та початкове поширення тріщин.

Перехід до випробувань у корозійному розчині NS_4 докорінно змінив характер руйнування, виявивши синергічний ефект. Спостерігається суттєвий зсув діаграм, де швидкість росту тріщин зростає майже на порядок при ідентичних ΔK порівняно з повітрям. Експлуатована сталь виявила вищу чутливість до дії електроліту, що підтверджує гіпотезу про те, що мікродефекти експлуатованого металу слугують додатковими центрами адсорбції водню, які прискорюють корозійно-втомне руйнування.

Зі зростанням значення R (що відповідає підвищенню середнього напруження при стабільно високому тиску) спостерігається систематичне зміщення КДВР у область нижчих значень ΔK , що призводить до суттєвого зниження порогу ΔK_{th} .

В умовах неповного завантаження ГТС коефіцієнт асиметрії часто зміщується до $R = 0.3...0.5$. Для тривалоексплуатованої сталі це підсилюється відсутністю ефекту «закриття тріщини» при низьких R . Тріщина залишається відкритою протягом більшої частини циклу, забезпечуючи безперешкодний приплив свіжого електроліту та інтенсифікацію електрохімічних процесів, що критично скорочує термін безпечної експлуатації.

Виявлено чітку інверсну логарифмічну залежність швидкості росту тріщини dl/dN від частоти навантаження f . Зі зменшенням частоти

навантаження швидкість dl/dN стабільно зростає, що вказує на переважання часозалежних чинників деградації (корозійний вплив та вплив наводнення).

При зниженні частоти навантаження від 1 Гц до 0.02 Гц спостерігається майже трикратне прискорення росту тріщин. Низькочастотне навантаження ($f < 1$ Гц) є найбільш небезпечним, оскільки свіжа поверхня металу у вершині тріщини довше контактує з агресивним електролітом, прискорюючи анодне розчинення. Низькі частоти дають більше часу для дифузії атомарного водню в зону пластичної деформації. Деградована структура сталі 17Г1С містить мікродефекти-«пастки», в яких водень накопичується інтенсивніше, спричиняючи локальне окрихчення металу.

Висновки. Структурна деградація тривалоексплуатованої сталі 17Г1С зумовлює зниження порогу ΔK_{th} на 16% на повітрі, а у поєднанні з агресивним середовищем – критичне падіння опору руйнуванню на 34% (синергічний ефект). Низькочастотний характер пульсацій тиску ($f = 0.02...0.1$ Гц), притаманний нестационарним режимам, спричиняє майже трикратне прискорення росту тріщин через інтенсивне наводнювання. Перехід до нижчих коефіцієнтів асиметрії циклу ($R = 0.3...0.5$), характерний для неповного завантаження ГТС, сприяє інтенсифікації корозійно-втомного розтріскування через відсутність ефекту «закриття тріщини» та безперешкодний доступ середовища до ювенільного металу.

Операторам ГТС рекомендується переглянути критичні межі допустимих коливань тиску для ділянок, що працюють у недовантажених режимах, оскільки чинні нормативи можуть не враховувати суттєве зниження порогу ΔK_{th} для сталей тривалої експлуатації. Необхідно інтегрувати в системи діагностики датчики високої точності для фіксації низькочастотних пульсацій, що дозволить ідентифікувати зони ризику, де частота та амплітуда циклів сприяють інтенсивній корозійній втомі.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Vira V., Krechkovska H., Kulyk V., Duriagina Z., Student O., Vasylyv B., Cherkes V., Loskutova T. Peculiarities of fatigue crack growth in steel 17H1S after long-term operations on a gas pipeline. Materials. 2023. Vol. 16, № 8. 2964. DOI: 10.3390/ma16082964.

2. Zvirko O., Gabetta G., Tsyurulnyk O., Kret N. Assessment of in-service degradation of gas pipeline steel taking into account susceptibility to stress corrosion cracking. *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 16. P. 121–125. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.07.030.
3. Nykyforchyn H., Krechkovska H., Student O., Zvirko O. Feature of stress corrosion cracking of degraded gas pipeline steels. *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 16. P. 153–160. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.07.035.
4. Fatigue crack growth rate parametric study on subsea X65 pipeline steel girth welds in H_2S/CO_2 environments. *International Journal of Fatigue*. 2022. Vol. 163. 107078. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107078.
5. Igwemezie V., Mehmanparast A., Brennan F. The role of microstructure in the corrosion-fatigue crack growth behaviour in structural steels. *Materials Science and Engineering A*. 2021. Vol. 803. 140470. DOI: 10.1016/j.msea.2020.140470.
6. Roccisano A., Nafisi S., Ghomashchi R. Stress corrosion cracking observed in ex-service gas pipelines: A comprehensive study. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2020. Vol. 51. P. 167–188. DOI: 10.1007/s11661-019-05496-3.

CRITICAL FACTORS OF CORROSION-FATIGUE DEGRADATION OF 17G1S STEEL OF MAIN GAS PIPES UNDER CONDITIONS OF INCOMPLETE LOAD OF THE GTS

D.Yu. Petryna, A.T. Gleb

Abstract. *The results of the study of the influence of non-stationary modes of incomplete loading of main gas pipelines on the critical indicators of cyclic crack resistance of 17G1S steel, which has been in operation for over 35 years, are presented and a comparison is made with the steel in the initial state. It was experimentally established that structural degradation ("working aging") and the specifics of the load (change in the asymmetry coefficient R , frequency f of the load cycle and increase in the dynamic component) cause a significant decrease in the crack resistance thresholds. A powerful synergistic effect between low-frequency cycles and an aggressive operating environment has been revealed, which leads to an almost threefold acceleration of corrosion-fatigue destruction of steel compared to the design modes. The results of the work can be used to refine the methods for predicting the residual resource of pipelines under conditions of changed technological operating modes.*

Keywords: *17G1S pipe steel, corrosion fatigue fracture, low-frequency loading, cyclic crack resistance, structural degradation, incomplete loading of the GTS, asymmetry coefficient.*

FEATURES OF DYNAMIC STRAIN AGING DEVELOPMENT IN CARBON STEEL DURING REVERSE LOADING

Plitchenko S.O.¹ [ORCID], Vakulenko I.O.² [ORCID], Kalinina T.V.³ [ORCID]

¹*Ukrainian State University of Science and Technologies, Candidate of technical sciences, docent, Ukraine*

²*Dniprovsky State Technical University, doctor of technical sciences, Professor, Ukraine*

³*Dniprovsky State Technical University, candidate of technical sciences, Docent, Ukraine*

Abstract. *The study evaluates the possibility of increasing the ductility of cold-drawn carbon steel by utilizing controlled dynamic strain aging (DSA) processes under alternating deformation. It was found that a change in the deformation sign (compression-tension) leads to a shift in the onset of flow stress serrations toward higher strain levels compared to unidirectional tension. Based on the analysis of the stress of unrevised motion of dislocations and the strain hardening coefficient, it is shown that the suppression of DSA during reverse loading is caused by a disruption in the kinetic relationship between the dislocation waiting time and the duration of their free motion. An optimal temperature range for alternating bending (250–275 °C) was identified, which ensures the realization of kinetic conditions for stabilizing DSA processes to enhance the plasticity of high-carbon wire without compromising its strength properties. It is proved that heating above 275 °C violates this condition, leading to the degradation of mechanical properties. The practical value lies in justifying the necessity of forced cooling of the metal after deformation.*

Keywords: *carbon steel, dynamic strain aging (DSA), dislocation, temperature, strain hardening, plasticization.*

Introduction

Modern technological development leads to a steady increase in requirements for metallic materials, especially those operating under complex thermo-mechanical conditions. Since most engineering components are manufactured using plastic deformation methods, the operational characteristics of such structures are directly determined by structural changes in the metal during its processing. A key process in this context is strain hardening, which reflects the material's ability to resist further deformation.

However, under certain temperature and strain rate parameters, this process becomes unstable, manifesting as non-monotonic stress drops or serrations on loading diagrams [1]. This phenomenon, known in the literature as dynamic strain aging (DSA) or the Portevin–Le Chatelier effect, arises from the specific interaction of dissolved impurity atoms with mobile dislocations [2, 3]. Since intermittent plastic flow can significantly limit the use of alloys in the production of critical components, a thorough analysis of DSA mechanisms is necessary [4, 5]. The development of methods to control metal properties under alternating loading is of particular relevance, as it allows for the mitigation of the negative effects of unstable deformation.

Methods and Data Processing

The objects of the study were carbon steels with a carbon content of 0.1–0.5 % C, as well as industrial high-carbon wire with a diameter of 3 mm and a content of 0.78 % C. To form the initial structural state meeting the requirements of hardware production, the billets were subjected to austenitization followed by isothermal transformation at a temperature of 550 °C, which ensured the production of a fine pearlitic structure. Subsequent cold drawing was performed on industrial machines with a total reduction degree of 78 %.

The experimental procedure involved alternating bending of the specimens in a four-roll device within the temperature range of 225–300 °C at a strain rate of 1 s^{-1} . To distinguish between the effects of dynamic and static strain aging, the metal was subjected to forced air cooling after the deformation. Mechanical properties were determined by tensile testing on an Instron machine at a rate of 10^{-3} s^{-1} . Analysis of true stress-strain curves allowed for the calculation of the stress of irreversible motion of dislocations (σ_0), the strain hardening exponent (m), and the critical strain for the onset of stress serrations (ε_c).

The test results showed that alternating deformation significantly changes the nature of plastic flow compared to unidirectional tension. In particular, a shift in the onset of the first flow stress serrations (ε_c) toward higher strains was established.

Based on the analysis of the parameter σ_0 , it was found that the change in the loading sign causes a decrease in the density of mobile dislocations due to their

intensive recombination. According to the kinetic model of the process, such a reduction in defect density leads to a shortening of the dislocation waiting time at barriers (τ_0), which disrupts their interaction with impurity atom atmospheres.

The industrial drawing of steel billets is inevitably accompanied by intensive heat generation, where the deformation temperature increases proportionally to the degree of reduction. This creates conditions for the uncontrolled development of aging processes — both dynamic (DSA) occurring directly during deformation and static (SSA) after coiling the wire into bundles — which significantly alters the property profile of the finished metal. With an increase in the degree of cold deformation, the intensive accumulation of crystal lattice defects and the difficulty of internal stress relaxation lead to an increase in strength alongside a simultaneous increase in the brittleness of the steel. To minimize these negative consequences, it is advisable to employ alternating bending, by introducing dislocations of opposite signs, this method allows for the optimization of their total density and spatial arrangement within the structure through recombination processes.

Analysis of the mechanical behavior of cold-drawn metal during heating revealed that at temperatures up to 250 °C, an initial decrease in strength due to softening is observed, followed by its increase resulting from the activation of static aging. In turn, the ductility of the metal begins to significantly degrade once the 250 °C threshold is exceeded. It has been experimentally proven that alternating bending at room temperature only slightly increases ductility, whereas proportional heating of the deformation zone to 250–275 °C provides a unique effect of synchronous increase in both the plastic and strength characteristics of the wire. However, a further temperature rise leads to a disruption of the kinetic conditions for the interaction between dislocations and impurity atoms, accompanied by a sharp decline in the entire complex of the steel's mechanical properties.

Conclusions

In the temperature range of 225–300 °C, alternating deformation shifts the onset of dynamic strain aging toward higher strain levels compared to unidirectional loading.

The suppression of DSA under reverse loading is caused by the disruption of the kinetic relationship between the dislocation waiting time at barriers and the duration of their free path due to changes in defect density.

The optimal plasticization regime for high-carbon wire has been determined: alternating bending at 250–275 °C followed by forced cooling to prevent static embrittlement.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Vakulenko, I.A., & Bol'shakov V.I. (2008). Morfologiya struktury i deformatsionnoye uprochneniye stali [Structure morphology and strain hardening of steel]. Dnepropetrovsk: Makovetskiy Yu.V. [in Russian].
2. Kabirian, F., Khan, A. S., & Gnäupel-Herold, T. (2016). Plastic deformation behavior of a thermo-mechanically processed AZ31 magnesium alloy under a wide range of temperature and strain rate. Journal of Alloys and Compounds, 673, 327–335. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.02.145>
3. Fang, Z., Wang, L., Yu, F., He, Y., & Wang, Z. (2024). Mechanism of fatigue-life extension due to dynamic strain aging in low-carbon steel at high temperature. Materials, 17(18), 4660. <https://doi.org/10.3390/ma17184660>
4. Kohandehghan, A. R., Sadeghi, A. R., & Serajzadeh, S. (2010). Investigation into dynamic strain aging behaviour in high carbon steel. Ironmaking & Steelmaking, 37(2), 155–160. <https://doi.org/10.1179/174328109X461400>
5. Chen, P. C., Peng, T. T., Chan, Y. C., Chen, J. M., & Chang, C. P. (2023). The effect of deformation temperature on the deformation mechanism of a medium-Mn advanced high-strength steel (AHSS). Crystals, 13(2), 328. <https://doi.org/10.3390/cryst13020328>

ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ ДИНАМІЧНОГО ДЕФОРМАЦІЙНОГО СТАРІННЯ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ ПРИ ЗНАКОЗМІННОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Сергій Плітченко, Ігор Вакуленко, Тетяна Калініна

Анотація. У роботі оцінено можливість підвищення пластичності холоднотягнутої вуглецевої сталі шляхом використання керованих процесів динамічного деформаційного старіння (ДДС) при знакозмінній деформації. Встановлено, що зміна знаку деформації (стиснення–розтягання) призводить до зміщення моменту появи серрацій деформуючого напруження у бік більших ступенів деформації порівняно з односпрямованим розтяганням. На основі аналізу напруження необерненого руху дислокацій та коефіцієнта деформаційного зміцнення показано, що пригнічення ДДС зумовлене порушенням кінетичного співвідношення між часом очікування дислокацій та часом їх вільного пробігу. Виявлено оптимальний температурний інтервал знакозмінного згину

(250–275 °C), який забезпечує реалізацію кінетичних умов стабілізації процесів ДДС для підвищення пластичності високо вуглецевого дроту без зниження міцності. Доведено, що при нагріві понад 275 °C вказана умова порушується, що призводить до деградації механічних властивостей. Практична цінність полягає в обґрунтуванні необхідності примусового охолодження металу після деформації.

Ключові слова: *вуглецева сталь, динамічне деформаційне старіння (ДДС), дислокація, температура, деформаційне зміцнення, пластифікація.*

ПІДБІР ЖОРСТКОСТІ КОРОБУ ГРОХОТА З ВИКОРИСТАННЯМ ФЕМ ДЛЯ УНИКНЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ РЕЖИМІВ

Пополов Д.В.¹ [ORCID], Засельський І.В.² [ORCID]

¹Державний університет економіки і технологій, д.т.н., доцент, Україна

²Державний університет економіки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

Анотація. У роботі розглянуто питання підбору жорсткісних характеристик коробу вібраційного грохота з використанням методу кінцевих елементів. Проведено модальний аналіз металоконструкції коробу грохота з визначенням власних частот та форм коливань, що дозволило виявити небезпечні зони, пов'язані з виникненням локальних резонансів. Встановлено, що недостатня жорсткість окремих елементів конструкції коробу грохота призводить до підвищених напружень і зниження надійності болтових з'єднань. Запропоновано конструктивні заходи щодо зміни спектра власних частот робочого органу грохота, зокрема введення додаткових балок жорсткості та зміна схеми їх розташування. Виконано порівняльний аналіз запропонованих технічних рішень, що дозволило обґрунтувати раціональну конструкцію у вигляді перехресного підсилення коробу. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні та модернізації грохотів для підвищення їх надійності та енергоефективності.

Ключові слова: вібраційний грохот, власна частота, локальний резонанс, жорсткість, надійність, короб.

Вібраційні грохоти є ключовим обладнанням у процесах класифікації сипких матеріалів у гірничо-металургійній, будівельній та хімічній промисловості [1]. Надійність їх роботи значною мірою визначається жорсткістю несучої конструкції коробу грохота, де недостатня жорсткість призводить до появи додаткових деформацій, розбалансування системи та зниження ресурсу елементів.

Особливо небезпечним є збіг власних частот конструкції коробу грохота з частотою його збудження, що призводить до виникнення резонансних режимів [2, 3]. У таких умовах різко зростають амплітуди коливань, що викликає інтенсивне накопичення пошкоджень та руйнування самої конструкції робочого органу грохота.

У зв'язку з цим актуальним є застосування сучасних чисельних методів, зокрема методу кінцевих елементів (FEM), для дослідження динамічних характеристик грохотів і обґрунтованого підбору жорсткості їх несучих конструкцій [4, 5].

Таким чином, метою роботи є визначення раціональних параметрів жорсткості коробу грохота на основі кінцевоелементного модального аналізу для уникнення резонансних режимів його роботи.

Дослідження виконувалось з використанням тривимірної кінцевоелементної моделі коробу грохоту ГСТ-62ШМ [4], яка була побудована з урахуванням реальної геометрії та конструктивних особливостей об'єкта. Модель включала основні несучі елементи конструкції робочого органу грохота, зокрема бортовини, балки, а також вузли кріплення мотор-вібраторів і місця встановлення з'єднувальних елементів. При побудові моделі враховано фізико-механічні властивості матеріалу, граничні умови закріплення та характер прикладення динамічних навантажень.

Дискретизація конструкції грохота, що розглядається, здійснювалася із застосуванням об'ємних та оболонкових кінцевих елементів із забезпеченням достатньої щільності сітки в зонах очікуваної концентрації напружень. Для підвищення точності розрахунків виконано перевірку збіжності результатів при уточненні сітки.

В межах проведених досліджень для робочого органу грохота ГСТ-62ШМ було виконано:

- модальний аналіз для визначення спектра власних частот і відповідних форм коливань конструкції, ідентифікації потенційно небезпечних режимів роботи, пов'язаних з можливим виникненням резонансу;
- аналіз напружено-деформованого стану, в ході якого визначено розподіл переміщень, деформацій та еквівалентних напружень у характерних перерізах конструкції при дії експлуатаційних навантажень;
- варіаційні розрахунки, що передбачали зміну жорсткісних характеристик конструкції шляхом варіювання геометричних параметрів конструктивних елементів та введення додаткових підсилюючих елементів для оцінки чутливості спектра власних частот до змін жорсткості та обґрунтування раціональних конструктивних рішень.

Результати модального аналізу (рис. 1) показали, що власні частоти окремих елементів металоконструкції коробу грохота знаходяться у діапазоні робочих частот збудження. Зокрема, частоти нижчих форм коливань наближені до частоти обертання дебалансного приводу, що створює передумови для динамічного підсилення коливань. Це свідчить про наявність сприятливих умов для виникнення локальних резонансів, які можуть проявлятися у вигляді значного зростання амплітуд переміщень окремих елементів конструкції.

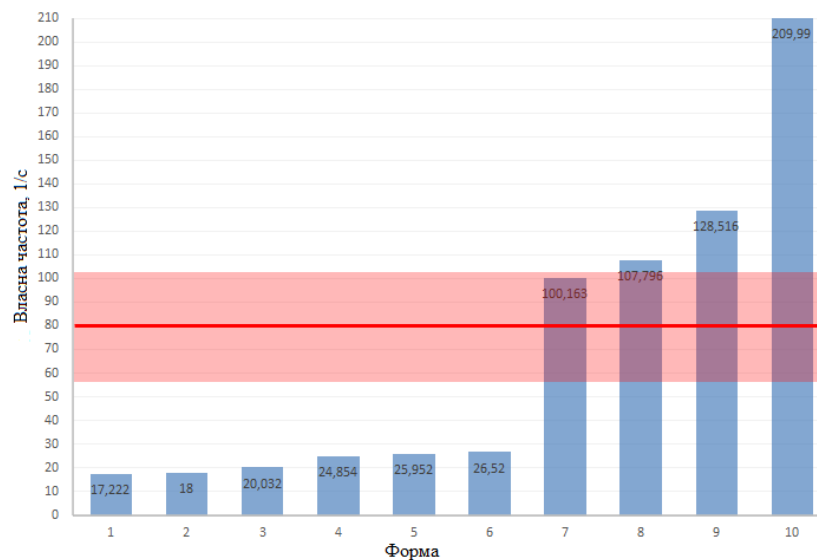


Рисунок 1 – Спектр власних частот металоконструкції коробу грохота

Аналіз форм коливань показав наявність значних деформацій у бортовинах, що супроводжується концентрацією напружень у зонах кріплення (рис. 2).

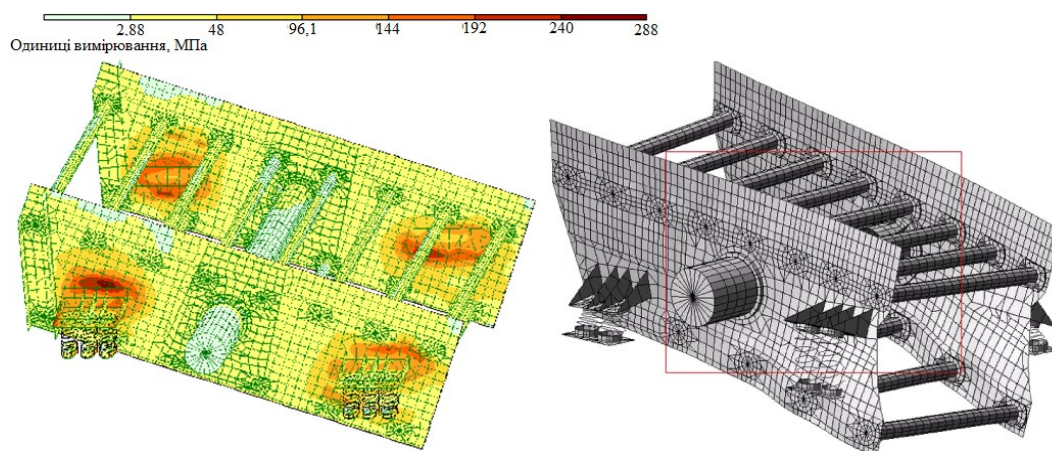


Рисунок 2 – Розподіл еквівалентних напружень у металоконструкції коробу

Для зміщення спектра власних частот було розглянуто ряд конструктивних варіантів підсилення металоконструкції коробу грохота. Зокрема, досліджувалися рішення, пов'язані з збільшенням локальної та загальної жорсткості шляхом введення додаткових елементів жорсткості, зміни їх геометричних параметрів та схеми розташування. Аналіз виконувався на основі серії варіаційних розрахунків із використанням кінцеелементної моделі (рис. 3, 4).

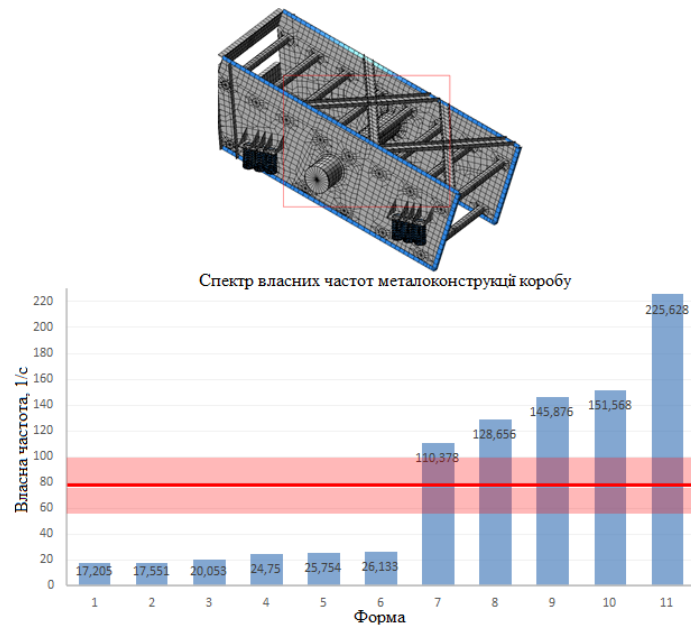


Рисунок 3 – Схема підсилення коробу грохота з перехресним розташуванням балок у верхньому поясі

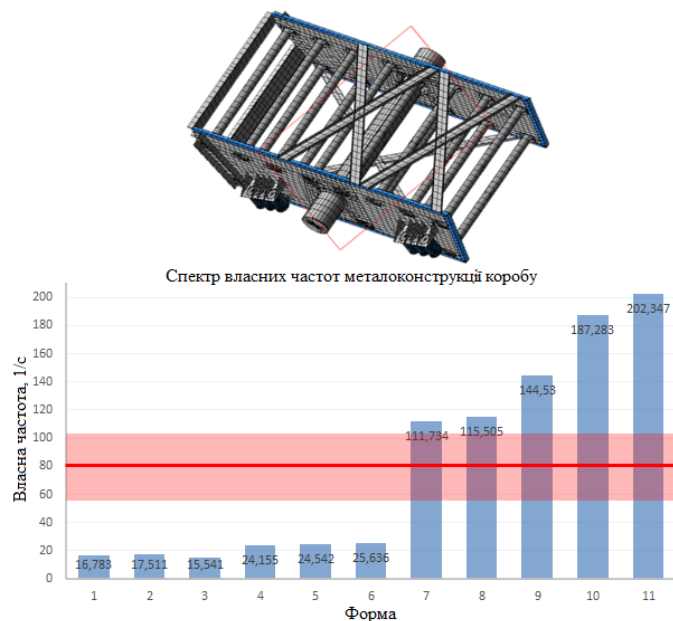


Рисунок 4 – Схема підсилення коробу грохота з перехресним розташуванням балок у верхньому та нижньому поясі

У результаті порівняльного аналізу встановлено, що найбільш ефективним є варіант встановлення додаткових балок із хрестоподібним розташуванням у верхній та нижній площині короба. Така схема забезпечує більш рівномірний розподіл жорсткості по конструкції, зменшує локальні деформації та підвищує просторову жорсткість системи.

Висновки

В результаті проведених досліджень встановлено, що недостатня жорсткість металоконструкції коробу грохота є одним з ключових факторів, який зумовлює появу небажаних резонансних режимів у процесі його експлуатації. Такі явища призводять до підвищених динамічних навантажень, прискореного накопичення втомних пошкоджень елементів конструкції його робочого органу та зниження загальної надійності обладнання. Показано, що застосування методу скінченних елементів (FEM) є ефективним інструментом для детального аналізу динамічної поведінки конструкції коробу грохота, зокрема для визначення власних частот і форм коливань окремих елементів та системи в цілому. Використання чисельного моделювання дозволило виявити небезпечні частотні діапазони, у яких можливе виникнення резонансу, та оцінити вплив конструктивних змін на динамічні характеристики грохоту. На основі проведеного аналізу запропоновано раціональну схему підсилення конструкції короба грохота, спрямовану на підвищення його просторової жорсткості та віддалення власних частот від робочого діапазону збудження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Удосконалення обладнання та процесів вуглепідготовки і коксортування металургійного виробництва: монографія / В. Й. Засельський, Д. В. Пополов та ін. Кривий Ріг: Літерія, 2019. 203 с.
2. S. Rao S. Mechanical vibrations. 5th ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2011. 1083 p.
3. J. Inman D. Engineering vibration. 4th ed. London : Pearson Education, 2014. 711 p.
4. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. The finite element method: its basis and fundamentals. 6th ed. Burlington : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. 802 p.
5. Bathe K.-J. Finite element procedures. New Jersey : Prentice Hall, 1996. 1029 p.

SELECTION OF SCREEN BOX STIFFNESS USING FEM TO AVOID RESONANT MODES

Dmytro Popolov, Ihor Zaselskyi

Abstract. *The paper addresses the problem of selecting the stiffness characteristics of a vibrating screen box using the finite element method (FEM). A modal analysis of the screen box metal structure was carried out to determine natural frequencies and mode shapes, which made it possible to identify critical zones associated with local resonance occurrence. It was established that insufficient stiffness of individual structural elements of the screen box leads to increased stresses and reduced reliability of bolted joints. Structural measures aimed at modifying the natural frequency spectrum of the screen working body are proposed, including the introduction of additional stiffening beams and changes in their arrangement. A comparative analysis of the proposed technical solutions was performed, which made it possible to substantiate a rational design in the form of cross-bracing of the screen box. The obtained results can be used in the design and modernization of vibrating screens to improve their reliability and energy efficiency.*

Keywords: *vibrating screen, natural frequency, local resonance, stiffness, reliability, screen box.*

REFERENCE

1. Udoskonalennia obladnannia ta protsesiv vuhlepidhotovky i koksosortuvannia metalurhiinoho vyrobnytstva: monohrafiia / V. Y. Zaselskyi, D. V. Popolov ta in. Kryvyi Rih: Literiia, 2019. 203 s. [in Ukrainian]
2. S. Rao S. Mechanical vibrations. 5th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2011. 1083 p.
3. J. Inman D. Engineering vibration. 4th ed. London: Pearson Education, 2014. 711 p.
4. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. The finite element method: its basis and fundamentals. 6th ed. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. 802 p.
5. Bathe K.-J. Finite element procedures. New Jersey : Prentice Hall, 1996. 1029 p.

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МІКРОСТРУКТУРИ НІКЕЛЕВИХ СУПЕРСПЛАВІВ
ABD900 ТА INCONEL 718, ВИГОТОВЛЕНИХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО
ПЛАВЛЕННЯ В ПОРОШКОВОМУ ШАРІ**

Аджамський С.В.¹, Кононенко Г.А.² [ORCID],

Подольський Р.В.³ [ORCID], Подольська О.А.⁴

¹ТОВ «АЛТ України», ІТСТ НАН України, докт. філ., Україна

²ТОВ «АЛТ України», ІЧМ НАН України, НТУ «Дніпровська Політехніка»

докт. техн. наук., ст. досл., Україна

³ТОВ «АЛТ України», ІЧМ НАН України, ІПСУ НАН України, докт. філ., Україна

⁴ІЧМ НАН України, науковий співробітник, Україна

Анотація. Технологія лазерного плавлення в порошковому шарі (LPBF) є одним із найбільш перспективних методів адитивного виробництва металевих деталей складної геометрії, що дозволяє отримувати вироби з високими механічними та експлуатаційними властивостями. У роботі проведено порівняльне дослідження особливостей формування пористості в жароміцних нікелевих суперсплавах ABD900 та Inconel 718, виготовлених методом LPBF за однакових технологічних параметрів. Дослідні зразки розміром 10×10×10 мм були виготовлені при потужності лазера 195 Вт, швидкості сканування 1100 мм/с, відстані між треками 0,09 мм та товщині шару 40 мкм. Металографічні дослідження виконано на оптичному мікроскопі з подальшою кількісною оцінкою пористості із застосуванням програмного забезпечення ImageJ. Встановлено, що зразки зі сплаву ABD900 характеризуються меншою кількістю пор порівняно зі сплавом Inconel 718. Розміри пор у зразках Inconel 718 знаходяться в діапазоні 2-10 мкм, при максимальних значеннях до 12-14 мкм, тоді як у сплаві ABD900 вони становлять переважно 2-12 мкм без виявлення більших поодиноких дефектів.

Ключові слова: LPBF-технологія; адитивне виробництво; нікелеві суперсплави; ABD900; Inconel 718; пористість.

Лазерне плавлення в порошковому шарі (LPBF) це сучасний метод пошарового нарощування деталей складної геометричної форми, що дозволяє оминати складні операції виготовлення, такі як механічна обробка на верстатах, виплавка деталі по восковим фігурам та ін. Наразі деталі виготовленні за LPBF демонструють високий рівень механічних та

експлуатаційних властивостей, що відкриває можливості до швидкого виготовлення унікальних технологічних рішень представлених в геометрії. Враховуючі дані особливості технології LPBF вони добре зарекомендували себе в умовах виробництва для машинобудування, авіаційно-космічної, медичної та енергетичної галузі.

Розглядаючи тенденції в області LPBF – технологій та матеріали, що наразі використовують для виготовлення деталей, то матеріали, що застосовуються доволі відомі в області традиційних технологій, що комерційно впроваджуються в дану галузь LPBF. Але слід зазначити, що виготовлення деталей з цих доволі відомих сплавів першочергово не мали за мету застосування в області LPBF через що при відпрацюванні технологічних параметрів використовували карти виробництва, що представляють залежність впливу технологічності параметрів на формування дефектів під час друку. Ці технологічні параметри з врахуванням широких можливостей LPBF – технології в більшості випадків мають обмеження особливо це стосується нікелевих багатокомпонентних суперсплавів.

Однак наразі асортимент нікелевих суперсплавів, що є комерційно вигідними для АТ, обмежений кількома ключовими сплавами, такими як Inconel 718, Haynes 282 та ін. Враховуючи вищезазначене, дослідники [1-2] високу увагу приділяють розробці нових сплавів таких, як сплав ABD900. Даний сплав був розроблений новим інноваційним підходом Alloy By Design, що є значним проривом, так як сплав ABD900 було спеціально розроблено для LPBF.

Сплав ABD900 володіє, так званою, властивістю «покращеної друкованості», як згадується в деяких роботах [2]. Це пояснюється високим діапазоном технологічних параметрів, при яких вирощування деталей різного перерізу досягає рівня відносної щільності більше 99,0%. Таким чином в даній роботі буде проведено порівняльний аналіз сплаву ABD900 в порівнянні зі сплавом Inconel 718.

В рамках роботи було виготовлено два дослідних зразка розмірами 10x10 x10 мм з ідентичними технологічними параметрами: потужність - 195 Вт, швидкість сканування - 1100 мм/с, відстань між треками - 0,09 мм, номінальна

товщина шару – 40 мкм, питома щільність енергії – 49,2 Дж/мм³. Дослідні зразки були виготовлені з жароміцного сплаву ABD900 та Inconel 718, з діапазоном розмірів частинок 25±15 мкм. Металографічні дослідження були виконанні на попередньо механічно підготовлених зразках. Дослідження виконувалось на оптичному світловому мікроскопі Axiovert 200 M MAT в світлопольному режимі освітлення. Пористість в зразках вимірювались з застосуванням програмного забезпечення ImageJ з використанням вбудованої функції «Аналіз частинок». Під час досліджень елементи розміром менше 2 мкм відфільтровувались для запобігання впливу потенційних дефектів, що сформувались в процесі підготовки зразків, на результат оцінки пористості.

Металографічний аналіз показав, що за однакових технологічних параметрів виготовлення кількість виявлених пор у зразках зі сплаву Inconel 718 є більшою порівняно зі зразками, виготовленими зі сплаву ABD900. Проведений аналіз (рис. 1) показав, що у зразках зі сплаву Inconel 718 спостерігаються пори розміром у діапазоні 2-10 мкм, тоді як максимальний розмір поодиноких пор становить 12-14 мкм.

Водночас у дослідних зразках зі сплаву ABD900 виявлено загалом меншу кількість пор. Їх розміри переважно знаходяться в діапазоні 2-12 мкм, при цьому поодиноких пор більшого розміру, ніж у зразках зі сплаву Inconel 718, не зафіксовано.

Загалом проведений порівняльний аналіз показав, що отримані результати узгоджуються з повідомленнями інших авторів щодо підвищеної технологічної придатності сплаву ABD900 [2-3]. Варто зазначити, що у більшості робіт цей термін пов'язується передусім зі схильністю матеріалу до тріщиноутворення. Проте отримані результати свідчать про те, що поняття технологічної придатності, ймовірно, також може бути пов'язане з особливостями пороутворення під час адитивного виготовлення.

Порівняльне дослідження відносної щільності дослідних зразків, виготовлених з різних матеріалів із застосуванням раціональних технологічних параметрів, показало, що їх відносна щільність досягає рівня близько 99,8%.

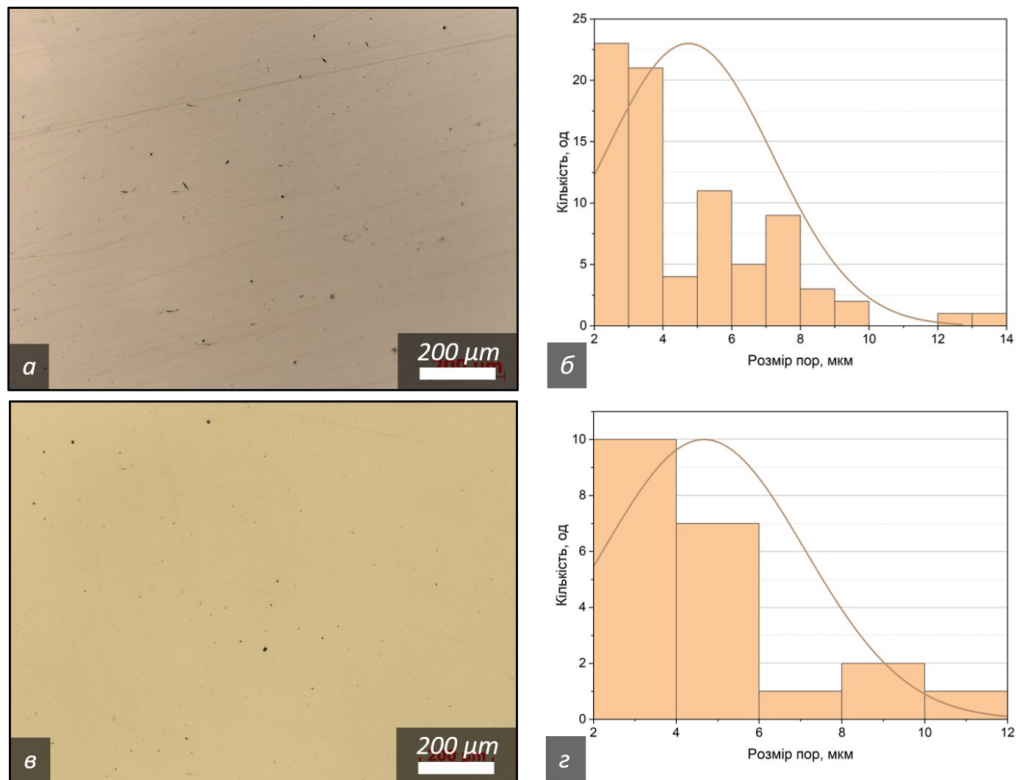


Рисунок 1 – Аналіз в полірованому стані дослідного зразка виготовленого з Inconel 718 (а) та ABD900 (в), кількісна оцінка Inconel 718 (б) та ABD900 (г)

Таким чином, отримані результати можуть слугувати основою для подальшого дослідження закономірностей формування дефектної структури та вдосконалення режимів LPBF-технології жароміцних нікелевих суперсплавів.

Висновки

1. Встановлено, що за однакових технологічних параметрів LPBF-технології дослідні зразки зі сплаву ABD900 характеризуються меншою кількістю пор порівняно зі зразками зі сплаву Inconel 718, при цьому розміри виявлених пор знаходяться переважно в діапазоні 2-12 мкм.

2. Показано, що при застосуванні раціональних технологічних параметрів LPBF-технології для обох досліджених сплавів забезпечується формування високощільної структури з відносною щільністю близько 99,8%, що підтверджує перспективність використання сплаву ABD900 для адитивного виробництва.

ЖИТЕПАТҮПА / REFERENCE

1. Reed R.C., Tao T., Warnken N. Alloys-By-Design: Application to nickel-based single crystal superalloys. Acta Materialia. 2009. 57, 19, 5898-5913. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.08.018>
2. Tang Y.T., Panwisawas C., Ghousoub J. N., Gong Y., Clark J. W.G, Németh A. A.N., McCartney D. G., Reed R. C. Alloys-by-design: Application to new superalloys for additive manufacturing. Acta Materialia. 2021. 202, 417-436. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.09.023>
3. Bridges, A., Shingledecker, J. Creep Deformation and Damage Mechanisms in an Advanced High-Temperature Additively Manufactured Nickel-Base Superalloy. JOM. 2025. 77, 7200–7221. <https://doi.org/10.1007/s11837-025-07326-x>

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE MICROSTRUCTURE OF NICKEL-BASED SUPERALLOYS ABD900 AND INCONEL 718 FABRICATED BY LASER POWDER BED FUSION

S.V. Adjamsky, G.A. Kononenko, R.V. Podolskyi, O.A. Podolska

Abstract. *Laser Powder Bed Fusion (LPBF) is one of the most promising additive manufacturing technologies for producing metal components with complex geometries, enabling the fabrication of parts with high mechanical and operational performance. In this study, a comparative investigation of porosity formation in high-temperature nickel-based superalloys ABD900 and Inconel 718 fabricated by LPBF under identical processing parameters was carried out. Cubic samples with dimensions of $10 \times 10 \times 10$ mm were produced using a laser power of 195 W, a scanning speed of 1100 mm/s, a hatch spacing of 0.09 mm, and a layer thickness of 40 μm . Metallographic analysis was performed using optical microscopy, followed by quantitative porosity evaluation using ImageJ software. It was found that the ABD900 alloy samples exhibit a lower porosity level compared to Inconel 718. The pore sizes in Inconel 718 samples range from 2 to 10 μm , with maximum values reaching 12–14 μm , whereas in ABD900 they are predominantly within the range of 2–12 μm , with no larger isolated defects observed.*

Keywords: *LPBF technology; additive manufacturing; nickel-based superalloys; ABD900; Inconel 718; porosity.*

ЗАСТОСУВАННЯ ПОПРАВОЧНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ ДО АМПЛІТУДИ СИГНАЛІВ ВІД ВІДБИВАЧІВ У МІРАХ ДЕФЕКТІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Сазонов П.О.¹ [ORCID], Клименко С.В.² [ORCID]

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, аспірант, Україна

²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,

к.т.н., доцент, Україна

Анотація. Ультразвуковий неруйнівний контроль широко застосовується для оцінювання технічного стану відповідальних конструкцій, при цьому амплітудний метод залишається основним підходом до визначення розмірів дефектів. Водночас суттєвою проблемою цього методу є низька відтворюваність амплітуд сигналів від номінально однакових відбивачів у калібрувальних та контрольних зразках, що може призводити до відхилень на рівні 4 – 10 дБ і значних похибок у визначенні розмірів дефектів. У роботі запропоновано аналітичний підхід до компенсації цих розбіжностей шляхом введення поправочного коефіцієнта, заснованого на порівнянні амплітуд сигналів від пласкодонного отвору та умовно нескінченної поверхні. Модель сформульована на основі рівнянь акустичного тракту для дальньої зони з урахуванням геометричних параметрів перетворювача та відбивача, частоти ультразвуку і швидкості його поширення. Проведено оцінювання невизначеності відповідно до підходів GUM. Показано, що застосування запропонованої поправки дозволяє зменшити розкид амплітуд до рівня 1 – 1,3 дБ, що суттєво підвищує відтворюваність та достовірність результатів контролю. Отримані результати можуть бути використані у процедурах калібрування, метрологічної атестації та в цифрових системах ультразвукового контролю.

Ключові слова: ультразвуковий контроль (УЗК), неруйнівний контроль (НК), амплітудний метод, пласкодонний отвір, калібрувальні зразки, контрольні зразки, поправка, невизначеність.

Ультразвуковий неруйнівний контроль є одним із ключових методів діагностики технічного стану відповідальних конструкцій у промисловості. Одним із найбільш поширених підходів до оцінювання розмірів дефектів залишається амплітудний метод, який базується на порівнянні амплітуди сигналу від дефекту з сигналом від еталонних відбивачів у калібрувальних або контрольних зразках [1].

Попри свою простоту, цей метод має суттєві метрологічні обмеження. Практика калібрування та перевірки показує, що амплітуди сигналів від номінально однакових пласкодонних отворів (FBH) можуть відрізнятися на 4–10 дБ навіть за дотримання геометричних і технологічних вимог [2]. Така розбіжність є критичною, оскільки призводить до кратних похибок при визначенні площі відбивача і, відповідно, розміру дефекту [3].

Основними причинами є акустична неоднорідність матеріалів, мікрогеометрія поверхні відбивача, хвильові ефекти, варіації параметрів п'єзоперетворювача та загасання ультразвуку. У сукупності ці фактори обумовлюють низьку відтворюваність амплітудних параметрів.

Метою роботи є розроблення аналітичного підходу до компенсації зазначених розбіжностей шляхом введення поправочного коефіцієнта, заснованого на порівнянні сигналів від дискового відбивача та умовно нескінченної поверхні.

Запропонований далі підхід базується на аналізі рівнянь акустичного тракту у дальній зоні для круглого п'єзоперетворювача [4].

Амплітуда сигналу, відбитого від умовно нескінченної поверхні, а також для пласкодонного отвору описуються відповідними залежностями. Для врахування загасання використовується експоненційний множник. Теоретичне відхилення амплітуд визначається як різниця між сигналами від умовно нескінченної поверхні та ідеального відбивача. Поправочний коефіцієнт визначається як різниця між експериментально отриманим та теоретичним значеннями цього відхилення. Для практичного застосування модель представлена через параметри перетворювача та відбивача (діаметри, частота, швидкість ультразвуку).

Оцінювання невизначеності виконано відповідно до підходів GUM та EA [5-6]. Комбінована стандартна невизначеність визначається як сума внесків типів A і B, а розширена невизначеність — при коефіцієнті охоплення $k = 2$.

Показано, що амплітуда сигналу від умовно нескінченної поверхні (донного сигналу) характеризується високою відтворюваністю — відхилення не перевищують 0,5 дБ для однакових

матеріалів. На цьому фоні варіації сигналів від пласкодонних отворів досягають 4 – 10 дБ.

Застосування запропонованої поправки дозволяє суттєво зменшити розкид амплітуд до рівня приблизно 1 – 1,3 дБ. Це забезпечує підвищення відтворюваності результатів контролю, зниження ймовірності помилок оцінювання розмірів дефектів а також покращення узгодженості результатів між різними зразками та етапами контролю.

Окрім цього, застосування поправки дозволяє знизити вимоги до точності виготовлення калібрувальних і контрольних зразків, що має суттєвий економічний ефект.

Отримані результати також підтверджують можливість інтеграції запропонованого підходу у програмне забезпечення сучасних ультразвукових дефектоскопів для автоматичного коригування амплітуд.

Висновки

Запропоновано аналітичну модель поправочного коефіцієнта для амплітудного методу ультразвукового неруйнівного контролю, яка базується на співвідношенні сигналів від пласкодонного відбивача та умовно нескінченної поверхні.

Показано, що запропонований підхід дозволяє компенсувати неконтрольовані фактори, які спричиняють значні розбіжності амплітуд, та зменшити їх до рівня 1 – 1,3 дБ. Проведений аналіз невизначеності підтверджує метрологічну обґрунтованість моделі.

Запропонована поправка може бути використана у процедурах калібрування, метрологічної атестації та в алгоритмах цифрової обробки сигналів. Її застосування сприяє підвищенню точності, стабільності та відтворюваності результатів УЗНК.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення моделі для складних типів відбивачів і анізотропних матеріалів, а також на експериментальну валідацію у широкому діапазоні умов контролю.

ЛІТЕРАТУРА

1. ISO 5577:2017 Non-destructive testing — Ultrasonic testing — Vocabulary <https://www.iso.org/standard/63662.html>
2. Сазонов П.О., Клименко С.В. Підвищення ефективності ультразвукового неруйнівного контролю складних технічних об'єктів. Вісник ДУ Journal of Rocket-Space Technology № 2 ТЗ4 2025 ISSN 2409-4056 <https://rocketspace.dp.ua> Стр. 84
3. СОУ-Н МПЕ 40.1.17.302:2005 Ультразвуковий контроль зварних з'єднань елементів котлів, трубопроводів і посудин
4. Josef Krautkrämer, Herbert Krautkrämer - Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Springer-Verlag, 2013, ISBN 3642529615 – 415-420 p.
5. ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995) <https://www.iso.org/standard/50461.html>
6. EA-4/02 M: 2022 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in calibration <https://european-accreditation.org/wp-content/uploads/2018/10/EA-4-02.pdf>

APPLICATION OF CORRECTION FACTORS TO THE AMPLITUDE OF SIGNALS REFLECTED FROM DEFECT SIMULATORS IN ULTRASONIC NON- DESTRUCTIVE TESTING REFERENCE BLOCKS

Pavlo Sazonov, Svitlana Klymenko

Abstract. *Ultrasonic non-destructive testing (UT NDT) is widely used for assessing the technical condition of critical engineering structures, with the amplitude-based method remaining one of the principal approaches for defect sizing. However, a significant limitation of this method is the poor reproducibility of echo amplitudes obtained from nominally identical reflectors in calibration and reference blocks, which may lead to deviations of 4 – 10 dB and substantial errors in defect size estimation. This paper proposes an analytical approach for compensating such discrepancies by introducing a correction factor based on the comparison of signal amplitudes reflected from a flat-bottom hole and a quasi-infinite surface. The model is formulated on the basis of acoustic path equations for the far field, taking into account the geometric parameters of the transducer and reflector, ultrasonic frequency, and wave propagation velocity in the material. Measurement uncertainty was evaluated in accordance with the GUM approach. The results demonstrate that the proposed correction reduces amplitude dispersion to approximately 1 – 1,3 dB, significantly improving the reproducibility and reliability of inspection results. The proposed approach can be applied in calibration procedures, metrological certification, and digital ultrasonic testing systems.*

Keywords: *ultrasonic testing (UT), non-destructive testing (NDT), amplitude method, flat-bottom hole, calibration block, reference block, correction factor, uncertainty.*

REFERENCE

1. ISO 5577:2017 Non-destructive testing — Ultrasonic testing — Vocabulary <https://www.iso.org/standard/63662.html>
2. Pavlo Sazonov, Svitlana Klymenko INCREASING THE EFFECTIVENESS OF ULTRASONIC NONDESTRUCTIVE TESTING OF COMPLEX TECHNICAL OBJECTS Journal of Rocket-Space Technology № 2 T34 2025 ISSN 2409-4056 <https://rocketspace.dp.ua> Crop. 84
3. SOU-N MPE 40.1.17.302:2005, Ultrasonic Testing of Welded Joints of Boiler, Pipeline, and Pressure Vessel Components, Ukrainian Industry Standard, 2005
4. Josef Krautkrämer, Herbert Krautkrämer - Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Springer-Verlag, 2013, ISBN 3642529615 – 415-420 p.
5. ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995) <https://www.iso.org/standard/50461.html>
6. EA-4/02 M: 2022 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in calibration <https://european-accreditation.org/wp-content/uploads/2018/10/EA-4-02.pdf>

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ЛАЗЕРНИХ CO₂ ГРАВЕРІВ ПРИ РІЗЦІ ТА ГРАВІЮВАННІ ДЕРЕВИНИ ТА НЕМЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

Харун В.Р. [ORCID]

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
к.т.н., доцент, Україна

Анотація. У роботі розглянуто проблеми, що виникають при експлуатації оптичної системи лазерних CO₂ граверів, які широко застосовуються у малому та середньому бізнесі, призначених для різки та гравіювання деревини, фанери, МДФ, акрилу та інших неметалевих матеріалів. Визначено, що основну загрозу якості обробки становлять продукти згорання матеріалів — дим, смоляні випари та тверді частинки, які осідають на оптичних елементах верстата. Проаналізовано чотири основні групи проблем: забруднення та механічне пошкодження дзеркал і фокусуючої лінзи; порушення юстування оптичного шляху внаслідок вібрацій приводу; неправильна фокусна відстань при зміні товщини матеріалу; термічна деградація антивідбивного покриття лінз при тривалій інтенсивній роботі. Встановлено взаємозв'язок між технічним станом оптичної системи та характерними дефектами гравіювання. Запропоновано комплекс рекомендацій щодо регламентного обслуговування оптичних вузлів для підвищення ресурсу роботи обладнання та стабільності якості обробки.

Ключові слова: лазерний гравер, CO₂ лазер, оптична система, дзеркала, фокусуюча лінза, юстування, гравіювання деревини, технічне обслуговування, якість гравіювання.

Вступ

Лазерні CO₂ гравери набувають широкого застосування в малому та середньому бізнесі для обробки деревини, фанери, МДФ, акрилу, шкіри та інших неметалевих матеріалів. Якість вирізаних або вигравіюваних виробів значною мірою визначається технічним станом оптичної системи верстата. Відповідно до попередніх досліджень автора [1], серед основних експлуатаційних факторів впливу на якість зображення особливе місце посідають: налаштування оптичної системи (фокусна відстань, паралельність лазерного пучка, чистота дзеркал і лінзи) та стан механічної системи переміщення лазерної головки. Проте питання систематичної класифікації

оптичних несправностей і методів їх усунення залишається недостатньо вивченим.

Основний матеріал

Оптична система лазерного CO₂ гравера включає три рефлекторні дзеркала та фокусуючу лінзу із ZnSe (селеніду цинку) або германію. Дзеркала направляють лазерний пучок від трубки до лазерної головки, де лінза фокусує його на поверхню матеріалу. При різці та гравіюванні деревини й неметалів утворюються диміллеві аерозолі, смоляні випари та тверді частинки, які осідають на оптичних елементах.

На основі аналізу [2, 3] та власних спостережень виділено чотири основні групи проблем оптичної системи:

1. Забруднення оптичних елементів.

Осадження продуктів згорання деревини (смоли, сажі, дрібних частинок) на поверхні дзеркал і лінзи призводить до поглинання частини лазерної енергії. Кожен забруднений елемент зменшує вихідну потужність пучка на 20–40% [2]. Наслідки: неповна прорізка матеріалу, нерівномірна глибина гравіювання, поява темних смуг на зображенні. Рекомендована частота перевірки та очищення — кожні 40–50 годин роботи.

2. Порушення юстування оптичного шляху.

Вібрації, що виникають при роботі крокових і серводвигунів приводу лазерної головки, з часом призводять до мікрозміщень дзеркал. Навіть незначне відхилення дзеркала спричиняє нерівномірний розподіл потужності лазерного пучка в різних точках робочого поля. Характерна ознака — поява темних горизонтальних смуг на гравіюваному зображенні, описана в [1]. Контроль юстування слід проводити з використанням термопаперу не рідше ніж раз на місяць або після будь-якого механічного втручання в систему.

3. Похибки фокусування.

Неправильна фокусна відстань є однією з найчастіших причин погіршення якості обробки. При гравіюванні деревини різної товщини зміна положення поверхні матеріалу відносно фокальної точки лінзи призводить до розширення пучка та зниження щільності потужності. Це проявляється у

нечіткості ліній, недостатній глибині різки або надмірному обвуглюванні країв. Для лінз з фокусною відстанню 50,8 мм відхилення на ± 1 мм вже помітно погіршує якість.

4. Термічна деградація оптичних елементів.

При тривалій або надмірно інтенсивній роботі (понад 70% потужності) лінзи із ZnSe піддаються термічним напругам, що прискорює деградацію антивідбивного покриття. Для потужних CO₂ лазерів діаметр лінзи не рекомендується перевищувати 1,5 діаметра пучка ($1/e^2$), оскільки це збільшує тепловий градієнт між центром і краями елемента [3]. Характерна ознака деградації — поява тонкого помутніння або плям на поверхні лінзи, видимих при огляді під яскравим світлом.

Комплексне усунення вищезазначених проблем включає: регулярне очищення оптичних елементів оптичними серветками зі спеціальними розчинниками (ацетон, ізопропіловий спирт); щомісячне юстування оптичного шляху методом термопаперу; правильне налаштування фокусної відстані для кожного матеріалу; встановлення ефективної системи витяжки та повітряного обдуву зони обробки для захисту оптики від осадження продуктів горіння.

Висновки

1. Оптична система лазерних CO₂ граверів є найбільш чутливим до умов експлуатації вузлом при різці та гравіюванні деревини та неметалів через інтенсивне утворення продуктів згорання.

2. Виявлено чотири основні групи оптичних проблем: забруднення, порушення юстування, похибки фокусування та термічна деградація, — кожна з яких має специфічні прояви та методи усунення.

3. Запропонована система регламентного обслуговування оптичних елементів дозволяє суттєво продовжити термін їх служби та підтримувати стабільну якість гравіювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Харун В. Р. Визначення факторів впливу на якість гравіювання лазерних CO₂ граверів з скляною та металевою лазерною трубкою // Матеріали конференції з міжнародною участю «Інноваційні технології в промисловості». Івано-Франківськ, 2023. С. 113–115. URL: <http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-1019/> (дата звернення: 20.03.2026).

2. Aeon Laser USA. Why Is My CO₂ Laser Not Cutting? : веб-сайт. URL: <https://shop.aeonlaser.us/a/docs/troubleshooting/why-is-my-co2-laser-not-cutting> (дата звернення: 20.03.2026).
3. SPT Laser. CO₂ Laser Focus Lens – Contamination and Maintenance : веб-сайт. URL: <https://www.sptlaser.net/laser-lens> (дата звернення: 20.03.2026).
4. Hohnholz A., Rettschlag K., Desens M., Taschner P. A., Overmeyer L. Optics and Apparatus for CO₂ and CO Laser Micro-processing // Springer Handbook of Lasers and Optics / ed. F. Träger. Springer Nature, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-69537-2_4-1.
5. Full Spectrum Laser. CO₂ Laser Repair Services or Self-Troubleshooting : веб-сайт. URL: <https://fslaser.com/blog/co2-laser-repair-services-or-selftroubleshooting/> (дата звернення: 20.03.2026).

ANALYSIS OF OPTICAL SYSTEM PROBLEMS IN CO₂ LASER ENGRAVERS FOR WOOD AND NON-METAL CUTTING AND ENGRAVING

V.R. Kharun

Abstract. *This paper examines problems of the optical system in CO₂ laser engravers for cutting and engraving wood and non-metallic materials. It is established that combustion products — smoke, resin vapors, and solid particles deposited during processing — are the primary threat to processing quality. Four main problem groups are analyzed: contamination and mechanical damage to mirrors and focusing lenses; optical path misalignment caused by drive vibrations; incorrect focal distance when material thickness varies; and thermal degradation of ZnSe lens coatings under prolonged high-power operation. The relationship between the technical condition of the optical system and characteristic engraving defects is established. Scheduled maintenance recommendations for optical units are proposed to extend equipment service life and ensure consistent processing quality.*

Keywords: *CO₂ laser engraver, optical system, mirrors, focusing lens, alignment, wood engraving, non-metal cutting, maintenance, engraving quality.*

REFERENCE

1. Kharun V. R. Vyznachennia faktoriv vplyvu na yakist hraviuvannia lazernykh CO₂ hraveriv z sklianoiu ta metalevoiu lazernoju trubkoju [Determination of factors influencing the engraving quality of CO₂ laser engravers with glass and metal laser tubes]. Materialy konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu «Innovatsiini tekhnolohii v promyslovosti» [Proceedings of the conference "Innovative technologies in industry"]. Ivano-Frankivsk, 2023. P. 113–115 [in Ukrainian]. URL: <http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-1019/> (accessed: 20.03.2026).

2. Aeon Laser USA. Why Is My CO2 Laser Not Cutting? [online]. Available at: <https://shop.aeonlaser.us/a/docs/troubleshooting/why-is-my-co2-laser-not-cutting> (accessed: 20.03.2026).
3. SPT Laser. CO2 Laser Focus Lens – Contamination and Maintenance [online]. Available at: <https://www.sptlaser.net/laser-lens> (accessed: 20.03.2026).
4. Hohnholz A., Rettschlag K., Desens M., Taschner P. A., Overmeyer L. Optics and Apparatus for CO2 and CO Laser Micro-processing. In: Springer Handbook of Lasers and Optics / ed. F. Träger. Springer Nature, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-69537-2_4-1.
5. Full Spectrum Laser. CO2 Laser Repair Services or Self-Troubleshooting [online]. Available at: <https://fslaser.com/blog/co2-laser-repair-services-or-selftroubleshooting/> (accessed: 20.03.2026).

**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ УНІФІКАЦІЇ ТА ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ІНТЕГРАЦІЇ В
ІІІ-МОДЕЛІ КОМПЕНСАЦІЇ ЕКСЦЕНТРИСИТЕТУ ВАЛКІВ**

Потап М.О.¹ [ORCID], Гнатушенко Вік.В.² [ORCID], Селівьорстова Т.В.³ [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

²Український державний університет науки і технологій,

д.т.н., професор, Україна

³Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

Анотація. У роботі розглянуто питання уніфікації та попередньої обробки експериментальних даних для їх ефективного використання в ІІІ-моделях компенсації ексцентриситету валків у процесах листової прокатки. Обґрунтовано, що якість функціонування інтелектуальних моделей значною мірою залежить від узгодженості, повноти та інформативності вхідних даних. Проаналізовано підходи до синхронізації часових рядів, очищення даних, фільтрації шумів, нормалізації та формування ознак. Показано, що застосування процедур уніфікації та попередньої обробки сприяє підвищенню якості інтеграції даних у ІІІ-моделі та створює передумови для більш точної компенсації ексцентриситету валків.

Ключові слова: експериментальні дані, уніфікація даних, попередня обробка даних, штучний інтелект, ексцентриситет валків, листова прокатка, адаптивне керування, часові ряди, інженерія ознак.

Вступ. У сучасних системах автоматизованого керування процесами листової прокатки одним із чинників, що істотно впливає на точність регулювання товщини смуги, є ексцентриситет валків. Його наявність спричиняє періодичні збурення в сигналах зусилля прокатки, товщини та інших технологічних параметрів, що ускладнює роботу систем автоматичного регулювання [1], [2]. У зв'язку з цим актуальним є використання методів штучного інтелекту для виявлення закономірностей у технологічних сигналах та формування компенсаційних дій. Водночас ефективність таких моделей значною мірою визначається якістю підготовки експериментальних даних, що подаються на вхід ІІІ-систем [4], [5].

Постановка проблеми. Експериментальні дані, що застосовуються для побудови ШІ-моделей компенсації ексцентриситету валків, зазвичай формуються з кількох джерел: датчиків товщини, сили прокатки, швидкості обертання валків, вібраційних сигналів, технологічних журналів та інших вимірювальних каналів. Такі дані є неоднорідними за форматом, частотою дискретизації, одиницями вимірювання, часовими мітками, повнотою та рівнем шуму [4], [5]. За відсутності уніфікованого підходу до їх підготовки знижується якість інтеграції даних у ШІ-модель, що, у свою чергу, погіршує точність компенсації ексцентриситету. Отже, виникає необхідність дослідження методів уніфікації та попередньої обробки експериментальних даних для підвищення ефективності інтелектуальних систем керування.

Огляд літератури. У науковій літературі питання компенсації ексцентриситету валків розглядається в межах кількох підходів. У роботі W. J. Edwards, P. J. Thomas, G. C. Goodwin ексцентриситет валків описується як періодичне збурення, що потребує окремого виявлення та компенсації в системі керування прокатним станом [1]. У дослідженні Z.-M. Chen та співавторів для компенсації ексцентриситету запропоновано використовувати anti-aliasing wavelet analysis, що дозволяє виділяти корисну періодичну компоненту із зашумлених сигналів [2]. У роботі W. I. Nameed та K. A. Mohamad розглянуто застосування fuzzy neural network для компенсації ексцентриситету в задачі керування товщиною смуги [3].

Окремий напрям становлять дослідження, присвячені попередній обробці часових рядів і забезпеченню якості даних для промислових ШІ-систем. У сучасних оглядах підкреслюється важливість очищення даних, синхронізації часових рядів, обробки пропусків, виявлення аномалій, нормалізації та уніфікації форматів даних як необхідної умови побудови ефективних моделей машинного навчання [4], [5]. Таким чином, саме поєднання методів компенсації ексцентриситету з якісною підготовкою даних є перспективним напрямом досліджень.

Дослідження. У роботі дослідження зосереджено на методах підготовки експериментальних даних перед їх використанням у ШІ-моделі компенсації

ексцентриситету валків. Запропоновано розглядати процес підготовки даних як послідовність взаємопов'язаних етапів [4], [5]:

- 1) уніфікація даних – приведення даних із різних джерел до єдиної структури, однакових назв параметрів, узгоджених одиниць вимірювання та спільної часової шкали;
- 2) синхронізація часових рядів – узгодження сигналів, отриманих із різною частотою дискретизації;
- 3) очищення даних – виявлення та усунення пропусків, викидів, дублювань і помилкових записів;
- 4) фільтрація та згладжування – зменшення впливу шуму без втрати інформативної періодичної складової;
- 5) нормалізація та стандартизація – приведення ознак до масштабу, придатного для алгоритмів машинного навчання;
- 6) формування ознак – побудова похідних характеристик, зокрема амплітудних, частотних, фазових і статистичних;
- 7) оцінювання якості набору даних – перевірка повноти, узгодженості, репрезентативності та інформативності.

Аналіз та результати. Проведений аналіз показав, що для задачі компенсації ексцентриситету валків недостатньо використовувати лише первинні технологічні сигнали. Оскільки ексцентриситет має виражену періодичну природу, інформативними є ознаки, що відображають гармонічні, фазові та частотні характеристики сигналів [1], [2]. Методи хвильового аналізу та нейромережевої обробки дозволяють виділяти характерні компоненти ексцентриситету навіть за наявності шумів і змін технологічного режиму [2], [3].

Узагальнення літературних джерел дає підстави стверджувати, що підвищення якості інтеграції даних у ШІ-модель досягається за умови уніфікації часових і параметричних представлень сигналів, зменшення впливу шумів та аномалій, формування інформативного простору ознак і узгодження структури даних із вимогами конкретної моделі машинного навчання [4], [5]. Отже, ключовим чинником успішного застосування ШІ в задачі компенсації ексцентриситету валків є data-centric підхід, у якому якість підготовки даних розглядається як окремий об'єкт дослідження.

Висновки. У роботі обґрунтовано доцільність дослідження методів уніфікації та попередньої обробки експериментальних даних для задачі компенсації ексцентриситету валків у III-моделях. Встановлено, що ефективність інтелектуальної компенсації визначається не лише вибором алгоритму, а й ступенем узгодженості, очищення та інформативності вхідного набору даних [4], [5]. Аналіз літератури показав, що найбільш значущими для цієї задачі є процедури синхронізації часових рядів, шумозаглушення, виявлення аномалій, нормалізації та формування спектрально-орієнтованих ознак [2], [4]. Отже, попередня підготовка експериментальних даних є критично важливим етапом побудови III-моделей компенсації ексцентриситету валків.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення формалізованої методики оцінювання якості підготовки наборів даних для III-моделей компенсації ексцентриситету валків, а також на порівняння ефективності різних схем попередньої обробки для нейромережових та гібридних моделей [3]–[5]. Перспективним є також дослідження поєднання процедур попередньої обробки часових рядів із адаптивними алгоритмами компенсації в реальному часі.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Edwards W. J., Thomas P. J., Goodwin G. C. Roll Eccentricity Control for Strip Rolling Mills // IFAC Proceedings Volumes. 1987. Vol. 20, Issue 5. P. 187–198. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)55438-5.
2. Chen Z.-M., Luo F., Xu Y.-G., Yu W. Roll Eccentricity Compensation Based on Anti-Aliasing Wavelet Analysis Method // Journal of Iron and Steel Research International. 2009. Vol. 16. P. 35–39. DOI: 10.1016/S1006-706X(09)60024-8.
3. Hameed W. I., Mohamad K. A. Strip Thickness Control of Cold Rolling Mill with Roll Eccentricity Compensation by Using Fuzzy Neural Network // Engineering. 2014. Vol. 6. P. 27–33. DOI: 10.4236/eng.2014.61005.
4. Tawakuli A., Havers B., Gulisano V., Kaiser D., Engel T. Survey: Time-Series Data Preprocessing: A Survey and an Empirical Analysis // Journal of Engineering Research. 2025. Vol. 13, No. 2. P. 674–711. DOI: 10.1016/j.jer.2024.02.018.
5. Li X., Cheng Y., Møller C., Lee J. Data Issues in Industrial AI Systems: A Meta-Review and Research Strategy // Computers in Industry. 2025. Vol. 173. Article 104361. DOI: 10.1016/j.compind.2025.104361.

**RESEARCH ON METHODS OF UNIFICATION AND PREPROCESSING OF
EXPERIMENTAL DATA TO IMPROVE THE QUALITY OF INTEGRATION INTO
AI MODELS FOR ROLL ECCENTRICITY COMPENSATION**

Mykhailo Potap, Viktoriia Hnatushenko, Tetiana Selivorstova

Abstract. *The paper addresses the issues of unification and preprocessing of experimental data for their effective use in AI models for roll eccentricity compensation in sheet rolling processes. It is substantiated that the performance quality of intelligent models largely depends on the consistency, completeness, and informativeness of the input data. Approaches to time-series synchronization, data cleaning, noise filtering, normalization, and feature engineering are analyzed. It is shown that the application of data unification and preprocessing procedures improves the quality of data integration into AI models and creates prerequisites for more accurate roll eccentricity compensation.*

Keywords: *experimental data, data unification, data preprocessing, artificial intelligence, roll eccentricity, sheet rolling, adaptive control, time series, feature engineering.*

ІНТЕГРОВАНІЙ ПЕРКОЛЯЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ МІЖДЕНДРИТНОГО ЖИВЛЕННЯ В УМОВАХ ЗАТВЕРДІННЯ ПІД ТИСКОМ

Селівьорстова Т.В. [ORCID]

Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

Анотація. У роботі розглянуто проблему міждендритного живлення на завершальній стадії затвердіння металів і сплавів в умовах зовнішнього тиску. Показано, що традиційні підходи до моделювання, які ґрунтуються лише на локальних параметрах рідкої фази та проникності mushy-зони, не повною мірою враховують втрату глобальної зв'язності рідинної мережі, що є критично важливим для опису дефектоутворення. Запропоновано інтегровану перколяційну модель міждендритного живлення, яка поєднує мікроструктурний опис дендритного каркаса, гідродинамічний підхід до фільтрації рідкої фази в пористому середовищі та перколяційний критерій збереження безперервного каналу живлення. Обґрунтовано, що саме втрата зв'язності рідинної мережі є одним із ключових механізмів переходу від ефективного підживлення до формування усадкової та газоусадкової пористості. Врахування зовнішнього тиску в межах моделі дає змогу точніше описати умови збереження міждендритного живлення та оцінити його вплив на завершальну стадію затвердіння. Запропонований підхід може бути використаний як теоретична основа для подальшого математичного моделювання дефектоутворення в литих металах і сплавах.

Ключові слова: міждендритне живлення, mushy-зона, перколяція, затвердіння під тиском, дендритна структура, проникність, пористість, математичне моделювання.

Вступ. На завершальній стадії затвердіння металів і сплавів у двофазній mushy-зоні рідка фаза фільтрується крізь дендритний каркас і забезпечує компенсацію об'ємної усадки. Порушення цього механізму призводить до формування усадкової пористості, газоусадкових дефектів і гарячих тріщин. У класичних роботах mushy-зона описується як двофазне пористе середовище, для якого визначальними є процеси масо-, тепло- та імпульсоперенесення [1]. Разом із тим на пізніх стадіях кристалізації важливими є не лише локальний вміст рідкої фази та проникність, а й збереження глобальної зв'язності рідинної мережі, через яку передається тиск і здійснюється міждендритне живлення [2], [3].

Постановка проблеми. Існуючі підходи до моделювання здебільшого описують окремі сторони процесу. Darcy-based і porous-medium моделі добре відтворюють загальні умови живлення та падіння тиску в рідкій фазі, але використовують ефективні параметри проникності без явного врахування втрати зв'язності рідинних каналів [1], [4]. Клітинно-автоматні моделі детально описують формування дендритної мікроструктури, однак не завжди прямо пов'язують її з гідродинамікою живлення. Тому актуальною є задача побудови інтегрованої моделі, яка б поєднувала формування структури, зміну проникності, перколяційний розпад рідинної мережі та вплив зовнішнього тиску [1], [2], [5].

Огляд літератури. Фундаментом макроскопічного опису міждендритного живлення є volume-averaged модель Ni та Beckermann [1]. Для аналізу дефектоутворення важливим став критерій Rappaz–Drezet–Gremaud, який пов'язує появу гарячих тріщин із нестачею рідинного підживлення та зниженням тиску в міждендритних каналах [2]. Його подальша експериментальна перевірка підтвердила придатність такого підходу для опису критичних станів затвердіння [3]. Дослідження проникності mushy-зони показують, що вона є ключовою характеристикою дендритного каркаса і визначає здатність системи до живлення [4]. У свою чергу granular/network моделі демонструють, що на фінальній стадії кристалізації вирішальну роль відіграє локалізація потоку та втрата зв'язності рідинної мережі [5].

Дослідження. У роботі запропоновано інтегровану перколяційну модель міждендритного живлення, яка поєднує мікроструктурний, гідродинамічний і топологічний рівні опису. На першому рівні враховується еволюція дендритної структури та частки твердої фази. На другому – рух рідкої фази в mushy-зоні розглядається як фільтрація у пористому середовищі. На третьому – оцінюється збереження або втрата глобальної зв'язності рідинної мережі, яка визначає можливість передачі тиску та підживлення дефіцитних зон [1], [4], [5]. Зовнішній тиск у моделі розглядається як технологічний фактор, що змінює умови живлення і може впливати на морфологію структури.

Аналіз та результати. Аналіз літературних джерел і запропонованої постановки показує, що перехід від ефективного міждендритного живлення до дефектоутворення пов'язаний не лише зі зменшенням частки рідкої фази, а насамперед із втратою безперервного каналу передачі тиску через mushy-зону. Це дає підстави трактувати завершальну стадію затвердіння як перколяційний перехід: доки існує зв'язний рідинний кластер, живлення можливе; після його руйнування навіть наявність ізольованих рідинних включень уже не забезпечує компенсації усадки [2], [5]. Таким чином, запропонований підхід узгоджує класичні porous-medium моделі з перколяційним критерієм втрати зв'язності рідинної мережі.

Висновки. Запропоновано інтегровану перколяційну модель міждендритного живлення в умовах затвердіння металів і сплавів під тиском. Показано, що ключовим механізмом переходу до дефектоутворення є втрата глобальної зв'язності рідинної мережі в mushy-зоні. На відміну від традиційних підходів, модель враховує не лише локальні параметри рідкої фази, а й топологічний стан системи живлення, що робить її більш придатною для теоретичного опису завершальної стадії затвердіння [1], [2], [5].

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на уточнення зв'язку між параметрами мікроструктури та проникністю mushy-зони, побудову кількісного перколяційного критерію для різних типів структури, а також на розширення моделі з урахуванням газової фази, капілярних ефектів і термодинаміки зародження пор [2], [4], [5].

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Ni J., Beckermann C. A volume-averaged two-phase model for transport phenomena during solidification. Metallurgical Transactions B. 1991. Vol. 22, No. 3. P. 349–361. DOI: 10.1007/BF02651234.
2. Rappaz M., Drezet J.-M., Gremaud M. A new hot-tearing criterion. Metallurgical and Materials Transactions A. 1999. Vol. 30, No. 2. P. 449–455. DOI: 10.1007/s11661-999-0334-z.
3. Drezet J.-M. Validation of a new hot tearing criterion using the ring mould test. Journal de Physique IV France. 1999. Vol. 9. P. Pr9-53–Pr9-62. DOI: 10.1051/jp4:1999906.
4. Erdmann R. G., Poirier D. R., Hendrick A. G. Permeability in the mushy zone. In: Solidification and Gravity V. Materials Science Forum. 2010. Vol. 649. P. 399–408. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.649.399.

5. Sistaninia M., Phillion A. B., Drezet J.-M., Rappaz M. Three-dimensional granular model of semi-solid metallic alloys undergoing solidification: Fluid flow and localization of feeding. *Acta Materialia*. 2012. Vol. 60, No. 9. P. 3902–3911. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.03.036.

INTEGRATED PERCOLATION-BASED APPROACH TO MODELING INTERDENDRITIC FEEDING UNDER PRESSURIZED SOLIDIFICATION

Tetiana Selivorstova

Abstract. *The paper addresses the problem of interdendritic feeding at the final stage of solidification of metals and alloys under external pressure. It is shown that conventional modeling approaches based only on local liquid-phase parameters and mushy-zone permeability do not fully account for the loss of global connectivity of the liquid network, which is critically important for describing defect formation. An integrated percolation-based model of interdendritic feeding is proposed, combining a microstructural description of the dendritic skeleton, a hydrodynamic approach to liquid-phase filtration in a porous medium, and a percolation criterion for preserving a continuous feeding channel. It is substantiated that the loss of connectivity of the liquid network is one of the key mechanisms governing the transition from effective feeding to the formation of shrinkage and gas-shrinkage porosity. Considering external pressure within the model makes it possible to describe more accurately the conditions for preserving interdendritic feeding and to assess its influence on the final stage of solidification. The proposed approach can be used as a theoretical basis for further mathematical modeling of defect formation in cast metals and alloys.*

Keywords: *interdendritic feeding, mushy zone, percolation, pressurized solidification, dendritic structure, permeability, porosity, mathematical modeling.*

СЕКЦІЯ 2

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ПРОЦЕСАХ ОДЕРЖАННЯ
МАТЕРІАЛІВ ІЗ ЗАДАНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ**

SECTION 2

**INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE PROCESSES OF OBTAINING
MATERIALS WITH SPECIFIED PROPERTIES**

**ЗАСТОСУВАННЯ 3D СКАНУВАННЯ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ПАРАМЕТРІВ
РУЙНУВАННЯ ТА ДЕФОРМАЦІЇ ПОВЕРХНІ ПІСЛЯ ВИПРОБУВАНЬ НА
УДАРНО-АБРАЗИВНЕ ЗНОШУВАННЯ**

Балаханова Т.В.¹, Кононенко Г.А.² [ORCID],

Подольський Р.В.³ [ORCID], Ковзель М.А.⁴

¹ІЧМ НАН, к.т.н., ст. досл., України

²ІЧМ НАН України, НТУ, «Дніпровська політехніка» д.т.н., ст.досл, України

³ІЧМ НАН України, ІПСУ НАН, Ph.D, України

⁴Дніпропетровського НДЕКЦ МВС, к.т.н., доц., України

Анотація. Сучасний розвиток матеріалознавства пов'язаний із впровадженням цифрових технологій аналізу результатів випробувань. У роботі запропоновано підхід до вдосконалення методу ударно-абразивного зношування шляхом його цифровізації. На відміну від традиційної оцінки лише за втратою ваги, методика доповнена 3D-скануванням поверхні зразків після випробувань. Це дозволяє отримати кількісну інформацію про зміну геометрії, розподіл і величину пластичної деформації. Наукова новизна полягає у переході від одомірної оцінки зносостійкості до комплексної - з урахуванням деформаційного рельєфу поверхні. Результатом є побудова карт глибин і профілограм, які відображають опір матеріалу пластичному деформуванню в умовах ударно-абразивного впливу. Такий підхід розширює інформативність випробувань і створює основу для більш точного порівняння матеріалів та верифікації моделей зношування.

Ключові слова: ударно-абразивний знос, топографія поверхні, параметри зношування, оптична профілометрія, 3D-сканування, пластична деформація.

Дослідження поверхні матеріалів є одним із найважливіших етапів матеріалознавчих досліджень і технічної експертизи. При цьому не має значення, чи йдеться про зразки після лабораторних випробувань, чи про деталі, пошкоджені в умовах реальної експлуатації, які потребують ретельного дослідження з метою встановлення механізму руйнування. Такий аналіз дозволяє визначити, чи є пошкодження випадковим, чи воно спричинене втомним руйнуванням, а також виявити можливу наявність сторонніх впливів, корозійних процесів або інших факторів деградації матеріалу. Окремим важливим напрямом є дослідження поверхні при оцінюванні зносостійкості

матеріалів, зокрема в умовах ударно-абразивного зношування. Цей вид навантаження характеризується складною природою і не може бути повністю передбачений лише на основі традиційних механічних характеристик. Наприклад, ступінь зношування при суто абразивному навантаженні часто корелює з твердістю, але у випадку ударно-абразивного впливу, матеріал повинен поєднувати високу твердість із достатньою в'язкістю руйнування [1].

Найпоширенішим способом випробування матеріалів на ударно-абразивну стійкість є використання випробувальних машин барабанного типу (рис. 1) [2].

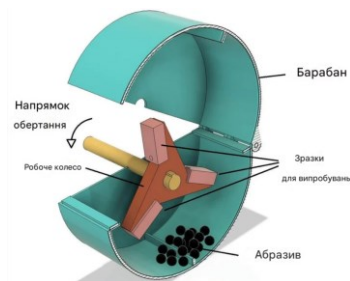


Рисунок 1 – Схематичне зображення випробувальної машини на ударно-абразивне зношування барабанного типу [3]

Суть методу полягає у закріпленні зразків певної геометричної форми та розмірів у порожнистому циліндрі (барабані), заповненому абразивними частками. Розмір, форма, кількість і, найважливіше, матеріал цих часток підбираються відповідно до умов, що моделюють реальну експлуатацію матеріалу. Як абразив можуть використовуватися керамічні тіла, металевий дріб, дрібні камінці тощо. Після закріплення зразків і завантаження абразиву барабан герметично закривається та приводиться в обертання з заданою швидкістю протягом визначеного часу. Після завершення випробувань зразки очищують і визначають втрату маси та об'єму – так званий класичний підхід. Однак вони не дозволяють врахувати локальні особливості зношування, зокрема наявність пластично деформованих зон, а також не дають можливості встановити механізми пошкодження.

Тому для повноцінного аналізу доцільно застосовувати комплексний підхід, який поєднує кількісні методи (вагові, об'ємні) з якісними (мікроструктурний та морфологічний аналіз поверхні). На сьогодні для

дослідження топографії поверхні широко застосовуються стандартизовані методи, регламентовані серією стандартів ISO 25178. Ці документи визначають конструкцію та метрологічні характеристики як контактних, так і безконтактних приладів (конфокальних, інтерферометричних, автофокусних тощо), призначених для площинного вимірювання топографії поверхні.

Застосування цих методів для оцінки зношування має низку суттєвих обмежень. По-перше, профілометричні методи дозволяють досліджувати лише локальні ділянки поверхні, що ускладнює аналіз просторово неоднорідного зношування. По-друге, формування цілісної топографічної моделі шляхом зшивання окремих сканів є трудомістким і супроводжується накопиченням похибок. По-третє, висока деталізація вимірювань часто супроводжується шумами та артефактами, що ускладнює інтерпретацію результатів.

У зв'язку з цим дедалі більшого поширення набуває використання оптичних 3D-сканерів, які мають низку суттєвих переваг [4]. Вони дозволяють швидко оцінити стан зношеної поверхні всього об'єкта без обмеження окремими локальними зонами, що є важливим при аналізі нерівномірного зношування. Ця технологія дозволяє формувати повноцінну тривимірну карту зношення досліджуваних компонентів, що забезпечує візуалізацію реального розподілу пошкоджень по всій поверхні виробу. Відповідно, стає можливим не лише якісне, але й кількісне визначення параметрів зношування на різних ділянках об'єкта. 3D-цифрова модель являє собою хмару точок або трикутну сітку.

Попри високу ефективність оптичного 3D-сканування, цей метод має низку обмежень і джерел похибок. Зокрема, можливе виникнення артефактів у вигляді піків на краях подряпин і западин, втрата сигналу в зоні фокусування через наявність пилу, корозії або неоднорідностей матеріалу [5, 6]. Крім того, на криволінійних або складних геометріях поверхні можуть з'являтися хибні ділянки (так звані «плями») внаслідок самозатінення.

Одними з найбільших джерел похибок є некоректне суміщення отриманих сіток, а також помилки, пов'язані з обробкою даних. Тому процедура обробки результатів сканування потребує особливої ретельності.

Для підвищення точності доцільно використовувати еталонні зразки, а також контролювати відстань до об'єкта сканування, яка суттєво впливає на якість отриманих даних [7].

Процедура цифрового контролю зносу зазвичай полягає у порівнянні оцифрованої 3D-моделі зношеного зразка з еталонною моделлю незношеного стану та включає такі етапи: вирівнювання (реєстрацію) та накладання еталонної і зношеної моделей; обчислення відхилень між поверхнями; визначення різниці об'ємів для кількісної оцінки інтенсивності зношування; побудову 3D-карти відхилень, що відображає просторовий розподіл зносу по поверхні зразка.

Одним із прикладів підвищення якості 3D-сканування є використання джерел світла синього спектра [8], що дозволяє підвищити точність вимірювань за рахунок меншої довжини хвилі та кращої стійкості до впливу зовнішнього освітлення.

Під час роботи з оптичними 3D-сканерами необхідно дотримуватися методологічних і процедурних вимог, що забезпечують точність та повторюваність вимірювань. Налаштування системи повинні відповідати специфікаціям виробника для конкретного типу сканера, вимірюваного об'єму та параметрів, а при необхідності слід виконувати калібрування датчика відповідно до інструкцій користувача. Регулярне калібрування є обов'язковим [9], особливо після транспортування обладнання, зміни температури або оптики сканера, оскільки навіть у лабораторії зі стабільними умовами відхилення можуть накопичуватися та впливати на точність вимірювань. Поверхні зразків потребують підготовки: при наявності блискучих або напівпрозорих ділянок доцільно нанести антиблікове покриття, а температура об'єкта та навколишнього середовища має бути однаковою [10]. Під час сканування необхідно уникати коливань платформи та змін освітлення. Вимірювання виконуються з максимальною роздільною здатністю та відповідним часом експозиції для уникнення переекспонування.

Висновки

1. Оптичне 3D-сканування є ефективним сучасним інструментом для оцінювання зношування матеріалів, що забезпечує швидке отримання повної

просторової інформації про стан поверхні та дозволяє аналізувати нерівномірність зношування по всьому об'єкту.

2. Основними перевагами методу є висока швидкість, відносна простота реалізації, інформативність та можливість формування тривимірних карт зносу, які забезпечують як якісну, так і кількісну оцінку параметрів пошкодження.

3. Забезпечення точності та відтворюваності результатів вимагає суворого дотримання методологічних вимог, включаючи регулярне калібрування обладнання, підготовку поверхні зразків і контроль умов проведення вимірювань.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Narayanaswamy B., Ghaderi A., Hodgson P. та ін. Abrasive wear resistance of ferrous microstructures with similar bulk hardness levels evaluated by a scratch-tester method // *Metall. and Mat. Trans. A*. 2019. Vol. 50. P. 4839–4850. DOI: 10.1007/s11661-019-05354-2
2. Ratia-Hanby V., Valtonen K., Kuokkala V.-T. Impact-abrasion wear of wear-resistant steels at perpendicular and tilted angles // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: J. of Eng. Trib..* 2013. Vol. 227. P. 868–877. DOI: 10.1177/1350650113487831
3. Júnior A., Caceres J., Rocha D. Study of the erosive-abrasive wear resistance of Fe–14%Cr–2.8%C high chromium cast iron // *Materials Research*. 2024. Vol. 27. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2023-0242
4. Cucinotta F., Scappaticci L., Sfravara F., Morelli F., Mariani F., Varani M., Mattetti M. On the morphology of the abrasive wear on ploughshares by means of 3D scanning // *Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 179. P. 117–125. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2019.01.006
5. Pawlus P., Reizer R. Profilometric measurements of wear scars: A review // *Wear*. 2023. Vol. 534–535. Art. 205150. DOI: 10.1016/j.wear.2023.205150
6. Valigi M. C., Logozzo S., Affatato S. New challenges in tribology: Wear assessment using 3D optical scanners // *Materials*. 2017. Vol. 10, No. 5. Art. 548. DOI: 10.3390/ma10050548
7. Lamberti L. Special issue on advances in characterization of materials with optical methods // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 13. Art. 7958. DOI: 10.3390/app13137958
8. Cucinotta F., Guglielmino E., Risitano G., Sfravara F. Assessment of damage evolution in sandwich composite material subjected to repeated impacts by means of optical measurements // *Procedia Structural Integrity*. 2016. Vol. 2. P. 3660–3667. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.455
9. Mendřický R. Determination of measurement accuracy of optical 3D scanners // *MM Science Journal*. 2016. P. 1565–1572. DOI: 10.17973/MMSJ.2016_12_2016183
10. Bilušić M., Olivari L. Comparative analysis of handheld laser scanner and optical 3D scanning systems for industrial applications // *Proceedings of the 13th International Conference Mechanical Technologies and Structural Materials 2024* / eds. N. Čatipović, J. Krolo, N. Gjeldum. Split: University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2024. P. 37–48

APPLICATION OF 3D SCANNING FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF SURFACE DAMAGE AND DEFORMATION AFTER IMPACT-ABRASIVE WEAR TESTING

Tetiana Balakhanova, Ganna Kononenko, Rostyslav Podolskyi, Maksim Kovzel

Abstract. *The modern development of materials science is associated with the implementation of digital technologies for analyzing test results. This study proposes an approach to improving the impact-abrasive wear testing method through its digitalization. In contrast to the traditional evaluation based solely on weight loss, the methodology is supplemented with 3D scanning of specimen surfaces after testing. This makes it possible to obtain quantitative information on changes in geometry, as well as the distribution and magnitude of plastic deformation. The scientific novelty lies in the transition from a one-dimensional assessment of wear resistance to a comprehensive evaluation that takes into account the deformation-induced surface relief. The result is the construction of depth maps and profilograms that reflect the material's resistance to plastic deformation under impact-abrasive conditions. This approach enhances the informativeness of testing and provides a basis for more accurate comparison of materials and validation of wear models.*

Keywords: *impact-abrasive wear, surface topography, wear parameters, optical profilometry, 3D scanning, plastic deformation, service properties.*

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2026.01.019

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧИСТОВОЇ КЛІТІ СТАНА 800 ЯК ОБ'ЄКТУ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Зінченко М.Д.¹ [ORCID], Потап О.Ю.² [ORCID],

Шибакінський В.І.³ [ORCID], Бурчак А.А.⁴ [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, к. т. н., с.н.с, України

²Український державний університет науки і технологій, к. т. н., доцент, України

³Український державний університет науки і технологій, к. т. н., доцент, України

⁴Український державний університет науки і технологій,

старший викладач, України

Анотація: Метою роботи є дослідження процесу прокатки фланцевих профілів на стані 800. Процес прокатки на стані побудований таким чином, що прокатаний на блюмінгу злиток надходить на стан транзитом без проміжного підігріву, ріжеться на окремі частини, які потім послідовно прокатуються на стані. Така технологія створює перепад температури між частинами злитка, тому що температура наступних частин зменшується, поки прокатується перша частина, що суттєво впливає на розміри прокату. Виконано дослідження впливу коливань температури прокатки та змінення міжвалкового зазору на розміри окремих елементів швелера 24 та довжину розкату. Показано, що зміненням міжвалкового зазору в чистовий клітці стана можна компенсувати вплив температури розкату на розміри та підвищити точність прокатки швелерів на стані 800. Стабілізація товщини прокату призводить також до стабілізації довжини прокату, що призводить до зменшення кількості штанг немірної довжини.

Ключові слова: Точність, розміри прокату, довжина розкату, температура, між- валковий зазор, штанги немірної довжини.

Вступ. На сортових станах гарячої прокатки фланцевих профілів та профілів складної форми поперечного перерізу під розмірами розуміють розміри окремих елементів поперечного перерізу.

Змінення розмірів прокату відбувається за рахунок коливань параметрів прокатки, для гарячої прокатки це перш за все коливання температури розкатів, а також знос калібрів валків та підшипників, якій є повільно діючим фактором та впливає на товщину розкатів поступово.

Вплив температури на розміри профілів на стані 550 був досліджений в роботі [1] і стосувався дослідженню впливу температури на товщину автоободів. Автоободи мають складний профіль поперечного перерізу, товщина окремих елементів профілю суттєво відрізняється, але вплив температури найбільш суттєво впливає на товщину полотна, тому що це найбільш тонка та широка частина автобода, яка швидко остигає і впливає на силу прокатки та пружну деформацію кліті, яка визначає товщину прокату.

Було показано, що вплив температури на товщину прокату можна компенсувати зміненням міжвалкового зазору переміщенням верхнього валка чистової кліті в паузі між прокаткою. Була реалізована система автоматичної настройки чистової кліті стана 550, яка змінювала міжвалковий зазор відповідно відхиленню температури від середнього значення температури, яке було отримано під час налаштування чистової кліті і відповідало встановленому міжвалковому зазору і заданої вихідної товщині [2].

Основний матеріал. Вплив температури на розміри профілів відбувається також і при прокатці інших профілів, наприклад, швелерів та балок на стані 800, але технологічний процес прокатки на стані 800 суттєво відрізняється від стана 550.

Процес прокатки на стані 800 відбувається з заготовок, які прокатуються на блюмінгу та транзитом без проміжного підігріву надходять на стан 800. На парогідравлічному ножі заготовки з блюмінгу ріжуться на 2-4 частини, тому що інакше розкат не поміщається на розкатному полі стана 800. Це призведе до того, що поки перша частина прокатується на стані, наступні частини остигають, їх температура знижується, що призведе до збільшення товщини розкату з наступної частини. Тобто технологія прокатки на стані 800 завідомо створює коливання температури розкату при прокатці на стані 800, причому при прокатці одного злитка створюється прогнозоване зниження температури розкатів та збільшення товщини.

Тому для компенсації впливу температури на товщину розкатів була запропонована та реалізована на стані 800 автоматизована система підтиску верхнього валка по програмі, робота якої полягала в зменшенні міжвалкового

зазору в чистовий кліті на 0,2-0,3 мм перед прокаткою кожної наступної частини і після прокатки всіх частин злитка повернення міжвалкового зазору в чистовий кліті в початкове положення [3]. Команда на переміщення верхнього валка здійснювалась оператором на посту управління чистовою кліттю натисненням на кнопку управління, що створювало сигнал на переміщення верхнього валка в мікропроцесорну систему, яка реалізовувала підтиск верхнього валка по програмі.

Робота системи в значній степені підвищила точність прокатки на стані 800, але експериментальні дослідження показали, що температура частин злитка та відповідно розміри змінюються нерівномірно (рис.1), тому для більш точного підвищення точності роботи системи треба вимірювати температуру розкату перед чистовою кліттю та корегувати міжвалковий зазор в залежності від відхилення температури від заданого значення.

На відміну від стана 550, де в чистовий кліті виконується один прохід та перед ним корегується міжвалковий зазор, в чистовий кліті стана 800 при прокатці швелера виконується 4 проходи.

Для визначення впливу на розміри швелера температури розкатів та змінення між валкового зазору виконали ряд експериментальних досліджень на стані 800. Температуру розкатів вимірювали під час передачі розкату з чорнової кліті на подавальний рольганг чистової кліті. На пилах гарячого різання бралися проби з переднього кінця розкату, які зважувались і розміри яких вимірювались. Вимірювали також довжину розкату після прокатки його в чистовій кліті.

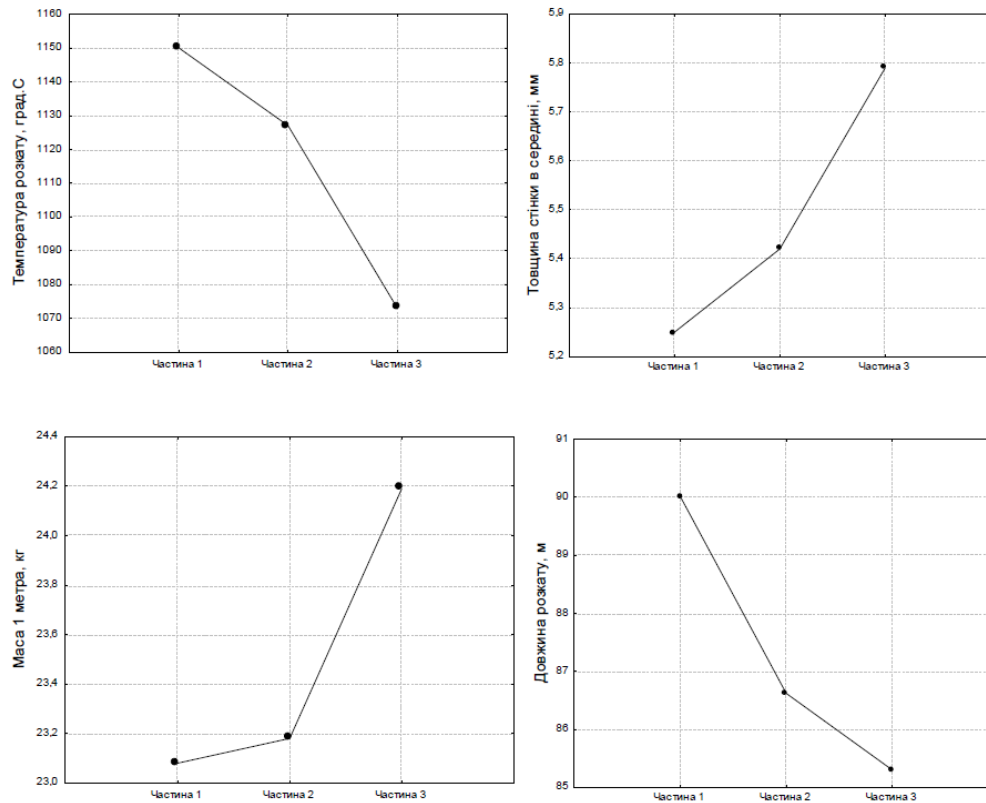


Рисунок 1 - Діаграми змінення середніх значень температури прокатки та розмірів швелера 24 на стані 800

В таблиці 1 наведені статистичні параметри розмірів елементів швелера 24, які отримані при прокатці частин злитків. Коливання розмірів обумовлені зниженням температури розкатів як наслідок послідовної прокатки частин в чистовий кліт коли перша частина прокатується, а інші чекають.

Коливання товщини стінки, полок та висоти полок відбуваються в діапазоні 0,6-0,78 мм, середньоквадратичне відхилення знаходиться в діапазоні 0,2 – 0,27 мм. Значення коефіцієнтів кореляції, які підтверджують зв'язок між змінням температури та розмірами прокату знаходяться в діапазоні 0,7-0,9, що говорить про значний вплив температури на розміри прокату.

Компенсація впливу температури на розміри швелерів змінням міжвалкового зазору чистової кліт на стані 800 таким чином, як це було зроблена на стані 550, неможливо, тому що в чистовій кліт стана 800 прокатка швелерів відбувається в 4 проходи та потребує додаткових досліджень впливу змінням міжвалкового зазору на розміри та довжину прокату. Були проведені

експериментальні дослідження впливу міжвалкового зазору на розміри та довжину прокату.

В таблиці 2 наведені статистичні параметри розмірів елементів швелера 24, які отримані при прокатці зі змінням міжвалкового зазору в чистовий кліті. Під час досліджень частина розкатів була прокатана з коливаннями температури при встановленому при налаштуванні кліті міжвалковому зазору. Потім міжвалковий зазор в чистовий кліті був збільшений на 0,4 мм і також була прокатана частина розкатів з коливаннями температури. При визначенні впливу зміння міжвалкового зазору на розміри прокату добирали розкати з приблизно однаковою температурою.

Таблиця 1

Статистичні параметри розмірів швелера 24, які отримані при змінненні температури розкату

Статистичні параметри	Температура, °C	Маса 1 метра, кг	Товщина стінки зліва, мм	Товщина стінки в середині, мм	Товщина стінки справ, мм	Товщина правої полки, мм	Товщина лівої полки, мм	Висота правої полки, мм	Висота лівої полки, мм	Висота профіля, мм	Довжина розкату, м
Max	1150	24,51	6,12	5,9	6,10	10,0	10,27	92,50	92,30	235,80	90,80
Min	1066	22,42	5,40	5,10	5,30	9,25	9,65	90,75	91,50	233,80	82,17
Різниця	84	2,09	0,72	0,80	0,80	0,82	0,62	1,75	0,80	2,00	8,63
M(.)	1115	23,46	5,68	5,48	5,60	9,72	9,89	91,63	91,88	234,85	87,99
σ (.)	33	0,70	0,23	0,25	0,266	0,2	0,200	0,48	0,232	0,58	2,451

Таблиця 2

Статистичні параметри розмірів швелера 24, які отримані при змінненні між
валкового зазору в чистовий кліті стана 800

Статистичні параметри	Температура розкату, °C	Міжвалковий азопр, мм	Товщина стінки з лівого боку, мм	Товщина стінки в середині, мм	Товщина стінки з правого боку, мм	Товщина лівої полки, мм	Товщина правої полки, мм	Висота лівої полки, мм	Висота правої полки, мм	Висота швелера, мм	Довжина розкату, мм
Min	1057	0	5,3	5,19	5,15	10,62	10,05	91	91,5	234	86,6
Max	1144	0	5,73	5,7	5,68	10,77	10,24	91,6	92	234	90
Різниця	87	0	0,43	0,51	0,53	0,15	0,19	0,6	0,5	0	3,4
M1(.)	1096	0	5,50	5,42	5,39	10,68	10,13	91,25	91,72	234	89,02
$\sigma(.)$	34		0,18	0,21	0,23	0,063	0,061	0,25	0,23	0	1,43
Min	1063	0,4	5,53	5,46	5,36	10,62	10,19	91,25	91,75	234	87,7
Max	1150	0,4	5,81	5,75	5,69	10,75	10,45	91,75	92,3	234	89
Різниця	87	0,4	0,28	0,29	0,33	0,13	0,26	0,5	0,55	0	1,3
M2(.)	1107	0,4	5,67	5,62	5,56	10,68	10,32	91,45	92,03	234	88,47
$\sigma(.)$	33,26		0,105	0,094	0,122	0,057	0,094	0,178	0,227	0	0,573
M2(.) - M1(.)		0,4	0,17	0,20	0,17	0	0,18	0,2	0,30	0	0,545

Висновки. Дослідження процесу прокатки на стані 800 показали, що температура впливає практично однаково на розміри всіх елементів швелера 24, що призведе також до змінення довжини розкатів і появи штанг немірної довжини. Змінення міжвалкового зазору в чистовий кліті можна застосовувати для компенсації впливу температури на розміри прокату. Підвищення точності розмірів прокату забезпечує одночасно підвищення точності довжини розкатів та збільшення виходу штанг мірної довжини.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya temperaturnogo rezhima na razmeri fasonnikh profilei prokata/ A.N. Chernishev, N.I. Beda, G.S. Shcherbina, V.I. Boiko, I.A. Pleten, M.D. Zinchenko // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promishlennost.- 1978. - №4. - S.16-19.
2. Sistema avtomaticheskoi korrektsii nastroiки chistovoi kleti sortovogo stana/ A.N. Chernishev, V.I. Boiko, G.S. Shcherbina, M.D. Zinchenko, V.I. Shibakinskii // Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya proizvodstva. – 1977.-№ 12. - S.34-35.

3. Eksperimentalnoe issledovanie tochnosti protsessa prokatki shvellerov na stane 800/M.D. Zinchenko, G.S. Shcherbina, A.V. Ustimenko, N.D. Grigorenko// Tezisi dokladov i soveshchaniy respublikanskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, "Soyuz nauki i praktiki k 100-letiyu Petrovki", g.Dnepropetrovsk, DmetI. - 1987, - S.109-110.

STUDY OF THE CHISTOVA 800 UNIT AS A TARGET FOR AUTOMATION

Mykhailo Zinchenko, Oleg Potap, Volodymyr Shybakynskyi, Andrii Burchak

Abstract. *The aim of the work is to study the process of rolling flange profiles on the 800 mill. The rolling process on the mill is designed in such a way that the ingot rolled on the blooming mill enters the mill in transit without intermediate heating, is cut into separate parts, which are then successively rolled on the mill. This technology creates a temperature difference between the parts of the ingot, because the temperature of the subsequent parts decreases while the first part is being rolled, which significantly affects the dimensions of the rolled product. The effect of rolling temperature fluctuations and changes in the interroll gap on the dimensions of individual elements of the channel 24 and the rolling length has been studied. It has been shown that by changing the interroll gap in the finishing stand of the mill, it is possible to compensate for the effect of the rolling temperature on the dimensions and increase the accuracy of rolling channels on the 800 mill. Stabilization of the rolled product thickness also leads to stabilization of the rolled product length, which leads to a decrease in the number of rods of unmeasured length.*

Keywords: Accuracy, rolled product dimensions, roll length, temperature, inter-roll gap, bars of irregular length.

ІНТЕРАКТИВНА VR-ЛАБОРАТОРІЯ З ХІМІЇ ДЛЯ ОСВІТНІХ ЗАСТОСУВАНЬ

Ковальчук М.С.¹ [ORCID], Клименко С.В.² [ORCID]

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, студент, Україна

²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,

к.т.н., доцент, Україна

Анотація. У роботі розглядається розробка програмного засобу з інтерактивним середовищем віртуальної реальності, орієнтованого на виконання шкільних завдань з хімії. Основною метою є створення віртуальної лабораторії, що забезпечує наочне, безпечне та інтерактивне навчання з використанням сучасних VR-технологій. Для моделювання об'єктів та оптимізації графічних ресурсів використано програмне забезпечення Blender. Обґрунтовано вибір рушія Unity як базової платформи розробки. Реалізовано інтерактивні елементи віртуальної лабораторії, які адекватно реагують на дії користувача та відтворюють базові фізико-хімічні процеси. Результатом роботи є прототип VR-лабораторії, що дозволяє користувачам взаємодіяти з віртуальним лабораторним середовищем, виконувати навчальні експерименти та підвищувати рівень засвоєння матеріалу за рахунок ефекту занурення. Розроблений підхід може бути використаний у системах дистанційної освіти та як допоміжний інструмент у навчальному процесі.

Ключові слова: віртуальна реальність (VR), інтерактивне навчання, VR-середовище, Unity, Blender, 3D-моделювання, освітні технології, імерсивне середовище, комп'ютерне моделювання, цифрові лабораторії.

Вступ. Метою роботи є створення програмного продукту з інтерактивним середовищем віртуальної реальності, призначеного для підтримки виконання навчальних завдань з хімії у закладах освіти [1]. Для побудови віртуальної лабораторії застосовано програмний комплекс Blender, який забезпечує розробку та оптимізацію тривимірних моделей і текстур з урахуванням обмежень продуктивності. Використання цього інструмента дає змогу сформувати сукупність об'єктів лабораторного середовища, зокрема приладів, обладнання та інтерактивних елементів, необхідних для моделювання навчального процесу [2, 3].

Основний матеріал

Вибір середовища розробки для VR-застосунку є критично важливим етапом, що визначає архітектурні особливості та функціональні можливості системи. У межах роботи проведено порівняльний аналіз платформ Unity та Unreal Engine, за результатами якого обрано Unity як основний інструмент реалізації. Це рішення зумовлене його здатністю підтримувати широкий спектр апаратних платформ, включаючи персональні комп'ютери, мобільні пристрої та VR-пристрої, а також зручністю використання і наявністю розвинутої екосистеми програмних ресурсів [3].

У процесі виконання дослідження розроблено прототип тривимірної віртуальної лабораторії з хімії, що включає ключові компоненти робочого середовища, зокрема лабораторне приміщення, робочі зони та відповідне обладнання, представлені на рисунках 1–3. Створене середовище забезпечує можливість інтерактивної взаємодії користувача з об'єктами та відтворення базових фізико-хімічних процесів у режимі реального часу.

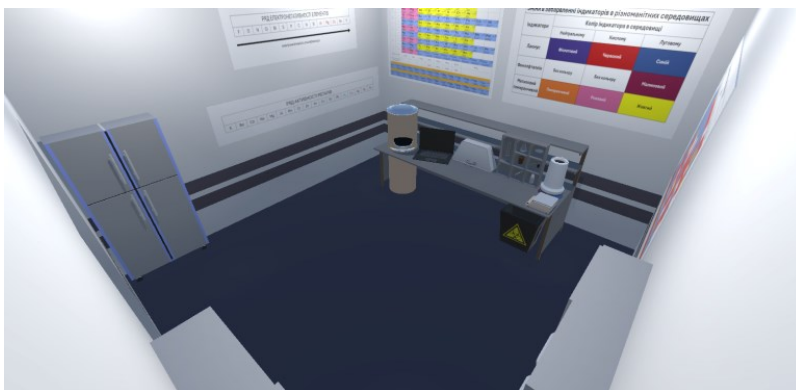


Рисунок 1. – 3D лабораторна кімната, вигляд зверху



Рисунок 2. – 3D лабораторна кімната
(робоче середовище)

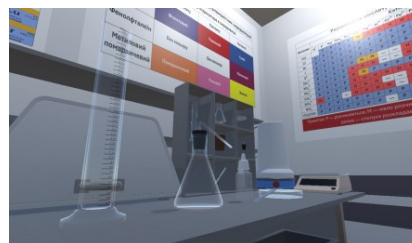


Рисунок 3. – лабораторна кімната
(робоче середовище)

Застосування технологій віртуальної реальності в освітньому процесі суттєво розширює можливості підвищення ефективності викладання природничих дисциплін. Використання програмних засобів, сприяє зростанню

навчальної мотивації, активізації пізнавальної діяльності та формуванню практичних навичок експериментальної роботи.

Узагальнюючи, слід зазначити, що сучасні інформаційно-комунікаційні технології, зокрема віртуальна реальність, є дієвим засобом трансформації освітнього процесу. Їх застосування забезпечує ефективне поєднання теоретичної підготовки з практичною діяльністю за рахунок використання імітаційних моделей навчальних ситуацій. Віртуальні середовища сприяють реалізації ключових дидактичних принципів, зокрема наочності, доступності та безперервності навчання, а також створюють передумови для розвитку дослідницьких умінь, критичного мислення та автономності здобувачів освіти.

Імерсивні властивості VR-технологій забезпечують високий рівень залученості користувачів, інтенсифікують процес сприйняття інформації. Водночас впровадження віртуальних лабораторій дозволяє мінімізувати ризики, пов'язані з проведенням реальних експериментів, оптимізувати витрати на матеріально-технічне забезпечення та забезпечити багаторазове відтворення дослідів у контрольованому середовищі.

Додатково, важливим напрямом розвитку є інтеграція VR-рішень у системи дистанційного та змішаного навчання, що відповідає сучасним тенденціям цифровізації освіти та сприяє підвищенню доступності якісних освітніх ресурсів.

Таким чином, використання сучасних інформаційно-комунікаційних технологій, зокрема технологій віртуальної реальності, виступає ефективним інструментом модернізації освітнього процесу, що забезпечує інтеграцію теоретичних знань із практичними навичками шляхом імітаційного моделювання навчальних ситуацій. Застосування VR-середовищ дозволяє реалізувати принципи наочності, доступності та безперервності навчання, а також створює умови для формування дослідницьких компетентностей, критичного мислення та навичок самостійної роботи здобувачів освіти. Імерсивний характер віртуальної реальності сприяє підвищенню рівня залученості користувачів, інтенсифікації пізнавальної діяльності та покращенню якості засвоєння навчального матеріалу за рахунок

мультисенсорного сприйняття інформації. Інтеграція таких систем у платформи дистанційного та змішаного навчання актуально в умовах цифрової трансформації освіти.

ЛІТЕРАТУРА

1. Зламанюк Л.М. Робочий зошит з хімії, 9 клас – Дніпро.: ТОВ «Інновація», 2018. – 71с.
2. Arijan Belec. Blender 3D Incredible Models – Packt Publishing, 2022. – 387р.
3. Steven Antonio Christian. Enhancing Virtual Reality Experiences with Unity 2022 – Packt Publishing, 2023. – 566р.
4. <https://www.newtonsoft.com/json> - бібліотека для роботи с конфігураційними файлами та контейнерами даних.

INTERACTIVE VR CHEMISTRY LABORATORY FOR EDUCATIONAL PURPOSES

Kovalchuk M. S., Klymenko S. V.

Abstract. *The paper considers the development of a software system with an interactive virtual reality environment designed for performing school chemistry tasks. The main objective is to create a virtual laboratory that provides visual, safe, and interactive learning using modern VR technologies. Blender software is used for object modeling and optimization of graphical resources, enabling the creation of detailed 3D models of laboratory equipment while ensuring a stable frame rate in the VR environment. The choice of the Unity engine as the core development platform is substantiated. Interactive elements of the virtual laboratory have been implemented, which adequately respond to user actions and reproduce basic physicochemical processes. The result of the work is a prototype of a VR laboratory that allows users to interact with a virtual laboratory environment, perform educational experiments, and improve learning outcomes through the immersion effect. The proposed approach can be applied in distance learning systems and as a supporting tool in the educational process.*

Keywords: *virtual reality (VR), interactive learning, VR environment, Unity, Blender, 3D modeling, educational technologies, immersive environment, computer modeling, digital laboratories.*

REFERENCE

1. Zlamanyuk L.M. Chemistry Workbook, Grade 9 – Dnipro.: LLC “Innovation”, 2018. – 71p.
2. Arijan Belec. Blender 3D Incredible Models – Packt Publishing, 2022. – 387p.
3. Steven Antonio Christian. Enhancing Virtual Reality Experiences with Unity 2022 – Packt Publishing, 2023. – 566p.
4. <https://www.newtonsoft.com/json> - library for working with configuration files and data containers.

**СТВОРЕННЯ ПРОГРАМНОГО ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ РОЗРОБЛЕННЯ
ЕФЕКТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВОЛОЧІННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ДРОТУ З
НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ CR-MO-V СТАЛЕЙ**

Олійник Е.В.¹ [ORCID], Парусов Е.В.² [ORCID], Чуйко І.М.³ [ORCID]

¹Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, аспірант, Україна,

²Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, д.т.н.,
старший науковий співробітник, Україна,

³Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України,
к.т.н., старший дослідник, Україна

Анотація. За результатами аналізу даних промислового перероблення дослідних партій бунтового прокату з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей зварювального призначення визначено емпіричний коефіцієнт модифікованого рівняння Туленкова-Золотнікова, який враховує фактичний хімічний склад металу та його структурний стан. Із використанням встановлених закономірностей розроблено спеціалізований модуль програмної оболонки CalcRoutes для прогнозування енергосилових параметрів процесу волочіння та механічних властивостей холоднодеформованого зварювального дроту. Це дає змогу розраховувати маршрути волочіння, визначати кінематичну схему витяжки прокату, швидкість волочіння, границю міцності сталі після проходження через кожний із осередків деформації, коефіцієнт навантаження на електродвигуни, сумарну потужність волочіння та продуктивність виробництва дроту з урахуванням фонду робочого часу. Отримані дані можуть бути використані фахівцями металовиробних підприємств під час розроблення та вдосконалення технології виготовлення дроту зварювального призначення з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей.

Ключові слова: бунтовий прокат, зварювальний дріт, волочіння, механічні властивості, моделювання

Вступ. Бунтовий прокат є переробною заготовкою, яка у подальшому піддається холодному деформуванню волочінням під час виготовлення сталевих дротів. При цьому границя міцності використовується як критерій для розрахунку необхідних тягових зусиль волочильного обладнання і попереднього оцінювання деформаційного зміцнення металу в процесі виробництва дроту.

Визначення залежності зміцнення металу від технології волочіння та створення на цих засадах інженерних методик розрахунку механічних властивостей холоднодеформованого дроту є одним з актуальних завдань металовиробного переробу. Зростання показників міцності сталей у процесі холодного деформування насамперед пов'язане з підвищенням густини дислокацій у кристалічній ґратці та механізмами протидії їхньому переміщенню. Вміст легувальних елементів чинить суттєвий вплив на ступінь закріплення дислокацій, що генеруються холодним деформуванням. Додатковим фактором впливу на процеси деформаційного зміцнення є структурний стан металу (тип і об'ємна частка структурних складників, дисперсність окремих фаз, розмір зерен тощо).

В Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України створена комп'ютерна програма CalcRoutes [1], яка дозволяє прогнозувати енергосилові параметри процесу волочіння і визначати механічні властивості переробної дротяної заготовки та готового дроту в залежності від якості вихідного прокату. Розрахунок границі міцності дроту базується на рівнянні Туленкова-Золотнікова, яке було модифіковане шляхом введення емпіричного коефіцієнту k , що враховує хімічний склад і структурний стан сталі та, відповідно, рівень її деформаційного зміцнення під час прямого (без знеміцнювального термічного оброблення дротяної заготовки на проміжному діаметрі) холодного деформування волочінням [2]:

$$R_m^{dp} = k \cdot R_m^{np} \cdot \sqrt{\frac{D}{d}} \quad (1)$$

де R_m^{dp} – границя міцності дроту, МПа; R_m^{np} – границя міцності бунтового прокату, МПа; k – емпіричний коефіцієнт, що враховує хімічний склад сталі та її структурний стан; D – діаметр бунтового прокату, мм; d – діаметр дроту, мм.

Наразі база даних програми CalcRoutes дозволяє симулювати процес волочіння бунтового прокату з високовуглецевих сталей перлітного класу та низьковуглецевих нелегованих сталей з феритною структурою. Отже, актуальним завданням є доповнення існуючої бази даних відомостями про деформаційне зміцнення під час волочіння різних типів легованих сталей відповідального призначення, зокрема бунтового прокату для виготовлення

зварювального дроту з Cr-Mo-V сталей. При цьому визначення залежності коефіцієнту k для рівняння (1) від фактичного хімічного складу різних типів сталей та структурного стану бунтового прокату перед початком холодного деформування можливе лише через статистичне оцінювання результатів перероблення прокату в дріт у реальних промислових умовах.

Мета роботи – визначити параметри розрахункової моделі та створити спеціалізований модуль комп'ютерної програмної оболонки CalcRoutes для розроблення ефективної технології волочіння дроту зварювального призначення з Cr-Mo-V сталей.

Матеріал і методика дослідження. Для проведення статистичного аналізу використано результати промислового перероблення у зварювальний дріт 34 плавок (~ 3638 т) бунтового прокату діаметром 5,5 мм зі сталей Св-08ХГСМФА, Св-08ХГ2СМФ, Св-10ХГ2СМФ та їх аналогів. Бунтовий прокат піддавали холодному пластичному деформуванню до кінцевого діаметру 1,2–3,0 мм на волочильних станах різних конструкцій методом прямого волочіння без проведення додаткового рекристалізаційного відпалу дротяної заготовки на проміжному діаметрі.

Для металографічного аналізу структури прокату в стані постачання використовували оптичний мікроскоп Zeiss Axiovert 200M MAT (Німеччина). Границю міцності металу визначали на натурних зразках (без механічного оброблення) відповідно до ДСТУ ISO 6892-1:2019 на розривних машинах Р-20М2 (Україна), Instron TTDM-5004 (США), Amsler 1033 (Німеччина). Механічним випробуванням піддавали контрольні зразки, що були відібрані від бунтового прокату, дротяної заготовки проміжних діаметрів та готового зварювального дроту. Розрахункове моделювання та статистичне оброблення експериментальних даних (регресійний аналіз) проводили з використанням персонального комп'ютера із залученням програмних пакетів Microsoft Excel та OriginPro.

Результати. Статистична характеристика контрольних показників якості досліджуваних плавок бунтового прокату наведена у таблиці.

У якості вихідних даних у програмній оболонці використовують діаметри прокату і дроту, границю міцності металу в стані постачання, кількість осередків деформації (блоків волочильного стана), інтегральний показник хімічного складу сталі (вуглецевий еквівалент), структурний параметр прокату (об'ємна частка бейнітно-мартенситних структур у феритній матриці) та потужність електродвигунів.

Висновки. За результатами промислових випробувань із використанням методів розрахункового моделювання та статистичного оброблення масиву експериментальних даних створено спеціалізований модуль програмної оболонки CalcRoutes, який дозволяє в автоматичному режимі проводити побудову ефективних маршрутів волочіння прокату, визначати границю міцності сталі після кожного з осередків деформації, навантаження на електродвигуни, сумарну потужність волочіння та продуктивність виробничого процесу під час виготовлення холоднодеформованого дроту зварювального призначення з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей.

ЛІТЕРАТУРА

1. Парусов Е. В. Прогнозування енергосилових параметрів волочіння та механічних властивостей холоднодеформованого дроту з високовуглецевих сталей. Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні : матер. X міжнар. наук.-практ. конф., м. Дніпро, 27-29 березня 2018 р. Дніпро : НМетАУ, 2018. С. 31.
2. Парусов Е. В., Чуйко І. М., Олійник Е. В., Парусов О. В. Аналіз тенденцій та проблем виробництва прокату і дроту з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей зварювального призначення. Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. 2024. Вип. 38. С. 431–454. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-431-454>

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE TOOL FOR THE DESIGN OF AN EFFICIENT DRAWING PROCESS FOR WELDING WIRE MADE OF LOW-CARBON CR-MO-V STEELS

Eduard Oliinyk, Eduard Parusov, Ihor Chuiko

Abstract. *Based on the analysis of data from the industrial processing of experimental batches of wire rod made of low-carbon Cr-Mo-V steels intended for the production of welding wire, an empirical coefficient of the modified Tulenkov-Zolotnikov equation was determined that takes into account the actual chemical composition of the metal and its*

structural state. Using the established relationships, a specialized module of the CalcRoutes software package was developed for predicting the energy-force parameters of drawing and the mechanical properties of cold-deformed welding wire. This makes it possible to calculate drawing routes, determine the kinematic scheme of wire rod elongation, drawing speeds, the ultimate tensile strength of the steel after passing through each deformation zone, the load factor of electric motors, the total drawing power, and wire production capacity taking into account the available working time fund. The obtained data can be used by specialists of hardware plants during the development and improvement of the technology for producing welding wire from low-carbon Cr-Mo-V steels.

Keywords: *wire rod, welding wire, drawing, mechanical properties, modeling*

REFERENCE

1. Parusov E. V. Prohnozuvannia enerhosiulyovkykh parametriv volochinnia ta mekhanichnykh vlastyvostei kholodnodeformovanoho drotu z vysokovuhletsevykh stalei. Informatsiini tekhnolihii v metalurhii ta mashynobuduvanni : mater. X intern. sci. tech. conf., Dnipro, March 27-29, 2018. Dnipro : NMetAU, 2018. P. 31. [in Ukrainian].
2. Parusov E. V., Chuiko I. M., Oliinyk E. V., Parusov O. V. Analiz tendentsii ta problem vyrobnytstva prokatu i drotu z nyzkovuhletsevykh Cr-Mo-V stalei zvarivvalnoho pryznachennia. Fundamentalni ta prykladni problemy chornoj metalurhii. 2024. Vol. 38. P. 431–454. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-431-454>

ПРОГНОЗУВАННЯ ПЛАВКОСТІ СПЕЦІАЛЬНИХ СТАЛЕЙ НА ОСНОВІ КОНЦЕПЦІЇ СПРЯМОВАНОГО ХІМІЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Тогобицька Д.М.¹ [ORCID], Поворотня І.Р.² [ORCID], Кукса О.В.³ [ORCID],
Ходотова Н.Є.⁴ [ORCID]

¹Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН, д.т.н., проф., України,

²Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН, н.с., к.т.н., України,

³Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН, н.с., к.т.н., України,

⁴Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН, м.н.с., України,

Анотація. Нагальним питанням сьогодення є генерація та розробка інноваційних технологічних рішень направлених на підвищення якості металопродукції, розширення експлуатаційних можливостей сталей та сплавів спеціального призначення, що супроводжується раціональним використанням енергетичних, сировинних запасів та задовільняють невпинно зростаючі потреби споживачів. Внутрішньодержавним питанням є утримання належного рівня вітчизняної металургійної галузі, як запоруки розвитку та стабілізації економіки у мінливих умовах. У зв'язку з цим в роботі розглянуто нержавіючі сталі (вміст Cr до 26%, Ni до 20%), як найбільш затребувані на металургійному ринку. Підґрунтям для проведення моделювання обрана оригінальна концепція спрямованого хімічного зв'язку, ядром якої є розгляд металевих розплавів, як хімічно єдиних систем. Розроблено адекватну математичну модель для прогнозування температури ліквідус хромо-нікелевих сталей на основі інтегральних параметрів міжатомної взаємодії ($R^2 \geq 0,95$). Результати досліджень рекомендуються до використання в науково – дослідних та промислових умовах з метою спрямованого формування складу та властивостей продуктів плавки, а також зниження енергетичних витрат за допомогою інтеграції розроблених моделей в АСНД сталеплавильного виробництва.

Ключові слова: нержавіючі сталі, спеціальні сталі, параметри міжатомної взаємодії, якість металу, прогнозування, моделі

Нержавіючі сталі є стратегічними матеріалами сучасної індустрії, завдяки унікальному поєднанню фізико-хімічних, механічних та корозійних властивостей, які визначають їх широке використання у хімічній, харчовій, енергетичній та машинобудівній промисловості. Світове споживання нержавіючої сталі постійно зростає, а серед країн лідерів виробництва якісного

металу Китай, Японія, США все напруженіша конкуренція та боротьба за першість. Україна історично має потужну базу виробництва спеціальних сталей на провідних підприємствах країни, зокрема ПрАТ «Дніпрспецсталь», ПАТ «Запоріжсталь», ТОВ «Інтерпайп Україна». Значний потенціал розвитку виробництва нержавіючих сталей пов'язаний у першу чергу з можливістю модернізації наявних електросталеплавильних печей, впровадженню нових технологічних схем виробництва, що забезпечить контролювання складу сталі та зменшення шкідливих домішок, підвищення якості металу, а отже і конкурентоздатності.

Наразі незважаючи на існуючий потенціал, виробництво нержавіючих сталей в Україні зіштовхується з жорсткими викликами сучасності [1, 2]. Ключовою проблемою для повноцінної роботи металургійного сектору є війна, яка призвела до часткової втрати промислових підприємств, частина працює під обстрілами, які призводять до пошкоджень цехів, а іноді і тимчасової зупинки підприємств. Виробництво нержавіючих сталей є дуже енергоємним процесом, а постійні пошкодження енергетичної інфраструктури України створюють відчутний дефіцит електроенергії, що критично відображається на роботі електродугових печей та підвищенні собівартості металу. Україна не має значних власних родовищ легуючих елементів для виробництва нержавіючих сталей, зокрема йдеться про нікель, молібден, хром, тому вони імпортуються, таким чином формується сировинна залежність. До перешкод також слід віднести і кадрову нестачу кваліфікованих металургів виробничників, у зв'язку з значною міграцією населення та процесами мобілізації. Особливо відчутним для української металургійної промисловості є новий критерій щодо імпорту сталі у країни ЄС, який стосується рівня викидів CO₂, що є ознакою необхідності значних інвестицій у «зелену металургію», які є мабуть не зовсім на часі.

З огляду на ці обставини одним із шляхів по адаптуванню металургійної промисловості щодо заявлених перешкод слід розглянути спосіб ефективного використання легуючих добавок за рахунок точного прогнозування властивостей через призму моделей для сталей і добавок (температури

плавлення та кристалізації, щільності, теплопровідності та інших) на основі концепції спрямованого хімічного зв'язку, що сприятиме зниженню як енергетичних, так і витрат самої добавки на виробництво завдяки науково вірно обґрунтованому її підбору. Розробка моделей здійснюється на основі концепції спрямованого хімічного зв'язку [3]. Головна ідеологія, що робить її унікальним інформаційно-алгоритмічним апаратом оформленим у програмні комплекси «Metal» та «Slag», полягає у розгляді металургійних розплавів, як хімічно єдиних систем, а не просто механічної суміші складових та вираженню їх зв'язків в інтегральних параметрах міжатомної взаємодії: Z^y – параметр зарядового стану системи, e ; d – середньостатистична між'ядерна відстань, 10^{-1}нм ; $tg\alpha$ – константа для кожного елементу, яка характеризує градієнт зміни радіусу іона при зміні його заряду; ρ_1 – спрямована зарядова щільність, $e/\text{нм}$.

Аналіз взаємозв'язків параметрів міжатомної взаємодії з температурою плавлення нержавіючих сталей за даними роботи [4] дозволили встановити найбільш інформативні (рис.1). Температура плавлення суттєво залежить від співвідношення елементів хрому та нікелю, що відображено параметром міжатомної взаємодії – $tg\alpha$. На рис.1 сформувались три області, в залежності від числових значень співвідношення Cr/Ni відбувається відхилення від тренду 1, при його збільшенні до тренду 2 та зменшенні температури плавлення, а при зменшенні співвідношення до тренду 3 та зростанню температурних показників, що може ймовірно бути використано, як спосіб класифікації сталей по хромо-нікелевій частці. На основі результатів проведеного кореляційно – регресійного аналізу для прогнозування властивостей досліджуваної вибірки даних розроблена модель: $T_{\text{лікв}} = 10^3 \times (3,317 - 0,209Z^y - 17,458tg\alpha)$, з достатньою точністю прогнозу ($R^2=0,95$) для інтеграції у АСУТП сталеплавильного виробництва.

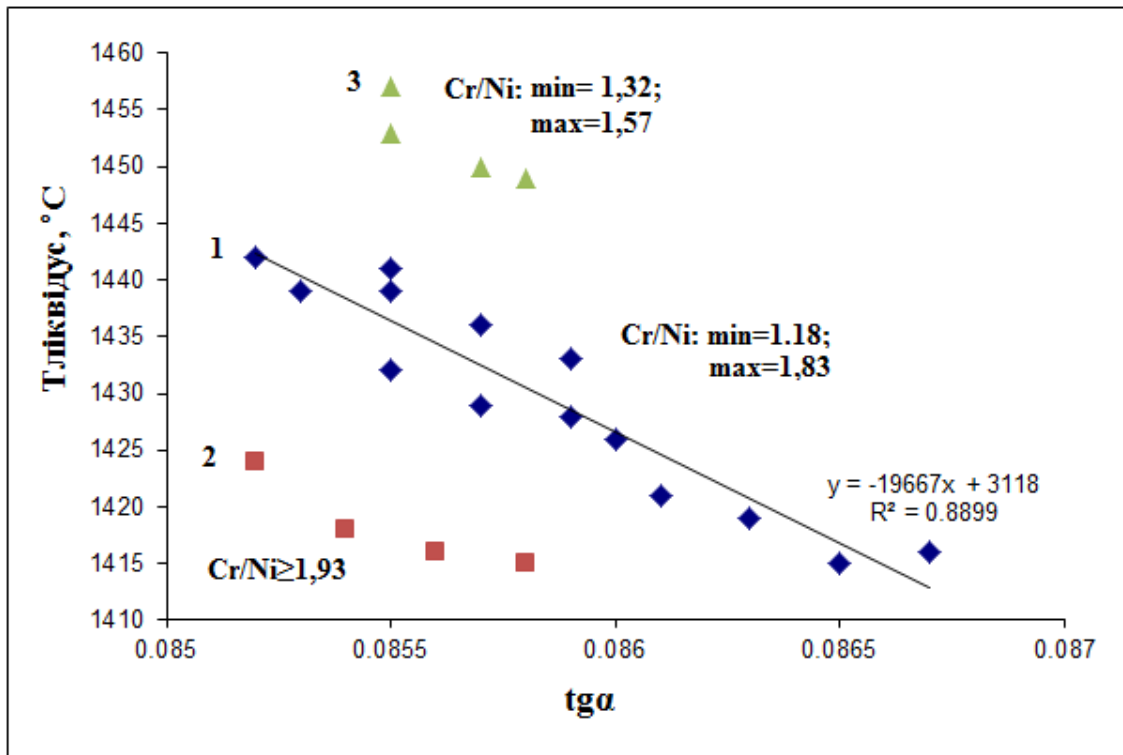


Рисунок 1 - Залежність температури ліквідус від параметру міжатомної взаємодії (tga)

Розроблена модель входить у склад створеного комплексу базових моделей для прогнозування першочергових фізико-хімічних і теплофізичних властивостей металевих розплавів з метою створення засад для ефективного використання добавок і одержання високоякісного металу, що відповідає міжнародним вимогам та є конкурентоздатним не лише на українському металургійному ринку, а також на закордонному.

Висновок. Температурний режим плавки та розливання спеціальних сталей та сплавів впливає на ефективність протікання реакцій між металом та шлаком, ступінь засвоєння легуючих або модифікуючих добавок, утворення неметалевих включень та газів, механічні та фізико-хімічні властивості металу. Знання та оперативні методи визначення температури ліквідус, що враховують хімічний склад сталі та міжатомну взаємодію між компонентами розплаву, дають можливість уникнути перегріву металу, підвищити його якість та дати рекомендації щодо оптимального температурного режиму плавки, що особливо цінно в сучасних реаліях металургійної промисловості.

ЛІТЕРАТУРА

1. Забашта Є.Ю., Демченко К.В. «Розвиток металургійного комплексу в Україні: кризова адаптація та стратегія «зеленої» відбудови». Економіка та суспільство, вип. 80, 2025. <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/6843>.
2. Gryshchenko S.G., Proidak Yu.S., Ponomarenko R.V., Kravchenko A.P., Kalenkov O.F., Kudriavtsev S.L. (2025). Ukrainian steel and ferroalloys in 2022-2024: how russian aggression has impacted on the work of the country's metallurgical industry. Theory and Practice of Metallurgy, (1), 31–35. <https://doi.org/10.15802/tpm.1.2025.04>
3. Togobitska D. and Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the «Metal-Slag» system based on interatomic interaction parameters // Lithuanian Journal of Physics. Vol.64, No.1, pp.58-71 (2024). <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>
4. G. ALLAN «Castability, solidification mode and residual ferrite distribution in highly alloyed stainless steels», ECSC research project, EUR13941, European Communities, Luxembourg 1997.

PREDICTION OF THE FUSIBILITY OF SPECIAL STEELS BASED ON THE CONCEPT OF DIRECTED CHEMICAL BONDING

Daria Togobitska, Iryna Povorotnia, Volodymyr Kuksa, Nadiya Khodotova

Abstract. *The urgent issue of today is the generation and development of innovative technological solutions aimed at improving the quality of metal products, expanding the operational capabilities of special-purpose steels and alloys, which is accompanied by the rational use of energy and raw material reserves. In this regard, the work considers stainless steels, as the most demanded in the metallurgical market. The basis for modeling was chosen original concept of directed chemical bonding. An adequate mathematical model for predicting the liquidus temperature of chromium-nickel steels based on the integral parameters of interatomic interaction was developed ($R^2 \geq 0.95$). The results of the research are recommended for use in scientific research and industrial conditions for the purpose of directed formation of the composition and properties of smelting products, as well as reducing energy costs by integrating the developed models into Automated systems of scientific research of steelmaking.*

Keywords: *stainless steels, special steels, interatomic interaction parameters, metal quality, prediction, models*

REFERENCE

1. Zabashta E.Yu., Demchenko K.V. «Development of the metallurgical complex in Ukraine: crisis adaptation and strategy of «green» reconstruction». Economy and Society, issue 80, 2025. <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/6843>. [in Ukrainian].
2. Gryshchenko S.G., Proidak Yu.S., Ponomarenko R.V., Kravchenko A.P., Kalenkov O.F., Kudriavtsev S.L. (2025). Ukrainian steel and ferroalloys in 2022-2024: how russian

aggression has impacted on the work of the country's metallurgical industry. Theory and Practice of Metallurgy, (1), 31–35. <https://doi.org/10.15802/tpm.1.2025.04>

3. Togobitska D. and Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the «Metal-Slag» system based on interatomic interaction parameters //Lithuanian Journal of Physics. Vol.64, No.1, pp.58-71 (2024). <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>

4. G. ALLAN «Castability, solidification mode and residual ferrite distribution in highly alloyed stainless steels», ECSC research project, EUR13941, European Communities, Luxembourg 1997.

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ КУТОВОГО ПРЕСУВАННЯ БІМЕТАЛЕВИХ ПРОФІЛІВ

Бобух О.С.¹ [ORCID], Зятіна В.І.² [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

²Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

Анотація. Розглянуто та узагальнено інноваційний метод кутового гарячого пресування біметалевих профілів, описаний у патенті «Спосіб кутового пресування біметалевих профілів». Метод передбачає попереднє деформування основного металу за рахунок тертя у конічній частині верхнього інструменту (кут 20–40°) для руйнування оксидного шару та покращення зчеплення з покриваючим металом. Спосіб включає з'єднання матеріалів у волочильній зоні шляхом гарячого обтиснення, а також застосування рухомого дна пуансона для зменшення зусиль пресування. Запропоноване рішення зорієнтовано на сплави алюмінію з міді чи нержавіючої сталі. Описано принципи та переваги процесу в контексті сучасних технологій виготовлення біметалів.

Ключові слова: кутове пресування, біметали, рухоме дно, оксидний шар, гаряче видавлювання.

Вступ

Обробка тиском двох взаємозчеплених металів (біметалів) є ефективним способом отримання міцних профілів зі співвідношенням властивостей різних матеріалів. Одним з основних промислових методів отримання біметалів є спільне гаряче прокатування пакета з різноматеріальних шарів, яке забезпечує міцне з'єднання шарів по контактних поверхнях [1]. Крім того, існує багато варіантів гарячого видавлювання для отримання круглих та фасонних профілів; принципово розрізняють пресування з поперечною та поздовжньою шаруватістю. У таких технологіях часто виникає потреба у попередній обробці поверхонь (очищення, нагрівання) для руйнування оксидного шару та поліпшення зчеплення.

У запропонованому способі здійснюють кутове гаряче пресування біметалевих профілів шляхом послідовного деформування основного

(підкладного) та покриваючого металів. Основні кроки методу можна представити так [2]:

1. **Попереднє деформування основного металу:** за рахунок тертя у верхній конусній частині пуансона (кутом $20-40^\circ$) базовий метал попередньо деформується перед контактом з покриваючим. Це сприяє руйнуванню оксидної плівки на його поверхні завдяки інтенсивному місцевому нагріву і тертю.
2. **З'єднання у волочильній зоні:** в зоні пониження перерізу ("волочіння") після конусної деформації виконується остаточне гаряче обтиснення заготовок. За рахунок руйнування оксидного шару контакту та подальшої високотемпературної деформації забезпечується міцне металургійне зчеплення матеріалів, що відрізняються механічними властивостями.
3. **Деформація у матриці із рухомим дном:** основний метал формують у матриці з великим кутом відходження (α), а пуансон оснащують рухомим дном. Така конструкція дозволяє знизити сили опору течії металу та зменшити загальне зусилля пресування. Рухоме дно забезпечує ефект зниження тертя між заготівкою і стінками прес-формі, що призводить до зменшення тиску на матеріал.
4. **Матеріали заготовки:** як підкладний (основний) метал використовується алюміній, а як покриваючий – мідь або нержавіюча сталь. Комбінації Al–Cu або Al–Cr–Ni (сталь) обрані через їхню сумісну деформівність при гарячій обробці і корисні властивості (низька щільність алюмінію, висока провідність міді тощо).

Обговорення та результати

Запропоноване рішення об'єднує кілька ефективних прийомів: попереднє конусне деформування і руйнування оксиду, волочильну зону для гарячого обтиснення, а також рухоме дно для зменшення тиску. Такі підходи успішно застосовуються при виробництві біметалевих профілів. Наприклад, відомо, що видавлювання з поздовжньою шаруватістю передбачає одночасне проштовхування двох матеріалів в матрицю з сердечником, а розробка контактних поверхонь (зрізання, фрезерування) сприяє міцному зчепленню шарів [1].

Попередні дослідження показали, що оптимальний кут матриці залежить від умов процесу: із збільшенням співвідношення екструзії та коефіцієнта тертя оптимальний півкут матриці зростає. У запропонованому методі вибрано верхній конусний інструмент із кутом $20-40^\circ$ [2], що відповідає помірному напівкуту видавлювання. Це близько до напівкутів $\approx 60^\circ$, які часто

використовують у дослідженнях біметалевих екструзій завдяки сприятливому розтіканню матеріалу [3].

Використання рухомого дна демонструє ефект зниження сил пресування. Аналогічний принцип спостерігається при зворотному пресуванні: оскільки заготовка не переміщується всередині контейнера, сили тертя практично відсутні і необхідне зусилля значно зменшується. У нашому методі рухоме дно виконує схожу роль – зменшуючи тертя і підвищуючи ефективність процесу [2]. Зокрема, відомо, що при зворотному пресуванні ділянка течії металу переміщується в бік пуансона, а матриця з контейнером рухаються, що усуває контакт між заготівкою та стінками і знижує силу видавлювання, що відображає рис.1.

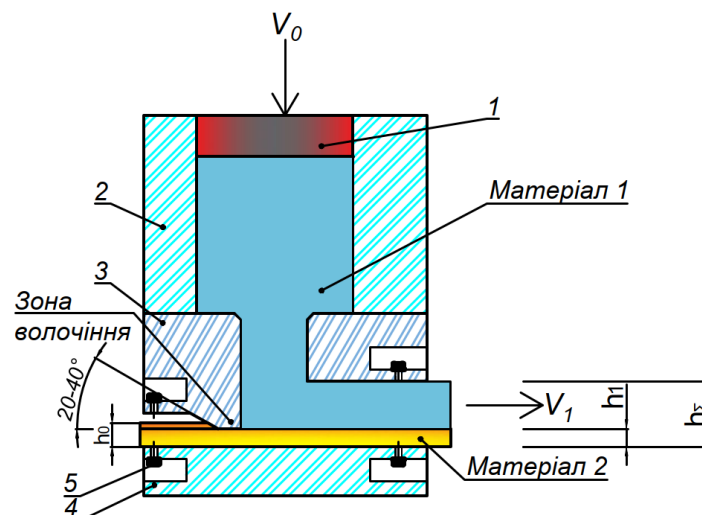


Рисунок 1 – Схема пропонуваного деформуючого інструменту
де, 1 – плунжерна частина приладу; 2 – вихідний канал (корпус подачі матеріалу 1);
3 – формуючий корпус заготовки (канал подачі матеріалу 1); 4 – нижня пластина пристрою, рухома
(канал подачі матеріалу 2); 5 – регулювальний пристрій (кроковий механізм).

Загалом, запропонований спосіб дозволяє створювати біметалеві профілі зі стабільною якістю з'єднання шляхом комбінування термічної активації поверхні (руйнування оксидного шару) та оптимізації геометрії інструмента (конусний пуансон, рухоме дно). Це узгоджується з сучасними результатами, які показують важливість високих екструзійних відношень та правильного вибору кута матриці для утворення бездефектного інтерфейсу біметалу.

Процес кутового пресування визначається зв'язаною взаємодією технологічних параметрів і матеріалознавчих факторів, які в сукупності

формують умови пластичної деформації, механізми утворення з'єднання та подальшу мікроструктурну еволюцію композитної системи.

Отримані результати свідчать, що процес принципово контролюється рядом ключових технологічних інструментів, які становлять предмет подальших досліджень: комбінація матеріалів, характер поверхневої взаємодії, геометричні параметри компонентів, зміна геометрії та мікроструктурно-механічних властивостей деформованих компонентів у процесах з'єднання та термічної обробки.

Узагальнено зазначені фактори формують систему керування процесом кутового пресування, яка визначає як кінетику формування з'єднання, так і кінцевий мікроструктурний стан обробленого матеріалу. Їх взаємопов'язана дія потребує системного дослідження для забезпечення прогнозованого керування структурно-властивісними характеристиками в рамках дослідження.

Висновки

Проведено аналіз методу кутового гарячого пресування біметалевих профілів із рухомим дном. Метод поєднує конусне попереднє деформування та гаряче обтиснення в зоні волочіння, що забезпечує руйнування оксидних плівок та високу якість з'єднання дисимілярних металів. Застосування рухомого дна дозволяє суттєво зменшити робочі зусилля, оскільки аналогічно зворотному екструзуванню усувається значна частина тертя під час деформації. У результаті запропонований спосіб удосконалює процес кутового видавлювання біметалів і може бути рекомендований для виготовлення довговічних алюмінієво-мідних або алюмінієво-сталевих профілів з покращеними механічними властивостями.

ЛІТЕРАТУРА

1. А.М. Бенъ «Особенности формирования біметалевих заготовок методами обробки тиском», Вісник Запорізької політехніки, 2021, с. 88–89.
2. Зятіна В.І., Медведєв М.І., Бобух О.С., Самсоненко А.А., Спектор С.С. Спосіб кутового пресування біметалевих профілів : пат. 161837 Україна, МПК В21С 37/00 ; заявл. у 2025 02800 ; зареєстр. в Державному реєстрі України корисних моделей 07.01.2026 ; опубл. 07.01.2026, Бюл. № 1.
3. Optimization of the Indirect Extrusion Process of Copper-Clad Aluminum Rods by Methods of Statistical Experimental Designs and Numerical Analyses / S. Lechner та ін. Frontiers in Materials. 2021. Т. 8. URL: <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.663306>

IMPROVEMENT OF THE ANGULAR PRESSING PROCESS FOR BIMETALLIC PROFILES

Oleksandr Bobukh, Vitalii Ziatina

Abstract. *An innovative method of angular hot pressing of bimetallic profiles, described in the patent “Method of Angular Pressing of Bimetallic Profiles,” is considered and summarized. The method involves preliminary deformation of the base metal through friction in the conical section of the upper tool (cone angle 20–40°), which enables the disruption of the oxide layer and improves bonding with the cladding metal. The process includes material joining within the drawing zone by means of hot upsetting, as well as the application of a movable die bottom to reduce the required pressing force. The proposed solution is primarily intended for aluminum alloys in combination with copper or stainless steel. The principles and advantages of the process are described in the context of modern bimetal manufacturing technologies.*

Keywords: *angular pressing, bimetals, movable die bottom, oxide layer, hot extrusion.*

REFERENCE:

1. Ben A.M. Features of the formation of bimetallic billets by metal forming methods, Bulletin of Zaporizhzhia Polytechnic, 2021, pp. 88–89.
2. Ziatina V.I., Medvediev M.I., Bobukh O.S., Samsonenko A.A., Spektor S.S. Method of angular pressing of bimetallic profiles: Patent 161837 Ukraine, IPC B21C 37/00; filed u 2025 02800; registered in the State Register of Utility Models of Ukraine on 07.01.2026; published 07.01.2026, Bulletin No. 1.
3. Lechner S. et al. Optimization of the indirect extrusion process of copper-clad aluminum rods by methods of statistical experimental designs and numerical analyses. Frontiers in Materials, 2021, Vol. 8. Available at: <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.663306>

СЕКЦІЯ 3

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ
СКЛАДНИХ СИСТЕМ**

SECTION 3

MATHEMATICAL MODELING AND DESIGN OF COMPLEX SYSTEMS

МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПЕРЕДОБРОБКИ 3D СЕЙСМІЧНИХ ДАНИХ

Дмитрієва І.С.¹ [ORCID], Дмитренко А.М.² [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, України

²Український державний університет науки і технологій, аспірант, України

Анотація. У роботі досліджено сучасні методи автоматизованої передобробки 3D сейсмічних даних, спрямованих на підвищення якості геофізичної інтерпретації. Детально розглянуто характерні риси таких даних, через які виникає необхідність попереднього опрацювання: наявність сильних шумів, неоднорідність фізичних властивостей середовища та обробка великих масивів інформації. Описано традиційні підходи до передобробки, зокрема фільтрацію, нормалізацію, інтерполяцію, вирівнювання сигналів та методи їх підсилення. Значна увага зосереджена на інноваційних технологіях машинного навчання, включаючи використання згорткових нейронних мереж, автоенкодерів і генеративних моделей. Розглянуто перспективи автоматизації процесів передобробки за допомогою оптимізаційних алгоритмів та платформ AutoML. У підсумках виділено ключові переваги, існуючі обмеження та окреслено можливості подальшого розвитку гібридних підходів у даній галузі.

Ключові слова: 3D сейсмічні дані, передобробка, машинне навчання, шумофільтрація, інтерполяція, нейронні мережі, AutoML.

Вступ. Наукові дослідження глибинних пластів Землі у сучасності суттєво збагачуються завдяки вдосконаленим методикам використання сейсмічних даних, які слугують основою для отримання вичерпних відомостей про внутрішню структуру і геологічні взаємозв'язки підповерхневих утворень. Серед широкого спектра таких методів особливо важливу роль відіграють тривимірні (3D) сейсмічні моделі, створені на основі акустичних хвиль, що відбиваються від різних шарів земної кори. Ці зображення дозволяють створювати детальні просторово-часові репрезентації геологічних об'єктів, що відкриває нові можливості для їх комплексного аналізу й глибокого розуміння.

Прогрес у розвитку технологій, спрямованих на збір, передачу та збереження інформації, кардинально змінив реалії роботи з сейсмічними даними, збільшуючи їх обсяги до вражаючих масштабів, які вимірюються сьогодні терабайтами і навіть петабайтами. Такий безпрецедентний ріст обсягу

даних приносить не лише нові переваги, а й значні виклики, що стають ключовими для сучасних обчислювальних систем. Особливу увагу слід приділити проблемам ефективної обробки та аналізу цих величезних інформаційних масивів, які обтяжуються високим рівнем шумів, наявністю артефактів, пропущених даних і структурних неоднорідностей. Подібні складнощі значно ускладнюють роботу з даними та реконструкцію моделей земної кори.

У цьому контексті передобробка сейсмічних записів набуває критичного значення, стаючи фундаментально важливим кроком на шляху забезпечення якості та достовірності отриманих результатів. Від цього етапу залежить адекватність побудови геологічних моделей та успішність прийняття стратегічних рішень у галузі розвідування родовищ корисних копалин. Автоматизована обробка первинної інформації не лише скорочує часові витрати та підвищує продуктивність аналітичного процесу, але й сприяє досягненню більшої точності, відтворюваності результатів та гармонізації алгоритмів із характеристиками конкретних інформаційних масивів. Це дозволяє забезпечити більш ефективний підхід до досліджень і практичного використання підповерхневих ресурсів.

Метою цього дослідження є проведення всебічного аналізу сучасних методологічних підходів до автоматизованої попередньої обробки тривимірних (3D) сейсмічних зображень із детальним вивченням їхніх переваг, обмежень, а також перспектив подальшого вдосконалення технологій.

Тривимірні сейсмічні дані являють собою великомасштабні об'ємні масиви інформації, що відображають просторовий розподіл акустичних властивостей гірських порід у земній корі. Кожен воксель цього масиву репрезентує амплітуду сигналу, відбитого в певній точці підповерхневого середовища, що дозволяє створити високоточну модель геологічної структури досліджуваного регіону.

До ключових характеристик таких даних належать кілька важливих аспектів. По-перше, це їхній значний обсяг, який потребує високопродуктивних обчислювальних ресурсів. По-друге, у даних часто

присутні як випадкові шуми, так і систематичні когерентні перешкоди, що ускладнює подальший аналіз. По-третє, структура сигналів є багат шаровою та складною, що зумовлено специфічними геологічними умовами регіону дослідження. Крім того, слід враховувати значну неоднорідність фізичних властивостей гірських порід, а також типові недоліки вхідної інформації — такі як пропуски або спотворення, спричинені технологічними обмеженнями при зборі даних.

Саме ця сукупність викликів підкреслює критичну важливість етапу попередньої обробки 3D-сейсмічних даних. Якісно виконана обробка є вирішальною для забезпечення точності та достовірності подальшої геофізичної інтерпретації, що на пряму впливає на успішність вивчення геологічної структури та властивостей земної кори.

Сейсмічні дані за своєю природою відзначаються низьким співвідношенням сигналу до шуму та високим рівнем кореляції між сусідніми трасами. Ці специфічні характеристики створюють значні труднощі під час їхньої обробки, що вимагає розробки та застосування спеціальних методів передобробки.

Процес передобробки тривимірних сейсмічних даних охоплює декілька взаємозалежних етапів, спрямованих на підготовку інформації до подальшого аналізу. До основних процедур цього процесу належать фільтрація шуму, нормалізація сигналів, інтерполяція пропущених значень, вирівнювання сигналів і посилення корисної складової. Ключовим елементом для досягнення ефективності всіх цих операцій є використання адаптивних алгоритмів, які враховують як статистичні властивості даних, так і їхні структурні особливості.

Серед усіх етапів, особливо важливим є фільтрація шуму, адже її якість суттєво впливає на точність усіх наступних аналітичних процедур. Методи фільтрації можна умовно поділити на дві групи: лінійні та нелінійні підходи.

Лінійні методи включають такі традиційні техніки, як ковзне середнє, гауссівські фільтри та фільтри низьких частот. Їхні основні переваги полягають у простоті реалізації і невисокій вимогливості до обчислювальних ресурсів.

Однак ці методи часто призводять до надмірного згладжування сигналу, через що можуть губитися важливі дрібні деталі.

Нелінійні методи, як-от медіанні та адаптивні фільтри, забезпечують краще збереження структури сигналу і демонструють особливу ефективність у боротьбі з імпульсним шумом. Водночас вони потребують значно більше обчислювальних ресурсів порівняно з лінійними підходами, що може ускладнювати їх застосування в масштабних задачах.

Вейвлет-перетворення є одним із найбільш універсальних математичних інструментів для аналізу сигналів, засноване на можливості представлення даних у багатомасштабному вигляді. Така особливість забезпечує не лише ефективне усунення шумових компонент, але й одночасне збереження локальних характеристик сигналу, що має особливу значущість у випадках роботи з нестационарними сигналами.

Метод сингулярного розкладу матриць (SVD) широко використовується як потужний інструмент для відокремлення інформативних компонентів сигналу від шуму шляхом аналізу сингулярних значень. Його застосування істотно покращує якість обробки даних, забезпечуючи збереження важливих властивостей, притаманних оброблюваним сигналам.

Спектральні та частотно-просторові фільтри представляють собою інноваційний підхід до аналізу властивостей сигналів у різних доменах. Використання таких методів дозволяє досягти більш детального вивчення характеристик сигналів, що розширює можливості для підвищення точності їх аналізу та очищення від небажаних компонентів.

Нормалізація даних відіграє фундаментальну роль у підготовці інформації для аналітичних процедур, забезпечуючи структурованість і узгодженість результатів подальшого оброблення. Існують декілька провідних методів нормалізації:

- Нормалізація "Min-Max", яка приводить значення до заданого інтервалу, максимізуючи узгодженість діапазонів;
- Z-нормалізація, що базується на стандартизації даних через їх приведення до середнього значення і стандартного відхилення;
- Локальна адаптивна нормалізація, яка враховує специфічні характеристики розподілу даних, притаманні конкретному сигналу.

Актуальні алгоритми дедалі частіше інтегрують автоматизовані механізми вибору параметрів нормалізації, використовуючи оцінку статистичних розподілів вихідних даних.

Процеси інтерполяції та реконструкції даних відіграють вагомую роль у ситуаціях, коли необхідне відновлення втрачених або пошкоджених значень, наприклад, у сейсмічних дослідженнях. Такі втрати часто виникають через технічні несправності або людську помилку. Серед традиційних методів найбільш поширені лінійна та сплайн-інтерполяція, які вирізняються простотою застосування, однак можуть поступатися точністю. Значно кращі результати забезпечують геостатистичні методи, такі як кригінг, заснований на використанні просторової кореляції між спостережуваними даними. Утім, найсуттєвіший прорив у цій галузі спостерігається завдяки використанню алгоритмів машинного навчання, які демонструють значну ефективність у моделюванні складних залежностей й дають змогу досягти максимальної точності у процесах реконструкції даних.

Вирівнювання та корекція сигналів становлять необхідний фундаментальний етап обробки сейсмічних даних, спрямований на усунення часових і просторових спотворень, які виникають під час реєстрації. Основними підходами у цьому процесі є компенсація статичних зсувів, налаштування під швидкість розповсюдження хвиль і автоматизоване узгодження сейсмічних трас. Сучасні алгоритми активно залучають методи оптимізації в поєднанні з кореляційним аналізом для досягнення високої точності обробки.

Критично важливим аспектом у розпізнаванні сейсмічної інформації є покращення якості сигналу. У цьому контексті широко застосовуються такі інструменти, як атрибутний аналіз, що досліджує параметри амплітуди, фази та частотного спектра. Допоміжні методи, як-от контрастне підсилення та градієнтні підходи, доповнюють процеси обробки. Також активно використовуються алгоритми, що виділяють текстурні та структурні особливості, що дає змогу ефективно ідентифікувати геологічні характеристики, включно з розломами або родовищами корисних копалин.

Інновації у сфері машинного навчання набувають дедалі більшого значення під час обробки сейсмічних даних, особливо на початкових стадіях аналізу. Згорткові нейронні мережі демонструють високу ефективність у вирішенні задач денойзингу, сегментації та реконструкції даних завдяки здатності враховувати просторово-структурні залежності.

Автоенкодери відіграють ключову роль у зменшенні розмірності даних та очищенні сигналів від шуму, при цьому зберігаючи їхню основну інформаційну значущість. Генеративні моделі, як-от GAN, успішно заповнюють прогалини в наборах даних і створюють синтетичні приклади для тренування алгоритмів. Окрему увагу привертають трансформерні архітектури, які демонструють високі результати у роботі з комплексними структурами даних та забезпечують обробку тривалих залежностей з особливою точністю.

Автоматизація передобробки даних охоплює кілька критично важливих напрямів, зокрема адаптивний вибір параметрів алгоритмів, інтеграцію процесів у складні обчислювальні конвеєри та використання сучасних інструментів автоматизованого машинного навчання (AutoML). Задля обробки значних обсягів даних у режимі реального часу з максимальною продуктивністю активно використовуються хмарні обчислення та розподілені системи.

Висновки. Традиційні підходи характеризуються простотою реалізації та високою швидкодією, проте їх ефективність помітно знижується за наявності складних структур даних. Методи машинного навчання, натомість, забезпечують значно вищу точність аналізу, але вимагають значних обчислювальних ресурсів і великих обсягів якісно анотованих даних для навчання. Вирішенням цієї дилеми є використання гібридних підходів, які об'єднують переваги класичних алгоритмів із сучасними досягненнями штучного інтелекту. Такий симбіоз сприяє оптимальному балансу між швидкістю виконання завдань і якістю отриманих результатів.

Станом на сьогодні автоматизація передобробки даних стикається з низкою актуальних викликів. Серед них варто виділити проблему високої вимірності датасетів, недостатньої кількості якісних анотованих даних,

складності розробки та тонкого налаштування алгоритмів, а також недостатню адаптивність моделей до змінюваних умов та ситуацій.

Перспективними напрямками для подолання зазначених викликів виступають розробка методів самонавчання, застосування фізико-інформативних моделей, активне впровадження хмарних технологій, а також створення доступних, відкритих і стандартизованих датасетів. Ці інновації мають потенціал для підвищення продуктивності, якості та доступності процесу обробки даних.

Загалом автоматизація передобробки 3D-сейсмічних даних є ключовим компонентом сучасних геофізичних досліджень. Вона істотно покращує точність інтерпретації та забезпечує вищий рівень ефективності аналізу геологічних структур. Серед найбільш актуальних підходів виокремлюються застосування класичних алгоритмів, сучасних методів машинного навчання та їх інтегровані комбінації. Особливо перспективним виглядає розвиток гібридних моделей, які поєднують сильні сторони різноманітних технологій, забезпечуючи тим самим високий рівень продуктивності й точності. Майбутній прогрес у цій галузі пов'язаний із впровадженням інтелектуальних систем обробки, здатних відкрити нові горизонти в геологорозвідці, покращити якість сейсмічного аналізу й розширити його практичне застосування.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Bacon M., Simm R., Redshaw T. 3-D Seismic Interpretation. Cambridge University Press, 2004. DOI:10.1017/S001675680422917X
3. Wrona T. et al. Seismic facies analysis using machine learning // Geophysics. s 83(5):1-34. DOI:10.1190/geo2017-0595.1
4. Anjom F.K. et al. Machine Learning for Seismic Exploration: where are we and how far are we from the Holy Grail? / Khosro Anjom, Farbod; Vaccarino, Francesco; Socco, Laura Valentina. - In: GEOPHYSICS. - ISSN 0016-8033. - 89:(2024), pp. 1-111. DOI:10.1190/geo2023-0129.1
5. Sebai D. et al. Seismic data compression: an overview // Multimedia Systems, 2024. DOI:10.1007/s00530-023-01233-4
6. Dmitriiieva I., Dmytrenko A. Artificial intelligence methods for predicting hydrocarbon deposits // System Technologies, 2025. DOI 10.34185/1562-9945-4-159-2025-16

7. Wrona, T., I. Pan, R. E. Bell, R. L. Gawthorpe, H. Fossen, and S. Brune, 2021, 3-D seismic interpretation with deep learning: A set of Python tutorials, Version 0.1: GFZ Data Services, doi.org/10.5880/GFZ.2.5.2021.001.
8. Dmitriiieva I., Dmytrenko A. Application of machine learning methods in the processing of 3D seismic images // System Technologies, 2026. DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-162-2026-25>

METHODS FOR THE AUTOMATED PRELIMINARY PROCESSING OF 3D SEISMIC DATA

Iryna Dmytriieva, Andrii Dmytrenko

Abstract. *This paper examines modern methods of automated pre-processing of 3D seismic data, aimed at improving the quality of geophysical interpretation. It examines in detail the characteristic features of such data that necessitate pre-processing: the presence of strong noise, the heterogeneity of the physical properties of the medium, and the processing of large data sets. Traditional approaches to pre-processing are described, in particular filtering, normalisation, interpolation, signal alignment and methods for their amplification. Considerable attention is focused on innovative machine learning technologies, including the use of convolutional neural networks, autoencoders and generative models. The prospects for automating pre-processing workflows using optimisation algorithms and AutoML platforms are examined. The conclusions highlight key advantages, existing limitations and outline opportunities for the further development of hybrid approaches in this field.*

Keywords: *3D seismic data, pre-processing, machine learning, noise filtering, interpolation, neural networks, AutoML.*

**ЗАСТОСУВАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ
ДЛЯ АНАЛІЗУ ДАНИХ ТА ПРОЄКТУВАННЯ ОСВІТНІХ
ПРОГРАМ З МЕТАЛУРГІЇ**

Бахрушин В.Є.¹ [ORCID], Бахрушин О.В.² [ORCID]

¹ НУ «Запорізька політехніка», д.ф.-м.н, професор, Україна

² НУ «Запорізька політехніка», аспірант, Україна

Анотація. Досліджено можливості застосування штучного інтелекту для проєктування освітніх програм закладів вищої освіти на прикладі програм з металургії. Застосування штучного інтелекту дає змогу зібрати інформацію про потреби і вимоги зацікавлених сторін, зібрати й проаналізувати дані про аналогічні освітні програми інших закладів, здійснити системний аналіз таких програм для прийняття більш обґрунтованих рішень, оформити опис освітньої програми згідно із вимогами законодавства, перевірити логічну послідовність освітніх компонентів та їх здатність забезпечити досягнення визначених освітньою програмою результатів навчання. Розглянуто два підходи – використання масових інструментів штучного інтелекту на кшталт ChatGPT, Grok, Gemini та створення спеціалізованого агента штучного інтелекту. Обидва підходи забезпечують можливість створення якісних освітніх програм при інтерактивній взаємодії фахівця зі штучним інтелектом з урахуванням специфіки конкретного закладу вищої освіти та ринку праці, на якому, як очікується, будуть працювати випускники.

Ключові слова: металургія, освітня програма, проєктування, , штучний інтелект, системний аналіз, аналіз даних, прийняття рішень.

Створення якісних освітніх програм є актуальною проблемою вищої освіти. Основні вимоги до освітніх програм визначені Законом України «Про вищу освіту», Положенням про акредитацію освітніх програм, Стандартами та рекомендаціями щодо забезпечення якості в Європейському просторі вищої освіти (ЄПВО), стандартами вищої освіти, іншими документами законодавства, конференцій міністрів, що відповідають за вищу освіту в країнах ЄПВО, рекомендаціями Ради ЄС, іншими нормативно-правовими та рекомендаційними документами. Якісна освітня програма також має враховувати потреби ринку праці щодо компетентностей нових працівників

для конкретних видів професійної діяльності, що потребують вищої освіти, потреби студентів щодо їх особистісного розвитку та майбутньої кар'єри, прогнози розвитку відповідних сфер діяльності, технологій, наявні кадрові і матеріально-технічне забезпечення тощо. Корисним є аналіз досвіду інших закладів що мають аналогічні освітні програми. Застосування штучного інтелекту не замінює фахівців – розробників освітніх програм, але може істотно полегшити пошук і аналіз необхідних даних, виконання рутинних робіт, перевірку внутрішньої узгодженості освітньої програми та її спроможності забезпечити виконання вимог законодавства тощо. Зокрема, про це йдеться у статтях [1, 2].

Метою цієї роботи була перевірка можливостей інструментів штучного інтелекту для проектування освітніх програм у сфері металургії. При цьому розглядали два варіанти – використання масових інструментів штучного інтелекту на кшталт ChatGPT, Grok, Gemini та створення спеціалізованого агента штучного інтелекту.

У випадку використання масових інструментів фахівець в інтерактивному режимі формулює набір промптів, відповіді на які дають змогу спроектувати основу опису освітньої програми та визначити її освітні компоненти. Зокрема, це стосується пошуку аналогічних освітніх програм в університетах країн ЄПВО, США, Канади, Японії, Китаю, інших країн. Такий аналіз свідчить, що в більшості провідних університетів світу не створюють освітні програми, спрямовані виключно на металургію, й тим більш, на окремі її напрями, такі як металургія сталі, металургія алюмінію, порошкова металургія й т. п. Натомість перевагу частіше віддають програмам, де металургія є лише одним з модулів в межах ширших освітніх програм з матеріалознавства, інженерії, технології чи переробки металів, гірництва тощо, а інколи і в межах загальних програм з інженерії. Аналогічно, у діалоговому режимі можна отримати інформацію про наявні та прогнозовані потреби ринку праці у компетентностях працівників, збирати й аналізувати дані (як кількісні, так і якісні) щодо розвитку галузі, реалізовувати SWOT, PESTLE, інші методи системного аналізу складних систем для прийняття більш обґрунтованих рішень, знаходити перспективних

партнерів для реалізації освітніх програм, проектувати освітні компоненти, їх зміст та логічну послідовність, перевіряти відповідність освітньої програми вимогам законодавства і стандартів тощо. Важливою перевагою такого підходу є його гнучкість. Набір промптів для діалогу є лише певним орієнтиром, але відповіді на них та пропозиції й запитання штучного інтелекту інколи призводять до значних відхилень від початкового сценарію, що може істотно покращити спроектовану освітню програму. Не менш важливим є те, що робота з масовими інструментами штучного інтелекту не потребує спеціальних знань і навичок користувача з інженерії програмного забезпечення, комп'ютерних наук, математичних методів тощо. Втім, для цього потрібний високий рівень підготовки користувача як у предметній області, так і його підготовки до роботи з відповідними інструментами штучного інтелекту.

Альтернативою є підхід, що базується на створенні спеціальних агентів штучного інтелекту для розроблення освітніх програм. Для цього може бути застосована архітектура оркестрованої багатоагентної системи [3]. Вона передбачає наявність головного агента – оркестратора, який організовує роботу кількох вузькоспеціалізованих субагентів, які розв'язують окремі задачі, зокрема: стратегічний аналіз макросередовища (закони, ціни, тренди розвитку металургії, ...); конкурентний бенчмаркінг; внутрішній аудит і аналіз стейкхолдерів; «нормативний синтез» (приведення напрацьованих іншими субагентами пропозицій у відповідність до вимог стандартів вищої освіти, Національною рамкою кваліфікацій, іншим законодавством). Цей перелік не є повним і може доповнюватися чи змінюватися залежно від конкретних цілей та задач. Перевагою такого підходу є можливість створення єдиного інструмента для проектування всіх освітніх програм закладу. Але такий інструмент буде менш гнучким, що особливо чутливо у випадку, коли освітні програми належать до різних галузей знань і орієнтовані на істотно різні сфери майбутньої діяльності випускника. Крім того, невдалі архітектурні рішення, неодмінні обмеження функціоналу агента можуть призводити до істотних помилок у проектуванні освітньої програми. З цього погляду оптимальним для закладу вищої освіти, що має велику кількість освітніх програм може бути

поєднання двох підходів. А саме створення на першому етапі прототипу освітньої програми за допомогою спеціалізованого агента штучного інтелекту на основі стандартизованого примірного сценарію та сформульованих фахівцями з предметної області додаткових вимог. На другому етапі цей прототип перетворюють на готову освітню програму у процесі інтерактивного діалогу фахівців з одним із масових інструментів штучного інтелекту щодо всіх деталей, які фахівці вважають за необхідне врахувати.

Висновки

Як масові інструменти штучного інтелекту, так і спеціально створені агенти штучного інтелекту можуть бути корисними для розроблення освітніх програм закладів вищої освіти та підвищення якості таких програм. Зокрема, вони надають змогу відшуковувати аналоги й виявляти їх переваги та недоліки, аналізувати та узгоджувати вимоги ключових зацікавлених сторін, узгоджувати структуру та зміст освітньої програми з вимогами законодавства, прогнозувати зміни вимог ринку праці щодо компетентностей працівників тощо. Оптимальним у багатьох випадках може бути поєднання застосування обох типів інструментів, що дає змогу мінімізувати вплив недоліків кожного з них.

Застосування інструментів штучного інтелекту для створення освітніх програм з металургії показало, що сьогодні найбільш перспективними можуть бути міждисциплінарні програми (металургія + матеріалознавство, технологія металів, інженерія металів тощо), які передбачають набуття глибокого розуміння фундаментальних та інженерних основ, навичок застосування сучасних цифрових інструментів та спеціалізованого програмного забезпечення, набуття розуміння і навичок розв'язування не лише традиційних задач, але й проблем автоматизації, роботизації, зеленої металургії.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Chigbu B. I., Makapela S. L. AI in education, sustainability, and the future of work: An integrative review of industry 5.0, education 5.0, and work 5.0 // Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity. – 2025. – Vol. 11, Issue 4. – Article 100645. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2025.100645>.

2. Supriya Y., Bhulakshmi D., Bhattacharya S., Gadekallu T. R., Vyas P., Kaluri R., Sumathy S., Koppu S., Brown D. J., Mahmud M. Industry 5.0 in smart education: Concepts, applications, challenges, opportunities, and future directions // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 83678–83715. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3401234>.
3. Adimulam A., Gupta R., Kumar S. The orchestration of multi-agent systems: Architectures, protocols, and enterprise adoption // arXiv preprint. – 2026. – arXiv:2601.13671v1. – URL: <https://arxiv.org/abs/2601.13671>.

THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS IN DATA ANALYSIS AND STUDY PROGRAMS DEVELOPMENT IN METALLURGY

Volodymyr Bakhrushyn, Oleksii Bakhrushyn

Abstract. *The possibilities of using artificial intelligence for designing study programs of higher education institutions have been studied using the example of programs in metallurgy. The use of artificial intelligence makes it possible to collect information about the needs and requirements of stakeholders, collect and analyze data on similar study programs of other institutions, carry out a system analysis of such programs to make more informed decisions, draw up a description of the study program in accordance with the requirements of the legislation, check the logical sequence of educational components and their ability to ensure the achievement of learning outcomes specified by the study program. Two approaches have been considered – the use of public artificial intelligence tools such as ChatGPT, Grok, Gemini and the creation of a specialized artificial intelligence agent. Both approaches allow for creation of high-quality study programs in cooperation with a specialist, accounting for the specifics of the particular institution and the expectations of the labor market.*

Keywords: *metallurgy, study program, design, artificial intelligence, system analysis, data analysis, decision-making*

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ СЛІДУ ЗА КРУГОВИМ ЦИЛІНДРОМ, ЩО КОЛИВАЄТЬСЯ, ПРИ НИЗЬКИХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

Весков Є. В.¹ [ORCID], Довгий С. О.² [ORCID], Редчиць Д. О.³ [ORCID]

¹Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
аспірант, України

²Інститут прикладних систем управління Національної академії наук, доктор
фізико-математичних наук, професор, України

³Інститут транспортних систем та технологій Національної академії наук,
доктор фізико-математичних наук, професор, України

³Інститут прикладних систем управління Національної академії наук,
доктор фізико-математичних наук, професор, України
³Дніпровський державний технічний університет,
доктор фізико-математичних наук, професор, України

Анотація. Проведено чисельне моделювання структури вихрового сліду за круговим циліндром, що здійснює вимушені поперечні коливання в нестисливій рідині при субкритичному числі Рейнольдса $Re = 2174$. Використано двовимірний підхід URANS з $k-\omega$ SST моделлю турбулентності та $\gamma-\tilde{Re}_\theta$ моделлю ламінарно-турбулентного переходу, реалізований у пакеті OpenFOAM. Досліджено залежність різних режимів вихроутворення (2S, 2P, 2P₀, P+S, C(2S), 2T) від безрозмірної амплітуди A^* та частоти f^* вимушених коливань у відповідності до експериментальної карти Т. Морзе і К. Х. К. Вільямсона. Отримано контури завихреності, залежності аеродинамічних коефіцієнтів від часу та амплітудно-частотні спектри. Показано, що 2D-моделювання якісно відтворює основні режими вихроутворення та межі переходів між режимами, проте режими із двома парами вихорів 2P і 2P₀ та комбіновані (2S/2P₀ та 2P₀/2P) виявляються нестабільними і з часом деградують до P+S або 2S через неможливість відтворити тривимірні явища у двовимірному моделюванні. Для точного обчислення гідродинамічних сил, моделювання режимів з двома парами вихорів (2P) та комбінованих режимів (2S/2P₀ та 2P₀/2P) необхідне проведення тривимірних розрахунків.

Ключові слова: вихрові коливання, круговий циліндр, вихровий слід, чисельне моделювання, URANS, модель ламінарно-турбулентного переходу, режими вихроутворення, число Рейнольдса, OpenFOAM.

Нестационарні вихори, індуковані потоком, становлять серйозну загрозу для надійності та міцності трубопроводів, мостів і вітрових турбін [0]. Дослідження структури сліду за осцилюючими тілами дозволяє прогнозувати режими навантаження та запобігати резонансним явищам. Особливий інтерес становить аналіз режимів вихроутворення та їх переходів [0].

В роботі розглядається круговий циліндр діаметром D , який коливається за синусоїдальним законом перпендикулярно потоку, який рухається зі швидкістю U в горизонтальному напрямку.

Течія описується нестационарними осередненими за Рейнольдсом рівняннями Нав'є-Стокса (URANS) для нестисливої рідини з $k-\omega$ SST моделлю турбулентності та $\gamma-\tilde{Re}_\theta$ моделлю ламінарно-турбулентного переходу [0].

Задача про циліндр, що коливається, може бути охарактеризована наступними трьома безрозмірними групами: числом Рейнольдса, $Re = UD/\nu$, безрозмірною амплітудою коливань $A^* = A/D$; і відношенням частоти вимушених коливань f_e до власної частоти вихроутворення $f^* = f_e/f_s$ [0]. Власна частота вихроутворення одиночного нерухомого циліндра f_s часто виражається через число Струхала, $St = f_s D/U$. У деяких роботах замість f^* використовується безрозмірна довжина хвиль $\lambda^* = \lambda/D = U/f_e D$, де $\lambda = UT_e$ – довжина хвилі відповідної синусоїдальної траєкторії, вздовж якої рухається тіло відносно рідини; $T_e = 1/f_e$ – період коливань циліндру у напрямку перпендикулярному потоку рідини. Також використовується безрозмірний час $t^* = f_s t$, де t – час [0].

Обчислення виконувались у програмному комплексі OpenFOAM (розв'язувач `pimpleFoam`) на структурованій сітці О-типу радіусом $25D$ з кількістю вузлів 240×500 зі згущенням поблизу поверхні циліндра (перша комірка дорівнює $0.0035D$, у примежовому шарі кількість шарів сітки дорівнює 40). У якості граничних умов на поверхні циліндра ставилась умова прилипання, а на зовнішній межі – умова потоку, що набігає.

На рис. 1, а зображено типи режимів вихроутворення, які можуть існувати при вертикальних коливаннях циліндру у потоці рідини за К. Х. К. Вільямсоном і А. Рошко [0]. На рис. 1, б наведено діаграму режимів вихроутворення, яка відображає залежність меж режимів вихроутворення від λ^* та A^* .

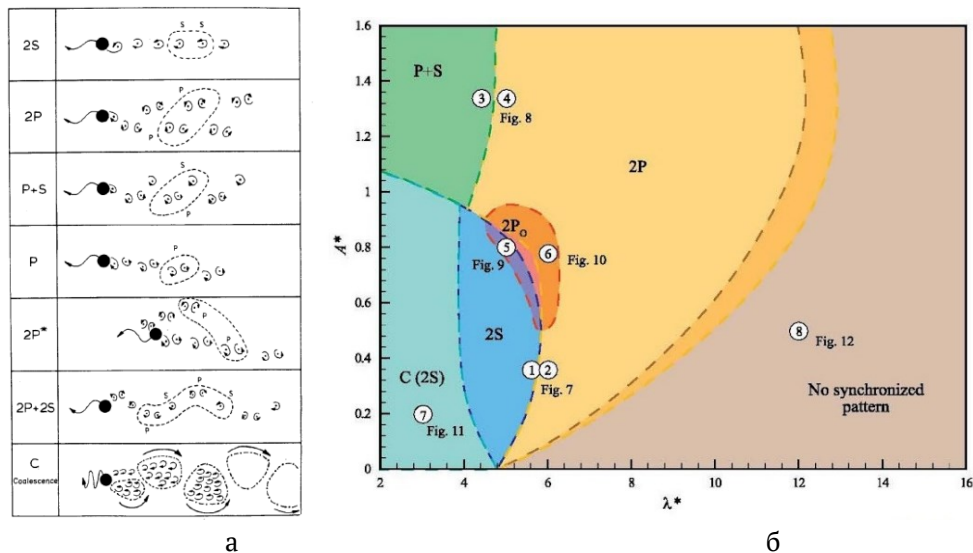


Рисунок 1 – Типи режимів вихроутворення за К. Х. К. Вільямсоном і А. Рошко [0] та діаграма режимів вихроутворення Т. Морзе і К. Х. К. Вільямсона [0]: а – типи режимів вихроутворення; б – діаграма режимів вихроутворення.

На основі аналізу контурів завихреності, залежностей аеродинамічних коефіцієнтів та спектрального аналізу підйомної сили ідентифіковано наступні режими:

1. **Режим 2S (синхронізований режим Кармана):** спостерігається при помірних амплітудах (рис. 1, б, точка 1). За один період формуються два одиночні вихори. Спектр підйомної сили має чіткий пік на частоті f_s .
2. **Режим 2P (дві пари вихорів):** при збільшенні амплітуди (рис. 1, б, точка 4) двовимірна модель фіксує формування двох пар вихорів за період. Однак режим виявляється нестабільним: при $t^* \geq 5$ трансформується в асиметричний P+S через неможливість відтворити тривимірні ефекти в двовимірному чисельному моделюванні [0, 0, 0].
3. **Режим 2P₀ (дві пари вихорів різної інтенсивності):** у точках 5–6 на рис. 1, б спостерігається формування пар вихорів в яких один з вихорів має суттєво меншу інтенсивність ніж інший.
4. **Режим P+S (асиметричний):** Слід характеризується асиметричним розподілом завихреності (рис. 1, б, точка 3), що призводить до збільшення середнього значення коефіцієнта опору. Спектральний

аналіз підтверджує асиметрію через наявність піків на частотах f_s та $2f_s$.

5. **Режим 2Т (два триплети):** виявлено на перших періодах коливань ((рис. 1, б, точка 3). точка 9), однак з часом деградує до 2S, що свідчить про критичну роль тривимірних ефектів для формування режимів вихроутворення [0, 0, 0].
6. **Десинхронізація:** при $f^* = 0.42$ ((рис. 1, б, точка 3). точка 8) частота коливань циліндра не контролює слід; домінує власна частота коливань (число Струхала для нерухомого циліндру).

Висновки

Двовимірне URANS-моделювання з моделлю переходу $\gamma - \tilde{Re}_\theta$ є ефективним інструментом для якісного відтворення основних режимів вихроутворення (2S, 2P, P+S) за циліндром, що коливається, при субкритичних числах Рейнольдса.

Розраховані межі синхронізації демонструють якісний збіг з експериментальною картою Т. Морзе і К. Х. К. Вільямсона [0] за винятком комбінованих режимів 2S/2P₀ та 2P₀/2P.

Показано, що двовимірний підхід не забезпечує стабільності складних режимів із парами вихорів (2P, 2P₀, 2T). Ці режими з часом ($t^* \geq 3.65 \dots 5.85$) деградують до симетричного 2S або асиметричного P+S режимів. В роботах [0, 0] 2P-режиму відсутній при низьких числах Рейнольдса ($Re = 100 \div 300, 500$) у двовимірному моделюванні, хоча при $Re = 4000$ Ж. Хіонг і Х. Лю успішно відтворили режими вихроутворення 2P та 2P₀ за допомогою двовимірного моделювання методом VLES [0]. Це означає, що існує мінімальне число Рейнольдса в діапазоні $2174 \leq Re \leq 4000$ при якому можливо стабільне відтворення всіх режимів вихроутворення за допомогою двовимірного чисельного моделювання.

Встановлено, що для якісного відтворення режимів обтікання циліндру, що коливається, з двома парами вихорів (2P) та комбінованих режимів (2S/2P₀ та 2P₀/2P) необхідне проведення тривимірних розрахунків.

ЖИТЕПАТҮПА / REFERENCE

1. Blackburn H. M., Henderson R. D. A study of twodimensional flow past an oscillating cylinder. Journal of Fluid Mechanics. 1999. Vol. 385. P. 255–286. URL: <https://doi.org/10.1017/S0022112099004309>.
2. Menter F. R., Langtry R., Völker S. Transition Modelling for General Purpose CFD Codes. Flow, Turbulence and Combustion. 2006. Vol. 77. P. 277–303. URL: <https://doi.org/10.1007/s10494-006-9047-1>.
3. Morse T. L., Williamson C. H. K. Fluid forcing, wake modes, and transitions for a cylinder undergoing controlled oscillations. Journal of Fluids and Structures. 2009. Vol. 25, iss. 4. P. 697–712. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2008.12.003>.
4. Wake state and energy transitions of an oscillating cylinder at low Reynolds number / J. S. Leontini et al. Physics of Fluids. 2006. Vol. 18. P. 067101–1 – 067101–9. URL: <https://doi.org/10.1063/1.2204632>.
5. Williamson C. H. K., Govardhan R. Vortex-Induced Vibrations. Annual Review of Fluid Mechanics. 2004. Vol. 36. P. 413–455. URL: <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122128>.
6. Williamson C. H. K., Roshko A. Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder. Journal of Fluids and Structures. 1988. Vol. 2, iss. 4 : [https://doi.org/10.1016/S0889-9746\(88\)90058-8](https://doi.org/10.1016/S0889-9746(88)90058-8). P. 355–381.
7. Xiong Z., Liu X. Very Large-Eddy Simulations of the Flow Past an Oscillating Cylinder at a Subcritical Reynolds Number. Applied Sciences. 2020. Vol. 10, iss. 5. URL: <https://doi.org/10.3390/app10051870>
8. Yang W., Masroor E., Stremler M. A. The wake of a transversely oscillating circular cylinder in a flowing soap film at low Reynolds number. Journal of Fluids and Structures. 2021. Vol. 105. P. 1–23. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2021.103343>.

NUMERICAL STUDY OF THE WAKE STRUCTURE BEHIND AN OSCILLATING CIRCULAR CYLINDER AT LOW REYNOLDS NUMBERS

Y. Vieskov, S. Dovgyi, D. Redchyts

Abstract. Numerical simulation of the vortex wake structure behind a circular cylinder undergoing forced transverse oscillations in an incompressible fluid at a subcritical Reynolds number $Re=2174$ has been performed. A two-dimensional URANS approach with the SST turbulence model and a laminar-turbulent transition model, implemented in the OpenFOAM software package, was utilized. The dependence of various vortex shedding modes (2S, 2P, 2P0, P+S, C(2S), 2T) on the dimensionless amplitude and frequency of forced oscillations was investigated in accordance with the experimental map by T. Morse and C. H. K. Williamson. Vorticity contours, time histories of aerodynamic coefficients, and amplitude-frequency spectra were obtained. It is shown that 2D modeling qualitatively reproduces the primary vortex shedding modes and the

boundaries of transitions between them; however, modes with two pairs of vortices (2P and 2P0) and combined modes (2S/2P0 and 2P0/2P) prove to be unstable and eventually decay into P+S or 2S due to the inability to capture three-dimensional phenomena in a two-dimensional simulation. To accurately calculate hydrodynamic forces and simulate 2P or combined modes, three-dimensional (3D) computations are required.

Keywords: *vortex-induced vibrations, circular cylinder, vortex wake, numerical simulation, URANS, laminar-turbulent transition model, vortex shedding modes, Reynolds number, OpenFOAM.*

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2026.01.027

**MODEL OF THE EFFECT OF STRESS STATE ON THE GROWTH OF ELONGATED
GRAINS β - Si_3N_4 DURING HIGH-TEMPERATURE DEFORMATION OF SILICON
NITRIDE-BASED CERAMICS**

Hnylytsia I. D. [ORCID]

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas Ivano-Frankivsk, Ph.D.,
associate professor, Ukraine*

Abstract. *The structures of ceramic materials of known compositions based on silicon nitride with high (Si_3N_4 -5wt.% Y_2O_3 -5wt.% Al_2O_3), medium (Si_3N_4 -5wt.% Y_2O_3 -2wt.% Al_2O_3) and low (Si_3N_4 -2wt.% Y_2O_3 -1wt.% Al_2O_3) content of sintering activators after high-temperature deformation according to the direct extrusion scheme were analyzed. An increase in grain size and an increase in the number of anisometric grains in the structure of the deformed material were recorded, with the vast majority of anisometric grains being located coaxially with the longitudinal axis of symmetry of the matrix. The stress state in the deformation zone is considered. The influence of the stress gradient in the deformation zone on mass transfer processes is shown. The mathematical model of the influence of the stress state on the growth of elongated β - Si_3N_4 grains in an inhomogeneous stress field in the transition cone of the matrix is considered.*

Keywords: *silicon nitride, deformation, stress state, deformation mechanism, growth of elongated grains.*

During high-temperature extrusion of silicon nitride materials, an increase in grain size and an increase in the number of anisometric grains are observed, with the vast majority of anisometric grains being located coaxially with the longitudinal axis of symmetry of the matrix. Some of these elongated grains are grains of the initial structure that have reoriented (rotated along the axis) in the stress field. The formation of the other part of the hexagonal elongated grains of the β -phase, located in the deformed structure parallel to the extrusion direction, must occur during the high-temperature deformation process due to the dissolution of other grains. Supersaturation in the liquid phase is determined by the size and shape of the β -grains. Planes with an equilibrium concentration higher than the concentration in the liquid dissolve and thus ensure the transition of a certain number of atoms of the base material into the liquid intergranular phase.

The flow of atoms of a material into a particular region depends on the chemical potential of the atoms. The transfer of material from one region to another will occur only if it leads to a decrease in the total free energy. For this, there must be a gradient of one of the factors between different regions that affects the energy of the atoms. If we assume that in the material of the initial sample grains of different sizes and the intergranular phase are evenly distributed over the volume, and also that the composition of the intergranular phase at all points is approximately the same, then such influencing factors can be temperature and stress state in different volumes of the material. In [1], an assessment of the temperature field in the volume of a silicon nitride billet was carried out during hot pressing with radial induction heating up to 1800 °C at a speed of 10 °C/min. This assessment shows that, firstly, the inhomogeneity of the temperature field in the axial direction is much smaller than in the radial direction, and secondly, the inhomogeneity will be significant in the case of pressings with a diameter of more than 100 mm. Judging by the images of temperature fields presented in this work, when deforming billets with a diameter of 30 mm, the maximum temperature non-uniformity will not exceed 100 °C. Therefore, it can be assumed that during high-temperature extrusion, temperature non-uniformity will not have a significant impact on mass transfer processes.

Based on the diagram of the stress state of the material during high-temperature extrusion, let us present the stress state in which an individual grain of material is during high-temperature deformation (Figure 1).

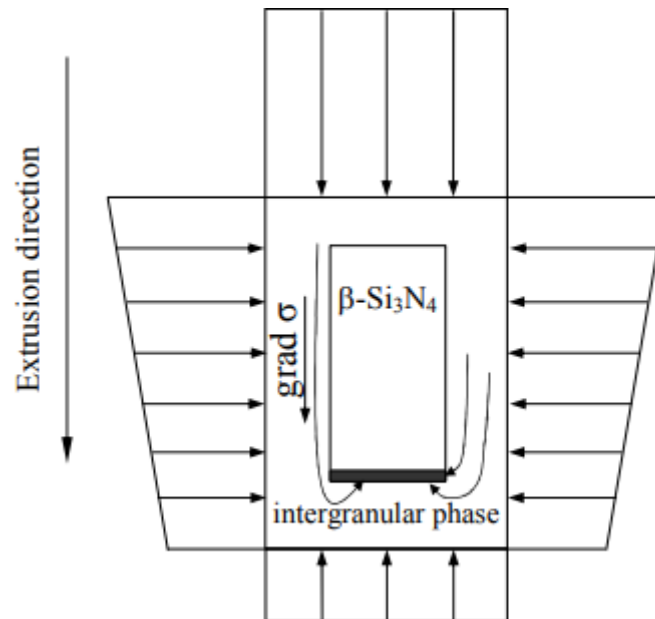


Figure 1 – Growth of elongated grains under conditions of a gradient stress field

Each grain of the material and the volume of the intergranular phase surrounding it are in conditions of non-uniform compression. Compressive stresses are maximum on the side of load application, i.e. on the side of the punch, decrease as they move along the axis to the output channel of the matrix, and, if we talk about a certain elementary volume, are the smallest in its lower part. Thus, in the intergranular phase surrounding the grain, there is a stress gradient that causes the movement of dissolved atoms of the base material to the lower part of the elementary volume, where they participate in the completion of the hexagonal lattice of the elongated grain of the β -phase.

At the stage of stable deformation, when there is much less uncrystallized intergranular phase between the grains, the transition of dissolved atoms to the sites of completion of the hexagonal lattices of elongated grains of the β -phase will occur through this uncrystallized phase and by grain boundary diffusion along the grains of the base material or diffusion in the crystallized intergranular phase.

Conclusions

The influence of the stress gradient in the deformation zone on mass transfer processes is shown. The stress gradient in the high-temperature deformation zone promotes the growth of elongated grains $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Kryl Y.A., Dutka V.A., Isakov A.A. Study of the temperature field during hot pressing of silicon nitride blanks // Superhard materials.-1993.-№ 4.-P.22-23.

МОДЕЛЬ ВПЛИВУ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ НА РІСТ ВИДОВЖЕНИХ ЗЕРЕН β - Si_3N_4 ПРИ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ КЕРАМІКИ НА ОСНОВІ НІТРИДУ КРЕМНІЮ

І.Д. Гнилиця

Анотація. Проаналізовано структури керамічних матеріалів відомих складів на основі нітриду кремнію з високим (Si_3N_4 -5мас.% Y_2O_3 -5мас.% Al_2O_3), середнім (Si_3N_4 -5мас.% Y_2O_3 -2мас.% Al_2O_3) і низьким (Si_3N_4 -2мас.% Y_2O_3 -1мас.% Al_2O_3) вмістом активаторів спікання після високотемпературного деформування по схемі прямої екструзії. Зафіксовано збільшення розмірів зерен і збільшення кількості анізометричних зерен в структурі деформованого матеріалу, причому переважна більшість анізометричних зерен розміщені співвісно з поздовжньою віссю симетрії матриці. Розглянуто напружений стан в зоні деформації. Показано вплив градієнту напружень в зоні деформації на процеси масо переносу. Розглянуто математичну модель впливу напруженого стану на ріст видовжених зерен β - Si_3N_4 в неоднорідному полі напружень у перехідному конусі матриці.

Ключові слова: нітрид кремнію, деформація, напружений стан, механізм деформації, ріст видовжених зерен.

ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗО-ГІДРОДИНАМІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОДУВКИ КРІЗЬ ЩІЛИННЕ СОПЛО КОАКСІАЛЬНОГО ТИПУ

Голуб Т.С.¹ [ORCID], Молчанов Л.С.² [ORCID], Мінай О.М.³ [ORCID]

¹Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ, к.т.н., ст.досл., Україна

²Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ, к.т.н., ст.досл., Україна

³Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ, PhD, Україна,

³Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля»,

PhD. Україна

Анотація. В Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ послідовниками Семикіна С.І. продовжено дослідження щодо використання високовольтної електричної активізації кисневого потоку під час продувки у конвертерах з метою поліпшення фізико-хімічних процесів. Високовольтний електричний розряд генерується на виході спеціально розробленого коаксіального щілинного сопла. Отриманий профіль проточної частини сопла змінює гідро-газодинамічні параметри взаємодії газового струменя, що взаємодіє з навколишнім середовищем. Це й стало метою проведеного дослідження. За результатами проведеного низькотемпературного та чисельного (у середовищі ANSYS Fluent) дослідження особливостей процесу витікання газового струменя зі щілинного сопла та взаємодії сформованого потоку з рідкою ванною у порівнянні з продувкою крізь циліндричне сопло еквівалентного діаметру. Встановлено, що властивості дослідного потоку створюються під впливом не тільки показників витрати чи тиску газу, а, перш за все, залежать від профіля проточної частини сопла, течія скрізь який формує відмінні від відомих (для циліндричного сопла) утворення на початку потоку, з більшими швидкостями. Це відповідає більш жорсткій продувці, відміченій за результатами низькотемпературного моделювання.

Ключові слова: верхня продувка, щілинне сопло, низькотемпературне моделювання, чисельне моделювання, гідро-газодинамічні процеси

В Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ командою співробітників відділу Фізико-технічних проблем металургії стали під керівництвом с.н.с., к.т.н. Семикіна С.І. за декілька десятиліть був накопичений багатий лабораторний та промисловий досвід щодо дослідження та застосування нетрадиційних способів впливу на фізико-хімічні, технологічні

та екологічні показники, які супроводжують виплавку сталі на різних етапах переділу [1-3]. Серед останніх перспективних розробок займає особливе місце використання високовольтного електричного розряду для створення озону в кисневому потоці під час верхньої продувки у кисневих конвертерах [4]. Сьогодні традиції Семикіна С.І. продовжені його послідовниками щодо дослідження особливостей та природи впливу високовольтного електричного розряду на газові потоки під час продувки металевих розплавів, розуміння механізму дії та причин отриманих позитивних результатів.

Розроблений Семикіним С.І. та досліджений разом із співробітниками спосіб високовольтної активізації під час кисневого конвертування був заснований на формуванні іскрового розряду на виході з продувального сопла верхньої кисневої фурми. Відповідно до цього була створена спеціальна конструкція сопла – щілинне коаксіальне сопло. Такий тип сопла докорінно відрізняється від тих, що повсякчас використовують у практиці кисневого конвертування. Фізичні високотемпературні дослідження його використання, проведені на базі лабораторії кафедри металургії ім. проф. В.І. Логінова Дніпровського державного технологічного університету, вказали на такі особливості використання щілинного сопла: «запалювання» продувки відбувалося раніше на 5 – 10 хвилин, температура підфурменої зони вища на 300 – 400 °С, активне засвоєння добавок вапна [5]. Було зроблено припущення, що ключовим фактором отримання вказаних відмінностей є особливість взаємодії газового потоку, який формується щілинним коаксіальним типом сопла, з рідкою ванною. Відповідно метою даної роботи стало дослідження природи взаємодії газового струменя, який витікає з щілинного коаксіального сопла, з газовою та рідкою фазами.

Щілинне коаксіальне сопло, яке використовувалося для дослідної продувки з активізацією, було одиничним вертикально спрямованим кільцевим соплом. Тому для аналізу та адекватного порівняння було обрано одиничне циліндричне сопло еквівалентного щілинному діаметру. Для дослідження було виготовлене щілинне коаксіальне сопло з діаметрами зовнішнім та внутрішнім $3,6 \times 1,5 \cdot 10^{-3}$ м, та циліндричне з діаметром $3,2 \cdot 10^{-3}$ м

(фактично еквівалентний діаметр відповідав масштабу 1:13 до еквівалентного перетину промислового варіанту сопел верхньої кисневої фурми, яка використовується для продувки у 250-т конвертері). Дослідження було проведено на низькотемпературній моделі з використанням підфарбованої води (6 л) та стисненого повітря у якості модельних середовищ та засобами чисельного моделювання. Продувку здійснювали з різною витратою повітря від компресора (0,5 – 5,0 м³/год) та за різного положення фурми відносно поверхні рідини: 20 – 60 калібрів. Хід продувки записували на відеокамеру з наступним аналізом кадрів. Для умов низькотемпературного моделювання основними критеріями подоби були критерій Фруда модифікований та критерій Вебера (останній був доданий через досить малий розмір щілини дослідного сопла із відповідним важливим впливом поверхневого натягу). Чисельне моделювання проведено за допомогою програми ANSYS Fluent з алгоритмом рішення, який базується на розв'язанні рівняння Нав'є-Стокса та, відповідно, використовує модель Volume of Fluid із застосуванням двокомпонентного рівняння $k-\epsilon$ зі стандартною функцією стінки для опису турбулентності [6]. Тиск дослідження 200 до 600 кПа. Валідація результатів чисельного моделювання здійснювалася за допомогою результатів виміру швидкостей газового потоку вздовж осі струменя з використанням мікротрубки Піто й показала високий рівень відповідності [7].

Аналіз результатів дослідження на низькотемпературній моделі показав, що під час продувки на поверхні рідини формувалася кратер який заглиблювався зі зростанням витрати продувального газу із формуванням сплесків, які відривалися з кромки кратеру, у міру заглиблення струменя. Причому відзначено, що продувка крізь щілинне коаксіальне сопло характеризувалася більшою жорсткістю ніж продувка крізь циліндричне сопло, що проявлялося у переході до режиму заглибленого струменя із формуванням сплесків з кромки кратеру при менших витратах продувального газу у порівнянні із продувкою крізь циліндричне сопло. Такі особливості продувки крізь щілинне сопло проявилися при всіх досліджених положеннях фурми, з найбільш характерним проявом при положенні фурми 40 калібрів відносно

початкового рівня рідини. Для прикладу на рис. 1 наведено характерні фото продувки крізь обидва типи сопла за різних витрат за умов положення продувної фурми на висоті 40 калібрів. Відповідно, зміна профілю проточної частини сопла з циліндричного на щілинне при збереженні загального прохідного перетину значно впливає на умови формування потоку та його швидкісні й силові характеристики, які детально були досліджені за допомогою чисельного моделювання.

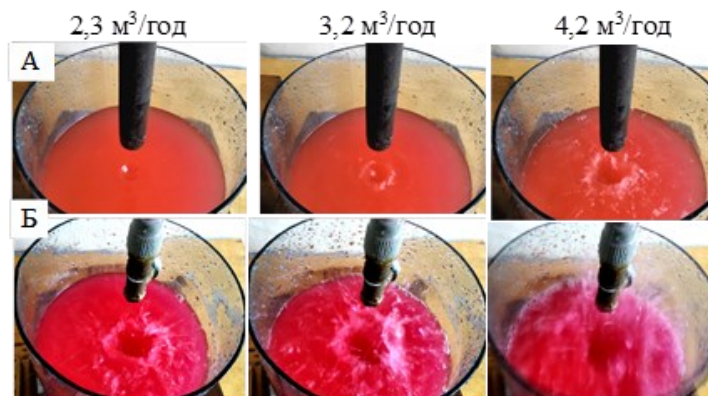


Рисунок 1 – Порівняння результатів низькотемпературного дослідження продувки рідини крізь щілинне (А) та циліндричне (Б) сопла за різних витрат продувального газу (зазначено зверху)

Результати чисельного дослідження дозволили виявити особливості формування топології газових потоків, які витікають з коаксіального щілинного сопла за різних умов тиску продувального газу. На рис. 2 у якості прикладу наведено результати у вигляді нефограм швидкості газового потоку для умов продувки з тиском 300 кПа. Перш за все звертає увагу особливість формування дисків Маха за умов продувки крізь щілинне сопло: на початковій ділянці струменя до 10 калібрів потік продовжував зберігати кільцеву форму з відповідним утворенням кільцевих дисків Маха (на рис. 2 представлений повздовжній переріз струменя, на якому кільцеві утворення виглядають як окремі бочкоподібні утворення для двох потоків). Зазначена особливість є суттєвою відмінністю у порівнянні з продувкою крізь циліндричне сопло із формуванням суцільних бочкоподібних утворень у ядрі потоку. Надалі за довжиною струменя потік газу зі щілинного сопла зливався у суцільний із формуванням єдиного ядра потоку у центральній частині із підвищеними показниками швидкостей потоку. Також слід відзначити, що за однакового

тиску продувного газу величина швидкості газового потоку у наявних кільцевих чи бочкоподібних утвореннях на початковій ділянці струменя за умов продувки крізь сопло щілинної конструкції була вищою на 15 – 20 % відн. в залежності від дослідженого початкового тиску. Більш високі показники газового струменя, який витікав з сопла щілинної конструкції, зберігалися й далі за довжиною: на відстані 20 калібрів – на 10 – 17% відн. й на відстані 40 калібрів – на 19 – 29% відн. Відповідно на відстані від зрізу сопла, яка відповідала робочій висоті розміщення продувної фурми, газовий струмінь, що витікав з коаксіального щілинного сопла, мав вищі показники імпульсу, що відображалося у відміченій більшій жорсткості взаємодії з рідкою ванною та глибшому зануренні струменя у порівнянні зі струменем, що витікав з циліндричного сопла. При цьому ширина газового струменя, що витікав з дослідних сопел, на ділянці до 20 калібрів мала близькі значення. На подальшому дослідженому проміжку потоку ширина струменя, який витікав зі щілинного сопла, була більшою на 20 – 25 % в залежності від тиску газу, що продувався.

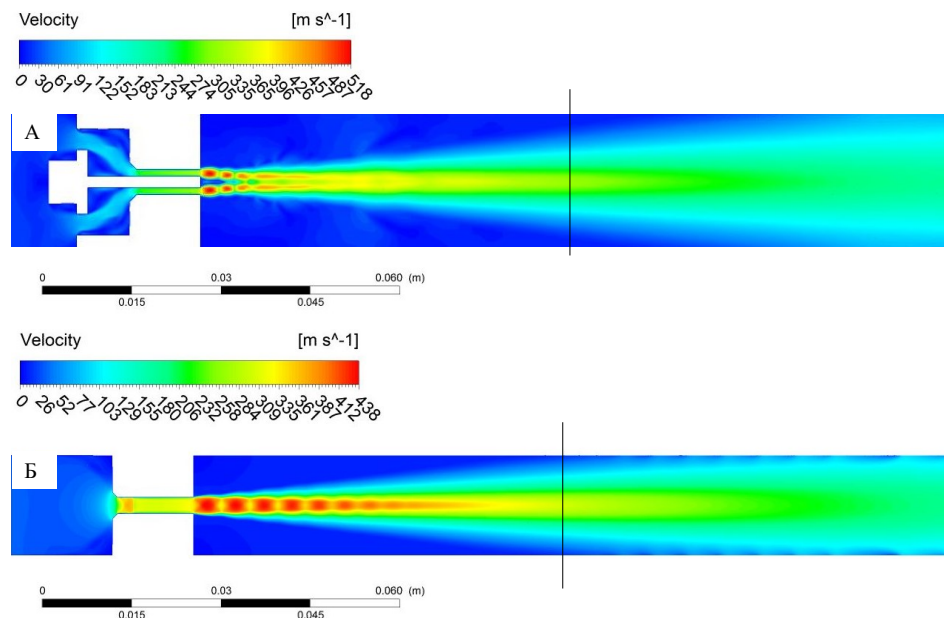


Рисунок 2 – Порівняння нефограм швидкості газових потоків, які витікають з коаксіального щілинного (А) та циліндричного (Б) сопел при тиску газу 300 кПа.
Лінією відзначено відстань 20 калібрів, загальна довжина струменя 40 калібрів

Висновки

Відповідно за результатами фізичного низькотемпературного та чисельного моделювання були встановлені особливості природи формування газових потоків, які витікають з коаксіального щілинного сопла, та гідродинамічні особливості їх взаємодії з рідкою фазою у порівнянні з продувкою крізь циліндричне сопло. Відзначено важливу роль профілю продувального сопла над загальним перетином у формуванні швидкісних показників струменя.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Semykin S.I., Poliakov V.F., Dudchenko S.A., Golub T.S., Vakulchuk V.V., Semykina Ye.V. Eksperimentalnye issledovaniya v laboratornykh usloviakh ISI NASU effektivnosti vliyania elektricheskikh vozdествij na rasplav chuguna pri ego vnepechnom rafinirovanii granulirovannym magniem. Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. 2013. Iss. 27. P. 111–116. [in Russian]
2. Semykin S.I., Golub T.S. In Situ Investigation of Slag-Metal Interactions in Top Blown Oxygen Converter upon Low-Voltage Application. JOM. 2018, Vol. 70(10). P. 2262–2269. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3073-z>
3. Semykin S.I., Poliakov V.F., Semykina Ye.V., Kiiashko T.S., Semykina A.S. Sopotavlenie effektivnosti rafinirovaniya metalla v konvertere I stalerazhivochnom kovshe pri nalozhenii elektricheskogo potentsiala. Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. 2009. Iss. 19. P. 134–139. [in Russian]
4. Semykin S.I., Golub T.S., Molchanov L.S., Dudchenko S.A., Vakulchuk V.V. Environmental aspects of using oxygen blowing with prior electrical activation in oxygen converters. Energotehnologii I Resursosberezhenie. 2025. Vol. 83(2). P. 107–116 <https://doi.org/10.33070/etars.2.2025.09>
5. Semykin S.I., Golub T.S., Dudchenko S.A., Vakulchuk V.V. Vysokotemperaturnoe issledovanie osobennostej produvki metallicheskoj vannы v LD konvertere cherez koltsevoe koaksialnoe soplo. Metal and Casting of Ukraine. 2019. №27(7-9). P. 27-32. <https://doi.org/10.15407/steelcast2019.07.027>. [in Russian]
6. Lorstad D., Fuchs L. High-order surface tension VOF-model for 3D bubble flows with high density ratio. J. Comput. Phys. 2004. Vol. 200 (1). P. 153–176. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2004.04.001>
7. Mironov S.G., Aniskin V.M., Korotaeva T.A., Tsyryulnikov I.S. Effect of the Pitot tube on measurements in supersonic axisymmetric underexpanded microjets. Micromachines. 2019. Vol. 10(4). Art. 235. <https://doi.org/10.3390/mi10040235>

RESEARCH OF GAS-HYDRODYNAMIC FEATURES OF BLOWING THROUGH A COAXIAL-TYPE SLOT NOZZLE

T.S. Golub, L.S. Molchanov, O.M. Minai

Abstract. *At the Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of NASU, the followers of S.I. Semykin continued their research on the use of high-voltage electrical activation of the oxygen flow during blowing in converters in order to improve physicochemical processes. A high-voltage discharge is formed at the output of a coaxial slot nozzle, which affects the hydro-gas dynamic indicators of the gas – environment interaction. This was the purpose of the research. According to the results of a low-temperature and numerical study (in the ANSYS Fluent) it was established that the properties of the experimental flow are formed under the influence, first of all, of the design with the formation of not typical flow shape at the beginning of the flow, different from those known for a cylindrical nozzle, with higher velocities. This corresponds to the more rigid blowing noted according to the results of low-temperature modeling.*

Keywords: *top blowing, slot nozzle, low-temperature modeling, numerical modeling, hydro-gas dynamic processes*

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2026.01.029

ЗАКОНОМІРНОСТІ ПОВЕДІНКИ МІКРОЧАСТИНОК ЗМІЦНЮВАЛЬНИХ ФАЗ ПРИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОМУ ПЕРЕПЛАВІ ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ СПЛАВІВ

Гришин О.М.¹ [ORCID], Надточій А.А.² [ORCID], Губа Р.М.³ [ORCID]

¹Український державний університет науки та технологій, д.т.н., проф., Україна

²Український державний університет науки та технологій, к.т.н., доц., Україна

³Український державний університет науки та технологій, аспірант, Україна

Анотація. У роботі розглянуто сучасний стан досліджень електрошлакового переплаву (ЕШП), що поєднує експериментальні методи з чисельним моделюванням для опису руху металевих крапель у шлаковій ванні. Особливу увагу приділено впливу складу фтористо-оксидних шлаків на густину та в'язкість розплаву, які визначають кінематичні характеристики крапель та ефективність очищення металу. Запропоноване узагальнене емпіричне рівняння адекватно описує швидкість руху дрібних і середніх крапель у діапазоні густини 2800-3500 кг/м³ та в'язкості 0,2-0,6 Па·с. Показано, що діаметр краплі є ключовим фактором теплового вирівнювання: дрібні краплі нагріваються рівномірно, тоді як великі зберігають температурну неоднорідність. Результати моделювання підтверджують можливість використання рівняння як апроксимаційної моделі для прогнозування процесів ЕШП та відкривають перспективи його уточнення з урахуванням деформації крапель і багатofакторних ефектів.

Ключові слова: електрошлаковий переплав, фтористо-оксидні шлаки, металеві краплі, швидкість, густина та в'язкість шлаків, теплообмін

Сучасний стан досліджень електрошлакового переплаву характеризується інтеграцією експериментальних методів із чисельним моделюванням, що дозволяє більш детально описати поведінку крапель у шлаковій ванні. Особливу увагу приділяють взаємодії мікрочастинок зміцнювальних фаз із компонентами шлаку, адже саме ці процеси визначають морфологію та стабільність фазових включень. Високоентропійні сплави, які останніми роками стали предметом інтенсивних досліджень, створюють нові виклики для ЕШП [1-3]. Їхня багатокомпонентна природа та складна термодинаміка зумовлюють непередбачувану поведінку крапель і фаз у шлаковій ванні, що потребує глибокого моделювання та аналізу.

Фтористо-оксидні розплави, що застосовуються як шлаки при ЕШП, складаються з комбінацій фторидів та оксидів кальцію, магнію, алюмінію та інших елементів. Основним компонентом є фторид кальцію (CaF_2), який забезпечує низьку температуру плавлення та високу електропровідність, а оксидні добавки (CaO , Al_2O_3 , MgO , SiO_2 тощо) регулюють в'язкість, густину та хімічну активність шлаку [4,5]. Густина таких систем становить $2,7\text{--}3,2 \text{ г/см}^3$, а динамічна в'язкість – $0,2\text{--}0,6 \text{ Па}\cdot\text{с}$ при температурах $1500\text{--}1700 \text{ }^\circ\text{C}$. Збільшення вмісту Al_2O_3 та MgO підвищує густину, тоді як CaF_2 її знижує. Високий вміст CaF_2 зменшує в'язкість, забезпечуючи легший рух крапель металу, тоді як Al_2O_3 та SiO_2 її підвищують, що може уповільнити масообмін. Оптимальний фтористо-оксидний шлак для ЕШП – це багатокомпонентна система, де CaF_2 , CaO та Al_2O_3 є базовими складниками, а MgO та SiO_2 вводяться для тонкого регулювання властивостей. Це забезпечує ефективне очищення металу, стабільність процесу та формування високоякісних зливків.

Рух металевої краплі, що відривається від поверхні електрода, в рідкому нерухомому шлаку відбувається під дією сили тяжіння, сили Архімеда і сили гідродинамічного опору. Для сферичної краплі баланс сил можна записати як:

$$k \cdot \xi \cdot S \cdot H_g = V_{\text{мет}} \cdot g \cdot (\rho_{\text{шл}} - \rho_{\text{мет}}), \quad (1)$$

де k – коефіцієнт форми тіла (для кулі прийнято $k=1$), ξ – коефіцієнт опору, $S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ – площа поперечного перерізу, d – діаметр краплі, $H_g = \frac{\rho_{\text{сер}} \cdot W^2}{2}$ – динамічний напір потоку, $\rho_{\text{шл}}, \rho_{\text{мет}}$ – густина шлаку та краплі металу, відповідно, W – швидкість руху краплі, $V_{\text{мет}} = \frac{\pi \cdot d^3}{6}$ – об'єм краплі (сферичної форми).

Для визначення коефіцієнта опору краплі сферичної форми використовували критеріальні залежності [6]:

$$\xi = \begin{cases} \frac{24}{Re} & \text{при } 10^{-4} < Re < 2 \\ \frac{18,5}{Re^{0,6}} & \text{при } 2 < Re < 500 \\ 0,44 & \text{при } 500 < Re < 2 \cdot 10^5 \end{cases}, \quad (2)$$

де $Re = \frac{W \cdot d \cdot \rho_{\text{сер}}}{\eta}$ – число Рейнольдса для краплі, яка рухається в рідкому шлаку, η – коефіцієнт його динамічної в'язкості.

Використані у дослідженні формули та критерії (Re , Bi та Fo) є загальноприйнятими в гідродинаміці та тепломасообміні й широко застосовуються для аналізу руху частинок у рідких середовищах. Саме ці критерії обрані для аналізу, оскільки вони дають можливість узагальнити складні процеси тепло- та масообміну у вигляді простих безрозмірних залежностей, що робить результати моделювання універсальними та порівнюваними з даними інших досліджень.

При проведенні чисельного аналізу початковий діаметр краплини d варіювався в діапазоні 0,2...10 мм, глибина шлакової ванни L (відстань від торця електрода до поверхні металу) була обрана рівною 200 мм. Сферична крапля діаметром 0,2 мм досягає своєї постійної швидкості 0,0047 м/с через 0,00008 с на відстані близько 0,002 мм від електрода, що набагато менше глибини шлакової ванни. Час проходження шару 200 мм становить близько 43 с. Крапля діаметром 2 мм рухається швидше і досягає своєї постійної швидкості 0,144 м/с через 0,027 с на відстані близько 3,9 мм від електрода; час проходження шару 200 мм становить близько 1,4 с. Крапля діаметром 10 мм рухається набагато швидше і досягає своєї постійної швидкості 0,67 м/с через 0,115 с на відстані близько 77 мм від електрода; час проходження шару 200 мм становить близько 0,30 с. Таким чином, залежно від діаметра краплі змінюється режим її руху: від ламінарного при $d = 0,2$ мм ($Re \approx 0,13$) до турбулентного при $d = 10$ мм ($Re \approx 950$).

Отримані значення швидкості руху крапель у шлаковій ванні дозволяють визначити час їхнього перебування у розплаві, що є ключовим для аналізу теплових процесів. Розрахункові дані показують, що крапля діаметром 0,2 мм нагрівається рівномірно й повністю досягає температури шлаку (~ 2073 K) за $\sim 1,4$ с; крапля діаметром 2 мм майже повністю вирівнює температуру (~ 2070 - 2073 K) вже через 0,3 с; крапля діаметром 10 мм нагрівається лише частково (~ 1970 - 1980 K), її поверхня гаряча, але центр холодніший, що узгоджується з літературними даними [7].

У роботі запропоновано узагальнене емпіричне рівняння (1) для швидкості руху металевих крапель у шлаковій ванні, яке охоплює широкий інтервал параметрів густини (2800-3500 кг/м³) та в'язкості (0.2-0.6 Па·с):

$$W = 10^{5,85} d^{1,84} \rho_{\text{шл}}^{-0,72} \eta_{\text{шл}}^{-0,70} \cdot R=0,966 \quad (3)$$

Запропоноване емпіричне рівняння адекватно описує швидкість руху дрібних і середніх крапель у шлаковій ванні, підтверджуючи узгодженість із розрахунковими даними, але попри високий коефіцієнт кореляції для великих крапель спостерігається відхилення, що пояснюється, можливо, деформацією та переходом до турбулентного режиму.

Перспективи подальших досліджень полягають у врахуванні деформації крапель у майбутніх моделях, що дозволить ще точніше описати процеси ЕШП. За даними сучасних робіт [7-9], деформація може зменшувати швидкість руху на 15-30% залежно від діаметра, що суттєво впливає на умови нагрівання великих крапель. Врахування цього ефекту у чисельних моделях дасть змогу більш адекватно описати реальні процеси тепло- та масообміну. Таким чином, рівняння може бути використане як апроксимаційна модель для прогнозування кінематичних характеристик крапель у процесі ЕШП, а його подальше уточнення з урахуванням деформації та багатофакторних ефектів відкриває перспективи створення більш універсальних моделей.

Результати моделювання показують, що швидкість руху крапель у шлаковій ванні визначає час їхнього перебування у розплаві, а отже – умови теплового вирівнювання. Діаметр краплі є визначальним фактором як для її кінематичних характеристик, так і для теплового стану при проходженні шлакової ванни.

Висновки

Контроль діаметра крапель і властивостей шлаку дозволяє прогнозувати якість зливків, уникати дефектів та керувати мікроструктурою високолегованих сталей і сплавів. Дрібні краплі, які довго перебувають у шлаковій ванні, сприяють більш ефективному очищенню металу від неметалевих включень, тоді як великі краплі, що швидко проходять ванну, можуть залишати центр холоднішим і формувати неоднорідності. Це означає,

що регулювання складу шлаку (густини та в'язкості) та контроль розміру крапель є ключовими інструментами для оптимізації процесу ЕШП.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Oketola, A. M., Adegbola, T. A., Jamiru, T., Ogunbiyi, O., Salifu, S. Advances in High-Entropy Alloy Research: Unraveling Fabrication Techniques, Microstructural Transformations, and Mechanical Properties. Journal of Bio- and Tribo-Corrosion. Springer, 2025. DOI: 10.1007/s40735-025-00987-3
2. Ganesan, S., Bhatt, D., Satheesh, D., Kokulnathan, T., Pant, P., Bharathi, D. S., Baskar, L., Sahoo, N. G., Palaniappan, A., Manavalan, K. High entropy alloys: a comprehensive review of synthesis, properties, and characterization for electrochemical energy conversion and storage applications. Journal of Materials Chemistry A. RSC Publishing, 2025. DOI: 10.1039/D5TA01234A
3. Ibrahim, P. A., Özkul, İ., Canbay, C. A. An overview of high-entropy alloys. Emergent Materials, 2022, vol. 5, pp. 1779-1796. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42247-022-00349-z>.
4. Stepanenko, D. O., Stovpchenko, G. P., Togobitskaya, D. M., Lisova, L. O. Evaluating the structural state of fluoride-oxide melts and their interactions with steel to sensible selection of ESR slag. Theory and Practice of Metallurgy, 2023, no. 4. DOI: <https://doi.org/10.15802/tpm.4.2023.08>.
5. Ju J., Yang K., Zhu Z., et al. Effect of CaF_2 and $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ on viscosity and structure of TiO_2 -bearing slag for electros slag remelting. Journal of Iron and Steel Research International, 2021, vol. 28, pp. 1541-1550. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42243-021-00683-2>.
6. Clift R., Grace J.R., Weber M.E. Bubbles, drops and particles. New York; London: Academic Press, 1978. 380 p.
7. Krivtsun, V., Sydorets, G., Stovpchenko, G., Polishko, A., Sybir, L., Medovar, L. Effect of deformation of molten metal droplets on their motion and heating in liquid slag. The Paton Welding Journal, 2022, no. 6, pp. 41-48. <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.06.06>
8. Prakash, J., Keh, H. J. Slow translation of a slightly deformed spherical fluid drop. Physics of Fluids, 2023, vol. 35, is. 7, article 073105. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0155908>
9. Thakre S., Ma W., Li L. A numerical analysis on hydrodynamic deformation of molten droplets in a water pool. Annals of Nuclear Energy, 2013, vol. 53, pp. 228-237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.09.008>.

REGULARITIES OF THE BEHAVIOR OF MICRO-PARTICLES OF STRENGTHENING PHASES DURING ELECTROSLAG REMELTING OF HIGH-ENTROPY ALLOYS

O.M. Hryshyn, A.A. Nadtochii, R.M. Huba

Abstract *The study examines the current state of research on electros slag remelting (ESR), which combines experimental methods with numerical modeling to describe the motion of metallic droplets in the slag bath. Particular attention is paid to the influence of fluorine–oxide slag composition on the density and viscosity of the melt, which determine*

the kinematic characteristics of droplets and the efficiency of metal purification. The proposed generalized empirical equation adequately describes the velocity of small and medium droplets within the density range of 2800-3500 kg/m³ and viscosity of 0.2-0.6 Pa·s. It is shown that droplet diameter is a key factor in thermal equalization: small droplets heat uniformly, whereas large ones retain temperature heterogeneity. The modeling results confirm the applicability of the equation as an approximation model for predicting ESR processes and highlight prospects for its refinement by considering droplet deformation and multifactorial effects.

Keywords: *electroslag remelting, fluorine–oxide slags, metallic droplets, velocity, slag density and viscosity, heat transfer*

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ БІОНІЧНИХ АЛГОРИТМІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ ЗНЕСУМЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ІЗ ІМПУЛЬСНИМ ШУМОМ

Дорогокупля К.О.¹ [ORCID], Андрющенко В.О.² [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

²Український державний університет науки і технологій,
канд. техн. наук, доц., доц. каф., Україна

Анотація. У роботі досліджено ефективність біонічних алгоритмів оптимізації параметрів фільтрів знесумлення зображень в умовах імпульсного шуму типу *salt & pepper*. Проведено порівняльний аналіз алгоритмів ННО, GWO, WOA та ACO при налаштуванні параметрів Gaussian та Adaptive Median фільтрів. Експерименти виконано на стандартних тестових зображеннях *Lena* та *Barbara* з різними рівнями шуму із використанням метрик PSNR, *convergence_iter* та *runtime*. Показано, що Adaptive Median filter забезпечує суттєво вищу якість відновлення (≈ 32.7 dB) порівняно з Gaussian filter (≈ 24.7 dB), при цьому досягаючи збіжності вже на початкових ітераціях. Встановлено, що тип фільтра має визначальний вплив на якість знесумлення, тоді як біонічні алгоритми оптимізації впливають переважно на швидкість збіжності та обчислювальну ефективність.

Ключові слова: інформаційні технології, знесумлення зображень, біонічні алгоритми, оптимізація.

Вступ. Задача знесумлення зображень є важливою складовою сучасних систем комп'ютерного зору, медичної візуалізації та супутникового моніторингу. У реальних умовах зображення часто спотворюються шумами, серед яких особливу складність становить імпульсний шум типу *salt & pepper*, що проявляється у вигляді випадкових пікселів із екстремальними значеннями інтенсивності та ускладнює відновлення структурних деталей.

Якість фільтрації значною мірою визначається параметрами фільтрів. Некоректний вибір параметрів може призводити як до недостатнього пригнічення шуму, так і до втрати важливих деталей зображення. У більшості випадків ці параметри підбираються емпірично, що є суб'єктивним і не гарантує оптимального результату.

У зв'язку з цим доцільним є застосування біонічних алгоритмів оптимізації, які дозволяють автоматично знаходити ефективні параметри фільтрів у складних нелінійних умовах. Метою роботи є порівняльний аналіз ефективності біонічних алгоритмів при оптимізації параметрів фільтрів знешумлення зображень в умовах імпульсного шуму з урахуванням якості відновлення та швидкості збіжності.

Огляд біонічних алгоритмів. Біонічні алгоритми оптимізації є популяційними стохастичними методами, що використовують множину кандидатних рішень для паралельного пошуку у просторі параметрів. Їх характерною особливістю є поєднання випадковості та використання інформації про найкращі знайдені рішення, що дозволяє уникати локальних оптимумів. Ключовим принципом є баланс між двома процесами: exploration (глобальне дослідження простору рішень) та exploitation (локальне уточнення). Ефективність алгоритму визначається здатністю підтримувати цей баланс у процесі оптимізації.

До класичних підходів належать генетичні алгоритми (GA) та Particle Swarm Optimization (PSO), які широко застосовуються як базові методи. Однак вони часто потребують налаштування значної кількості гіперпараметрів і можуть демонструвати повільнішу збіжність. Сучасні алгоритми, такі як HHO, GWO та WOA, мають простішу структуру, меншу кількість керуючих параметрів та більш ефективний баланс між exploration і exploitation, що робить їх зручнішими для практичного застосування.

У роботі розглядаються такі біонічні алгоритми Harris Hawks Optimization (HHO):

- використовує адаптивний механізм переходу між фазами пошуку, що залежить від динаміки процесу оптимізації; Grey Wolf Optimizer (GWO)
- базується на ієрархічній структурі популяції та орієнтації на лідерів; Whale Optimization Algorithm (WOA)
- поєднує глобальний пошук із локальним уточненням через спіральні оновлення; Ant Colony Optimization (ACO) для неперервних задач
- використовує ймовірнісне моделювання для генерації нових рішень. Ці алгоритми характеризуються відносною простотою налаштування та ефективністю в задачах неперервної оптимізації.

Постановка задачі. Задача полягає у знаходженні параметрів фільтра, що забезпечують максимальну якість відновлення зображення. Нехай задано чисте та зашумлене зображення, отримане шляхом додавання імпульсного шуму. Необхідно знайти параметри фільтра, які максимізують значення PSNR між відновленим і оригінальним зображенням.

Методика експериментів. Для оцінювання ефективності біонічних алгоритмів у задачі оптимізації параметрів фільтрів знешумлення було сформовано контрольований експериментальний протокол, який забезпечує коректне порівняння алгоритмів за однакових умов.

У дослідженні використано два стандартні тестові зображення у відтінках сірого: зображення з переважно гладкими областями та помірною кількістю текстур (Lena); зображення зі складною текстурною структурою, що містить велику кількість високочастотних деталей (Barbara). Використання цих двох зображень дозволяє оцінити ефективність методів як на простих, так і на складних сценах. До зображень додається імпульсний шум типу *salt & pepper*, який характеризується випадковою заміною пікселів на мінімальні або максимальні значення інтенсивності. Розглядаються два рівні шуму: (0.03) із низьким рівнем шуму та (0.06) – середнім. Такий вибір дозволяє дослідити поведінку алгоритмів при різній інтенсивності спотворень.

У роботі використовуються два типи фільтрів: **Gaussian filter** — лінійний фільтр згладжування з параметром (σ), **Adaptive Median filter** — нелінійний фільтр, призначений для ефективного видалення імпульсного шуму, з параметром максимального розміру вікна. Ці фільтри представляють різні підходи до знешумлення, що дозволяє провести більш повний аналіз.

Для оптимізації параметрів фільтрів застосовуються біонічні алгоритми ННО, GWO, WOA, АСО. Алгоритми відрізняються механізмами пошуку, що дозволяє оцінити їх ефективність у контексті поставленої задачі. Для всіх алгоритмів використовуються однакові параметри: розмір популяції – 20, кількість ітерацій – 60, кількість запусків – $N\_RUNS = 1$, розмір зображень – (128 * 128) пікселів. Така конфігурація забезпечує баланс між обчислювальною складністю та достатньою точністю результатів.

У роботі використовується базовий експериментальний сценарій, реалізований у модулі *main_runner*, який передбачає повне факторне поєднання досліджуваних компонентів: $\text{algorithm} \times \text{filter} \times \text{noise} \times \text{image}$. Додаткові експерименти, пов'язані з масштабуванням параметрів алгоритмів та аналізом їх внутрішніх параметрів, у даній роботі не розглядаються, оскільки виходять за межі поставленої задачі тез.

Для аналізу результатів використовуються такі метрики: **PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio)** — основна метрика якості відновлення; **convergence_iter** — ітерація, на якій досягається 99% від максимального значення PSNR; **runtime** — час виконання алгоритму.

Результати. У результаті проведених експериментів було отримано кількісні оцінки ефективності біонічних алгоритмів при оптимізації параметрів фільтрів знешумлення. Аналіз результатів показав суттєву залежність якості від типу фільтра та значно меншу залежність від обраного алгоритму оптимізації. Для Gaussian filter середнє значення PSNR становило приблизно 24.68 dB для всіх алгоритмів, при цьому ітерація збіжності знаходилась на рівні (*convergence_iter* $\approx$ 16). Це свідчить про поступову збіжність алгоритмів і наявність фази активного пошуку параметрів. Для Adaptive Median filter отримано значно вищі значення PSNR — близько 32.7 dB, при цьому (*convergence_iter* = 1) для всіх алгоритмів. Це означає, що оптимальне або близьке до оптимального рішення досягається вже на початковій ітерації.

Час виконання (*runtime*) для Gaussian filter знаходиться в межах 200–280 мс, тоді як для Adaptive Median filter — значно більший ($\approx$ 1100–1600 мс), що пов'язано з обчислювальною складністю адаптивного вікна.

Аналіз scaling-експериментів показав, що збільшення розміру популяції та кількості ітерацій має обмежений вплив на фінальне значення PSNR, але призводить до зростання обчислювальних витрат. Internal-параметри алгоритмів також впливають переважно на швидкість збіжності, а не на кінцеву якість рішення.

Обговорення. Отримані результати дозволяють зробити кілька важливих висновків щодо поведінки алгоритмів та фільтрів. По-перше, відмінності між алгоритмами (ННО, GWO, WOA, ACO) у даній задачі є незначними з точки зору фінального значення PSNR. Це може свідчити про відносно простий ландшафт функції якості, де всі алгоритми здатні знайти близькі до оптимальних рішення. По-друге, значення (*convergence_iter* = 1) для adaptive median свідчить про те, що даний фільтр є малочутливим до параметрів у межах досліджуваного діапазону. Фактично, оптимізація не відіграє суттєвої ролі, оскільки хороше рішення досягається вже на етапі ініціалізації. На відміну від цього, Gaussian filter демонструє залежність від параметрів, що підтверджується більшими значеннями *convergence_iter*. Це означає, що біонічні алгоритми дійсно виконують корисну оптимізацію, поступово покращуючи якість рішення. По-третє, тип фільтра має значно більший вплив на якість знешумлення, ніж вибір алгоритму оптимізації. Adaptive Median filter демонструє суттєво кращі результати для імпульсного шуму, що підтверджує його спеціалізовану природу.

Разом з тим, різниця у значеннях *runtime* та *convergence_iter* дозволяє оцінити ефективність алгоритмів з точки зору швидкості збіжності, що є важливим фактором при практичному застосуванні. Результати scaling-експериментів підтверджують, що збільшення ресурсів (популяції, ітерацій) не завжди призводить до покращення якості, що вказує на наявність ефекту насичення.

Висновки

У роботі проведено порівняльний аналіз біонічних алгоритмів оптимізації параметрів фільтрів знешумлення зображень в умовах імпульсного шуму.

Показано, що: 1) якість знешумлення в першу чергу визначається типом фільтра; 2) Adaptive Median filter забезпечує кращі результати для імпульсного шуму; 3) Gaussian filter суттєво виграє від застосування оптимізації параметрів; 4) біонічні алгоритми демонструють подібну ефективність у даній задачі; 5) *convergence_iter* є інформативною метрикою для оцінки швидкості збіжності алгоритмів.

Отримані результати підтверджують доцільність використання біонічних алгоритмів для задач оптимізації параметрів, а також вказують на важливість вибору відповідного типу фільтра для конкретного виду шуму.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Mirjalili S., Mirjalili S. M., Lewis A. Grey Wolf Optimizer // Advances in Engineering Software. – 2014. – Vol. 69. – P. 46–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
2. Heidari A. A., Mirjalili S., Faris H. et al. Harris Hawks Optimization: Algorithm and Applications // Future Generation Computer Systems. – 2019. – Vol. 97. – P. 849–872. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.028>
3. Mirjalili S., Lewis A. The Whale Optimization Algorithm // Advances in Engineering Software. – 2016. – Vol. 95. – P. 51–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008>
4. Dorigo M., Stützle T. Ant Colony Optimization. – MIT Press, 2004. URL: <https://mitpress.mit.edu/9780262042192/ant-colony-optimization/>
5. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing. – Pearson, 2018. URL: <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/digital-image-processing/P2000000003390>

COMPARATIVE ANALYSIS OF BIONIC ALGORITHMS OPTIMIZATION

PARAMETERS OF FILTERS FOR DENOISING IMAGES WITH IMPULSE NOISE

Kyrylo Dorohokuplia, Vadym Andriushchenko

Abstract. *The paper investigates the effectiveness of bionic algorithms for optimizing image denoising filter parameters in conditions of salt & pepper impulse noise. A comparative analysis of the HHO, GWO, WOA and ACO algorithms when setting the parameters of Gaussian and Adaptive Median filters is carried out. Experiments are performed on standard test images Lena and Barbara with different noise levels using the PSNR, convergence_iter and runtime metrics. It is shown that the Adaptive Median filter provides significantly higher restoration quality (≈ 32.7 dB) compared to the Gaussian filter (≈ 24.7 dB), while achieving convergence already in the initial iterations. It is established that the type of filter has a decisive influence on the quality of denoising, while bionic optimization algorithms mainly affect the convergence speed and computational efficiency.*

Keywords: *information technology, image denoising, bionic algorithms, optimization.*

АНАЛІЗ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ПЛОДООВОЧЕВИХ КОНСЕРВІВ У ВЕРТИКАЛЬНИХ АВТОКЛАВАХ

Дукач А.Ю.¹ [ORCID], Рудакова Г.В.² [ORCID], Поліщук В.М.³ [ORCID]

¹Херсонський національний технічний університет, аспірант, Україна

²Херсонський національний технічний університет, д.т.н., професор, Україна

³Херсонський національний технічний університет, ³к.т.н., доцент, Україна

Анотація. У роботі проведено аналіз існуючих методів керування процесами термічної обробки плодоовочевих консервів у вертикальних автоклавах. Розглянуто проблеми використання традиційних пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів, зумовлені значною тепловою інерційністю об'єкта та складністю налаштування під різні типи і маси завантаження. Проаналізовано перспективні підходи до автоматизації, зокрема прогнозує керування на основі моделей (MPC), яке дозволяє оптимізувати процес безпосередньо за цільовим показником накопиченої мікробіологічної летальності (F_0) з урахуванням технологічних обмежень. Окрему увагу приділено можливостям застосування інтелектуальних методів, таких як адаптивні нечіткі регулятори (Fuzzy-PID) та штучні нейронні мережі (ANN), що виконують функцію віртуальних "м'яких сенсорів" для прогнозування температури всередині тари. За результатами аналізу обґрунтовано необхідність переходу до гібридних інтелектуальних систем керування для забезпечення енергоефективності, компенсації нелінійності процесів теплообміну та збереження харчової цінності складноструктурної гетерогенної продукції.

Ключові слова: вертикальний автоклав, термічна обробка, ПІД-регулятор, прогнозує керування, нечітка логіка, штучні нейронні мережі, накопичена летальність, оптимізація керування.

Вступ. Процес консервації харчових продуктів спрямований на збереження їхньої якості та безпечності протягом тривалого часу. Основним завданням є запобігання розвитку мікроорганізмів і сповільнення біохімічних змін, що призводять до псування [1]. Саме термічна обробка в автоклавах забезпечує надійну стерильність та тривалий термін зберігання консервів без застосування штучних добавок [2]. Але цей процес є досить складним і потребує точного контролю температурних режимів та тривалості впливу.

Недотримання оптимальних параметрів може призвести як до втрати поживних і смакових властивостей продукції, так і до загрози мікробіологічної небезпеки. Використання традиційних систем керування вертикальними автоклавами часто супроводжується значними енерговитратами, нерівномірністю теплових режимів та ризиками зниження якості кінцевого продукту. Саме тому важливим завданням є оптимізація комп'ютеризованих систем управління процесом термічної обробки плодоовочевих консервів з метою підвищення ефективності роботи обладнання, зменшення енерговитрат, забезпечення належної якості та безпечності готової продукції [3].

Метою дослідження є проведення аналізу методів керування процесів термічної обробки плодоовочевих консервів у вертикальних автоклавах.

Основна частина. Використовувані в промисловості автоклави являють собою складні високотехнологічні агрегати, що працюють із великою продуктивністю. В даний час існує багато різновидів автоклавів, є серед них спеціалізовані моделі, та, не дивлячись на це все, вони працюють за одним принципом: нагрів продукту, що піддається стерилізації, в фасованих ємностях до високої температури при певному тиску. Тиск має підвищене значення в порівнянні з атмосферним, в результаті чого запобігається руйнування (розрив) тари (посуду) за рахунок компенсації температурного розширення консервів, що нагріваються. Схему компонентів комплексу термічної обробки наведено на рис. 1.

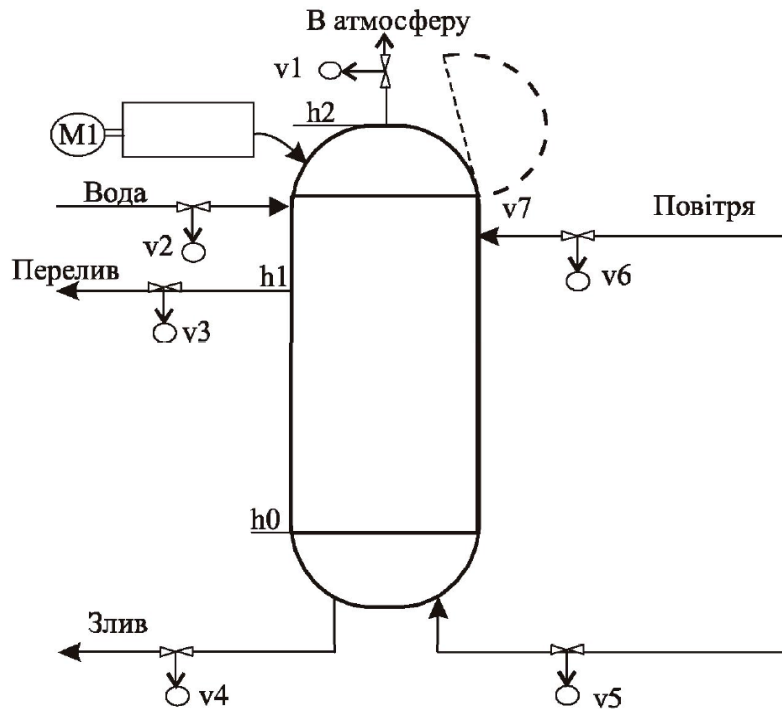


Рисунок 1 – Автоклав з протитиском

Двома основними компонентами комплексу, що розглядається, є апарат періодичної дії (АПД) і контролер. Контролер надсилає об'єкту сигнали керування вентилями V1-V6, кришкою V7 і тельфером МІ. Для правильного керування об'єктом контролеру необхідно врахувати значення рівнів, температур, тиску та інтервалів часу [4].

Системи керування процесами стерилізації та пастеризації у вертикальних автоклавах використовують комплексний підхід, що базується на поєднанні термодинамічного моделювання, класичних алгоритмів регулювання та інтелектуальних систем. Кожен з існуючих підходів має свої технологічні особливості, переваги та критичні обмеження щодо забезпечення необхідного рівня летальності мікроорганізмів (коефіцієнт F_0) при збереженні харчової цінності продукту.

1. Традиційні методи керування базуються на використанні пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів, які є промисловим стандартом для підтримання заданої температури та тиску в автоклаві. Дані методи ґрунтуються на безперервному обчисленні помилки між бажаною температурою середовища (уставки) та фактичною температурою, що вимірюється термодатчиками (РТ100 або термопарами).

Головною проблемою традиційних ПІД-регуляторів у контексті вертикальних автоклавів є значна теплова інерційність та нелінійність процесу. Завантажений плодоовочевими консервами автоклав має велику теплоємність. Оскільки класичний ПІД-регулятор налаштовується на фіксовані коефіцієнти, він не може гнучко адаптуватися до зміни маси завантаження або типу консервів. Це часто призводить до перерегулювання або занадто повільного виходу на режим стерилізації, що збільшує енерговитрати та може погіршити органолептичні властивості (смак, колір) і харчову цінність продукту.

2. Прогнозуюче керування на основі моделей Model Predictive Control (MPC).

Метод MPC являє собою один із найбільш перспективних напрямків сучасної теорії автоматичного керування для складних теплотехнічних об'єктів. На відміну від класичних ПІД-регуляторів, які обчислюють керуючий сигнал лише на основі поточного відхилення температури, MPC використовує динамічну математичну модель автоклава для передбачення його поведінки в майбутньому на певний проміжок часу (горизонт прогнозування). Система розраховує цілий план дій на майбутнє (H_c кроків), але на виконавчий механізм подається лише перший крок цього плану. На наступному такті система отримує нові дані з датчиків, горизонт зсувається на один крок вперед, і весь процес оптимізації повторюється. Критичною перевагою алгоритмів MPC для процесів консервування є їхня здатність системно враховувати жорсткі технологічні та апаратні обмеження прямо під час розрахунку функції J .

На відміну від класичних ПІД-регуляторів, які обмежуються жорстким підтриманням заданого графіка температури теплоносія (пари або води), системи прогнозного керування (MPC) дозволяють оптимізувати процес, орієнтуючись на головний кінцевий результат – мікробіологічну безпеку [5].

Ключова проблема промислової стерилізації полягає в тому, що розмістити фізичні термодатчики в кожній банці під час реального виробництва неможливо. Тому метод MPC використовує теплофізичну математичну модель для "віртуального" розрахунку $T(t)$ у режимі реального

часу [6]. Алгоритм безперервно прогнозує, як тепло передається від середовища автоклава через стінку тари вглиб продукту.

Такий підхід прямого керування за летальністю (Lethality-based control) має дві вагомі переваги порівняно з традиційними методами:

- енергоефективність: процес нагрівання не триває довше, ніж це мінімально необхідно для знезараження, що суттєво економить пару та електроенергію.

- збереження якості продукту: мінімізується термічна деградація поживних речовин. Уникнення "переварювання" дозволяє зберегти більше вітамінів (зокрема термолабільного вітаміну С) та покращує органолептичні властивості овочів (їхню структуру, колір та хрусткість).

3. Інтелектуальні методи (Нечітка логіка та Нейронні мережі)

Процес термічної обробки плодоовочевих консервів у вертикальних автоклавах характеризується високим ступенем нелінійності, нестаціонарністю теплофізичних параметрів (залежно від типу продукту: горошок, кукурудза тощо) та змінною масою завантаження. Для подолання цих проблем традиційні математичні моделі все частіше замінюються або доповнюються системами штучного інтелекту – нечіткою логікою та штучними нейронними мережами [7].

1). Адаптивні нечіткі-PID регулятори.

Класичний ПІД-регулятор має жорстко задані коефіцієнти налаштування. Натомість нечіткий регулятор використовує базу експертних знань для безперервної адаптації цих коефіцієнтів у режимі реального часу. Такий підхід дозволяє системі керування автоклавом поводитися подібно до досвідченого оператора, плавно знижуючи потужність нагріву при наближенні до уставки та повністю усуваючи проблему перерегулювання.

2). Нейромережеве прогнозування та "м'які сенсори".

Головна технологічна проблема стерилізації – неможливість прямого вимірювання температури всередині кожної банки в промислових умовах. Впровадження фізичних термопар руйнує герметичність тари і застосовується лише в лабораторних цілях.

Для вирішення цієї проблеми використовують штучні нейронні мережі, які виконують роль "м'якого сенсора" (віртуального датчика).

У контексті керування автоклавом розробляються багат шарові перцептрони або рекурентні нейронні мережі, де:

- вхідні дані: поточна температура та тиск середовища в автоклаві, час від початку процесу, початкова температура продукту, тип тари;

- прихований шар: витягує складні нелінійні залежності процесу теплообміну.

- вихідні дані: прогнозована температура в "холодній точці" банки T_{core} або безпосередньо розрахований показник накопиченої летальності F_0 .

Навчання такої мережі відбувається на великих історичних датасетах, зібраних під час лабораторних прогонів з реальними датчиками. Після навчання (мінімізації функції втрат) нейромережа здатна з високою точністю, а саме з похибкою менше 0.5°C прогнозувати температуру продукту виключно на основі показників середовища автоклава.

Незважаючи на високу гнучкість, системи на базі ANN критично залежать від репрезентативності навчальних даних. Якщо на завод надійде партія кабачків з іншою щільністю або вологістю, ніж ті, на яких навчалася модель, точність віртуального датчика може суттєво знизитись. Саме тому найперспективнішим напрямком є створення гібридних нейро-нечітких мереж (ANFIS).

Висновки. Проведений аналіз існуючих технологічних рішень дозволяє стверджувати, що на сьогодні відсутній єдиний універсальний підхід до керування режимами стерилізації у вертикальних автоклавах. Хоча класичні контури регулювання на базі ПІД-законів продовжують масово експлуатуватися на підприємствах харчової промисловості завдяки своїй простоті, вони фактично вичерпали свій оптимізаційний потенціал. Такі системи гарантують базову мікробіологічну безпеку, проте не здатні забезпечити гнучке енергозбереження та максимальне збереження харчової цінності (зокрема термолабільних вітамінів) у плодоовочевій продукції.

Окремою науково-практичною проблемою залишається термічна обробка складноструктурної консервації. Більшість існуючих прогностичних моделей показують високу точність лише для гомогенних середовищ (наприклад,

фруктових соків або пюре). Водночас значна частина плодоовочевих консервів (овочеві рагу, лечо, багатокомпонентні салати) є складними гетерогенними системами зі змінними теплофізичними властивостями. Використання стандартних алгоритмів для таких продуктів призводить до значних похибок у розрахунках накопиченої летальності та, як наслідок, до термічного пошкодження сировини (переварювання).

Виходячи з виявлених недоліків, найбільш перспективним вектором розвитку автоматизації в цій галузі є відмова від ізольованих методів на користь синергії класичної теорії керування та технологій штучного інтелекту. Впровадження гібридних комплексів – зокрема, адаптивних нечітких регуляторів (Fuzzy-PID) або систем предиктивного керування з елементами нейромережевої корекції – дозволить компенсувати нелінійність процесів теплообміну та індивідуальні властивості різної плодоовочевої сировини.

ЛІТЕРАТУРА

1. Alpert A. J., Alfaro E. Managing Indoor Mushroom Cultivation: A Protocol-Based Approach to Controlled Environment Agriculture. ScholarWorks. Cal Poly Pomona, 2024. URL: <https://scholarworks.calstate.edu/concern/projects/2j62sf452>.
2. Luh B. S. Principles and Applications of Vegetable Processing. Processing Vegetables / ed. by D. S. Smith, J. N. Cash, W. K. Nip, Y. H. Hui. Boca Raton: Routledge, 1997. P. 1–46. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203741863-2>.
3. Khalilov F. V. Automation of the Sterilization Process of Canned Products in the Master SCADA System. Galaxy International Interdisciplinary Research Journal. 2021. Vol. 9, No. 12. P. 659–662. URL: <https://www.neliti.com/publications/597160/automation-of-the-sterilization-process-of-canned-products-in-the-master-scada-s>.
4. Треруб В.Г. Побудова математичної моделі автоматизованого апарата періодичної дії / В.Г. Треруб // Харчова промисловість. — 2004. — № 3. — С. 165–169.
5. Jimenez P. S., Bangar S. P., Suffern M., Whiteside W. S. Understanding retort processing: A review. Food Science & Nutrition. 2024. Vol. 12. P. 1545–1563. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/fsn3.3912>.
6. Tirado-Kulieva V. A. Computational Applications for the Evaluation and Simulation of the Thermal Treatment of Canned Foods. IntechOpen, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.78107>.
7. Artificial intelligence techniques for microwave drying of agricultural products: A review. IoT and AI in Agriculture. Springer, 2024. P. 311–341. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-95-5218-4_21.

ANALYSIS OF CONTROL METHODS FOR THERMAL PROCESSING OF CANNED FRUITS AND VEGETABLES IN VERTICAL AUTOCLAVES

Andriy Dukach, Hanna Rudakova, Valentyn Polishchuk

Abstract. *The paper examines the features of the process of heat treatment of canned fruits and vegetables in vertical autoclaves aimed at preserving their quality and safety for a long time. An analysis of existing methods of controlling the processes of heat treatment of canned fruits and vegetables in vertical autoclaves is carried out. The problems of using traditional proportional-integral-differential (PID) controllers are considered, due to the significant thermal inertia of the object and the complexity of setting it up for different types and masses of loading. Promising approaches to automation are analyzed, in particular model-based predictive control (MPC), which allows optimizing the process directly according to the target indicator of accumulated microbiological lethality (F0) taking into account technological limitations. Special attention is paid to the possibilities of using intelligent methods, such as adaptive fuzzy controllers (Fuzzy-PID) and artificial neural networks (ANN), which perform the function of virtual "soft sensors" for predicting the temperature inside the container. It was found that the use of standard algorithms for such products leads to significant errors in the calculations of accumulated lethality and, as a result, to thermal damage to raw materials (digestion). The results of the analysis substantiate the need to transition to hybrid intelligent control systems to ensure energy efficiency, compensate for the nonlinearity of heat exchange processes and preserve the nutritional value of complex heterogeneous products.*

Keywords: *vertical autoclave, heat treatment, PID controller, predictive control, fuzzy logic, artificial neural networks, accumulated lethality, control optimization.*

REFERENCE

1. Alpert A. J., Alfaro E. Managing Indoor Mushroom Cultivation: A Protocol-Based Approach to Controlled Environment Agriculture. ScholarWorks. Cal Poly Pomona, 2024. URL: <https://scholarworks.calstate.edu/concern/projects/2j62sf452>.
2. Luh B. S. Principles and Applications of Vegetable Processing. Processing Vegetables / ed. by D. S. Smith, J. N. Cash, W. K. Nip, Y. H. Hui. Boca Raton: Routledge, 1997. P. 1–46. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203741863-2>.
3. Khalilov F. V. Automation of the Sterilization Process of Canned Products in the Master SCADA System. Galaxy International Interdisciplinary Research Journal. 2021. Vol. 9, No. 12. P. 659–662. URL: <https://www.neliti.com/publications/597160/automation-of-the-sterilization-process-of-canned-products-in-the-master-scada-s>.
4. Trehub V.H. Pobudova matematychnoi modeli avtomatyzovanoho aparata periodychnoi dii / V.H. Trehub // Kharchova promyslovist. — 2004. — № 3. — S. 165–169. [in Ukrainian].

5. Jimenez P. S., Bangar S. P., Suffern M., Whiteside W. S. Understanding retort processing: A review. Food Science & Nutrition. 2024. Vol. 12. P. 1545–1563. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/fsn3.3912>.
6. Tirado-Kulieva V. A. Computational Applications for the Evaluation and Simulation of the Thermal Treatment of Canned Foods. IntechOpen, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.78107>.
7. Artificial intelligence techniques for microwave drying of agricultural products: A review. IoT and AI in Agriculture. Springer, 2024. P. 311–341. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-95-5218-4_21.

ТРАНСФОРМАЦІЯ НАВЧАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА З НАЛАГОДЖЕННЯ В ЕПОХУ GITHUB COPILLOT: ЯК ЗБЕРЕГТИ ЕФЕКТИВНІСТЬ НАВЧАННЯ?

Завгородній А.Д.¹ [ORCID], Іванов О.П.² [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

²Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

Анотація. У роботі досліджено проблему трансформації методики навчання налагодженню програмного забезпечення в умовах активного впровадження ШІ-асистентів. Розглянуто феномен «когнітивної пасивності» студентів та обмеження сучасних LLM при роботі зі складними програмними системами. Запропоновано концепцію формування ШІ-резистентних навчальних завдань, що базуються на архітектурній складності та великих обсягах контексту, що є критичним для обмеження можливостей автоматизованого розв'язання. Обґрунтовано впровадження системи збору телеметрії взаємодії студента із середовищем розробки (IDE) як інструменту верифікації самостійності виконання робіт. Визначено ключові метрики відмінності між діями людини та ШІ-агентів, серед іншого, часові параметри опрацювання контексту та патерни використання інструментів налагодження (breakpoints, stack trace, stepping). Описано прототип інструментарію, що реалізує двокомпонентну модель оцінювання, яка враховує як коректність рішення, так і методологічну цілісність процесу налагодження. Результати дослідження спрямовані на створення адаптивних освітніх систем із можливістю формування індивідуальних рекомендацій для студентів.

Ключові слова: великі мовні моделі, інформаційні технології, налагодження, програмне забезпечення, телеметрія розробки, управління процесами.

У сучасних умовах, коли технології штучного інтелекту (ШІ) невпинно прогресують, спостерігається формування стійкої залежності майбутніх розробників від інтерактивних помічників [0, 0, 0, 0, 0, 0]. Це явище часто проявляється як «когнітивна пасивність» при виконанні навчальних завдань. Попри значні успіхи, застосування ШІ в процесах налагодження (debugging) залишається недосконалим [0, 0]. У той час як типові помилки та прості алгоритмічні задачі легко вирішуються сучасними моделями, реальні виклики, з якими стикаються розробники у професійній діяльності, часто виходять за межі поточних можливостей ШІ.

Практична складова опанування навичок налагодження пов'язана з виконанням лабораторних та самостійних робіт. Проте широка доступність ІІІ радикально знижує ймовірність того, що студент пройде весь шлях пошуку помилки власноруч [0, 0]. Особливо гостро ця проблема постає в умовах дистанційного навчання [0], де верифікація самостійності виконання роботи перетворюється на надскладне завдання для викладача [0].

Традиційна перевірка зазвичай обмежується аналізом фінального результату (вихідних даних програми) або, у кращому випадку, дискусією, під час якої студент має пояснити свої дії [0]. Останній метод є надзвичайно часозатратним і складно масштабованим у межах жорстко регламентованих освітніх програм. Це створює запит на створення систем автоматизованого моніторингу процесу вирішення задач.

Для вирішення окреслених проблем потрібен комплексний підхід. Першим кроком є розробка «ІІІ-резистентних» задач – таких, що слугують якісним матеріалом для навчання стратегіям налагодження, але при цьому не можуть бути миттєво вирішені простим запитом до LLM [0].

Аналіз показує, що ефективність роботи ІІІ значно зростає за умови використання детальних назв змінних та розлогих коментарів, що описують призначення блоків коду [0]. Однак проста обфускація (навмисне заплутування) є помилковим шляхом, оскільки вона створює надмірне когнітивне навантаження на студента, змушуючи його витрачати ресурси на дешифрування тексту, а не на аналіз логічних помилок. Необхідний пошук «золотої середини» між заплутаністю та зрозумілістю, де складність полягає в архітектурних зв'язках, а не в синтаксичному шумі.

Іншим важливим аспектом є протидія передачі готових рішень між студентами через генерацію індивідуальних завдань. Сучасні дослідження часто фокусуються на малих фрагментах коду в межах однієї функції, що є легкою здобиччю для ІІІ [0]. Натомість перспективним є підхід, що базується на вразливостях LLM при роботі з великими репозиторіями та розпорошеним контекстом [0, 0, 0]. Коли велика кількість взаємопов'язаних файлів заважає простому «one-shot» вирішенню [0], це змушує систему (або студента)

використовувати складні агентні модифікації та багаторівневу взаємодію, що значно легше піддається аналізу та верифікації.

Другим критичним напрямком є створення інструментарію для збору телеметрії взаємодії студента із середовищем розробки (IDE) [0]. У 2026 році стає очевидним, що роботу автономних агентів, які діють на рівні термінальних команд, складно перехопити стандартними розширеннями, проте можна зосередитись на виявленні патернів взаємодії [0, 0, 0].

Головним критерієм може бути аналіз швидкості та природи опрацювання інформації. ШІ-агент отримує та аналізує контекст файлів за мілісекунди, тоді як людині для когнітивного сприйняття та перемикання між модулями потрібно від декількох секунд до хвилин [0, 0]. Аномально висока кількість відкритих та змінених файлів за короткий проміжок часу є прямим індикатором використання автоматизованих скриптів [0].

Пропонований інструментарій має оцінювати роботу комплексно, аналізуючи очікувані процеси налагодження в середовищах на кшталт Visual Studio. До зазначених процесів можна віднести, зокрема, такі:

- встановлення та модифікація точок зупину (breakpoints), зокрема умовних;
- покрокова ітерація (stepping) через контексти методів;
- аналіз стека викликів (stack trace) та значень локальних змінних у вікнах Watch;
- часова тривалість фокусування на конкретних ділянках коду.

Заключним елементом запропонованого підходу є синергія інструментарію та комплексних задач. Зібрана телеметрія має стати таким самим валідним підтвердженням успішного виконання завдання, як і правильний фінальний код. Це дозволяє сформувати оцінку з двох компонентів: результативної та процесуальної.

Висновки

Подальша робота має бути спрямована на розширення можливостей генерації ШІ-резистентних задач та формування «маніфесту очікуваних процесів» для кожної вправи. Розробка гнучкого інструментарію збору телеметрії не лише допоможе у виявленні академічної недоброчесності, а й

дозволить збирати цінні дані про якість засвоєння матеріалу. Це відкриває шлях до створення систем індивідуальних рекомендацій, які підкажуть студенту, на які аспекти налагодження йому слід звернути увагу, що є критично актуальним у сучасному освітньому просторі, де роль викладача все більше зміщується в бік посередника складних процесів розробки.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Stasiuk O. L., Khomik O. M., Karpiuk D. R. Analiz pravovykh ryzykiv tsyfrovoho otsiniuvannia v umovakh zmishanoho navchannia. 2025. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.16869553> (date of access: 31.03.2026). [in Ukrainian].
2. Amoozadeh M. et al. Student-AI Interaction: A Case Study of CS1 students. 2024. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.00305> (date of access: 31.03.2026).
3. Basha M. et al. CodeWatcher: IDE Telemetry Data Extraction Tool for Understanding Coding Interactions with LLMs. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2510.11536> (date of access: 31.03.2026).
4. Beleulmi S. Challenges Of Online Assessment During Covid-19 Pandemic: An Experience Of Study Skills Teachers. 2022. مجلة آفاق للعلوم. C. 49. URL: <https://doi.org/10.37167/1677-007-002-004> (date of access: 31.03.2026).
5. Cotroneo D. et al. Human-Written vs. AI-Generated Code: A Large-Scale Study of Defects, Vulnerabilities, and Complexity. 2025. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.21634> (date of access: 31.03.2026).
6. Denny P. et al. Computing Education in the Era of Generative AI. Communications of the ACM. 2024. URL: <https://doi.org/10.1145/3624720> (date of access: 31.03.2026).
7. Eibl P. et al. Exploring the Challenges and Opportunities of AI-assisted Codebase Generation. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2508.07966> (date of access: 31.03.2026).
8. Gerlich M. AI Tools in Society: Impacts on Cognitive Offloading and the Future of Critical Thinking. Societies. 2025. T. 15, № 1. C. 6. URL: <https://doi.org/10.3390/soc15010006> (date of access: 31.03.2026).
9. Ihantola P. et al. Educational Data Mining and Learning Analytics in Programming. ITICSE '15: Innovation and Technology in Computer Science Education Conference 2015. Vilnius, Lithuania. New York, USA, 2015. URL: <https://doi.org/10.1145/2858796.2858798> (date of access: 31.03.2026).
10. Korpimies K. et al. Unrestricted Use of LLMs in a Software Project Course: Student Perceptions on Learning and Impact on Course Performance. 2024. URL: <https://doi.org/10.1145/3699538.3699541> (date of access: 31.03.2026).
11. Kundu D. et al. Keystroke Dynamics Against Academic Dishonesty in the Age of LLMs. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2406.15335> (date of access: 31.03.2026).
12. Liang S. et al. The SWE-Bench Illusion: When State-of-the-Art LLMs Remember Instead of Reason. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2506.12286> (date of access: 31.03.2026).
13. McDanel B., Novak E. Designing LLM-Resistant Programming Assignments: Insights and Strategies for CS Educators. SIGCSE TS 2025. Pittsburgh, USA. New York, USA, 2025. S. 756–762. URL: <https://doi.org/10.1145/3641554.3701872> (date of access: 31.03.2026).

14. Messer M. et al. How Consistent Are Humans When Grading Programming Assignments? 2025. T. 25, № 4. URL: <https://doi.org/10.1145/3759256> (date of access: 31.03.2026).
15. Pădurean V. et al. BugSpotter: Automated Generation of Code Debugging Exercises. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2411.14303> (date of access: 31.03.2026).
16. Pitts G. et al. Students' Reliance on AI in Higher Education: Identifying Contributing Factors. Communications in Computer and Information Science. Cham, 2026. C. 86–97. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-032-12773-0_9 (date of access: 31.03.2026).
17. Shen J. H., Tamkin A. How AI Impacts Skill Formation. 2026. URL: <https://arxiv.org/abs/2601.20245> (date of access: 31.03.2026).
18. Shihab M. et al. The Effects of GitHub Copilot on Computing Students' Programming Effectiveness, Efficiency, and Processes in Brownfield Coding Tasks. 2025. URL: <http://dx.doi.org/10.1145/3702652.3744219> (date of access: 31.03.2026).
19. Wang Z. et al. How Does Naming Affect Language Models on Code Analysis Tasks? 2024. URL: <http://dx.doi.org/10.4236/jsea.2024.1711044> (date of access: 31.03.2026).
20. Xu Z. et al. CodeVision: Detecting LLM-Generated Code Using 2D Token Probability Maps and Vision Models. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2501.03288> (date of access: 31.03.2026).
21. Yuan E. et al. Debug-gym: an environment for AI coding tools to learn how to debug code like programmers. 2024. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/research/blog/debug-gym-an-environment-for-ai-coding-tools-to-learn-how-to-debug-code-like-programmers/> (date of access: 31.03.2026).

TRANSFORMATION OF THE DEBUGGING LEARNING ENVIRONMENT IN THE ERA OF GITHUB COPILOT: HOW TO MAINTAIN LEARNING EFFECTIVENESS?

Andrii Zavhorodnii, Oleksandr Ivanov

Abstract. *This paper investigates the transformation of software debugging instructional methodologies amidst the active integration of AI assistants. It explores the phenomenon of student «cognitive passivity» and the limitations of current Large Language Models (LLMs) when dealing with complex software systems. A framework for designing «AI-resistant» learning tasks is proposed, leveraging architectural complexity and extensive context volumes to mitigate the potential for automated problem-solving. The study justifies the implementation of a telemetry collection system to monitor student interactions within the Integrated Development Environment (IDE) as a mechanism for verifying academic integrity and task autonomy. Key metrics for distinguishing between human and AI-agent activities are identified, including temporal context-processing parameters and debugging tool usage patterns (breakpoints, stack trace, stepping). Furthermore, the paper describes a prototype toolkit that implements a dual-component assessment model, considering both the correctness of the final code and the methodological integrity of the debugging process. The findings are aimed at developing adaptive educational systems capable of generating personalized recommendations for students.*

Keywords: *debugging, information technology, large language models, process management, software.*

**ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ДИНАМІКИ ЦІН
КРИПТОВАЛЮТ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ ТЕХНІЧНОГО АНАЛІЗУ ТА
ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ**

Зінченко І.О.¹ [ORCID], Радуль О.А.² [ORCID], Ляшенко О.А.³ [ORCID]

¹УДУНТ, студент, Україна

²УДУНТ, к.т.н., асистент, Україна

³УДУНТ, к.т.н., завідувач, Україна

Анотація. У доповіді представлено процес проєктування спеціалізованої вебплатформи, призначеної для візуалізації та прогнозування динаміки цін на ринку криптовалют. Метою дослідження є розробка архітектури інформаційної системи з використанням методології об'єктно-орієнтованого моделювання.

У ході дослідження проведено детальний аналіз предметної області, розглянуто існуючі методи прогнозування на основі штучного інтелекту та технічного аналізу. За допомогою CASE-засобу StarUML та мови UML розроблено комплексну модель системи: визначено функціональні вимоги (діаграма прецедентів), сформовано статичну структуру (діаграма класів) та описано динамічну поведінку (діаграми послідовності та станів). Окрему увагу приділено проєктуванню архітектури розгортання та структури бази даних. Практична значущість результатів полягає у створенні теоретичного та модельного підґрунтя для подальшої програмної реалізації аналітичного інструментарію. Розроблена модель може слугувати базою для створення реальних вебсервісів, орієнтованих на криптотрейдерів та фінансових аналітиків, що сприятиме підвищенню ефективності прийняття рішень на волатильних цифрових ринках.

Ключові слова: проєктування, інформаційна система, UML, вебплатформа, криптовалюти, прогнозування, штучний інтелект, технічний аналіз

Вступ та актуальність

Сучасний фінансовий ландшафт характеризується стрімким розвитком криптоактивів. На відміну від традиційних бірж, ринок криптовалют працює в режимі 24/7 і вирізняється екстремальною волатильністю. Це створює проблему «людського фактору»: трейдери часто приймають емоційні рішення, не в змозі опрацювати гігантські масиви даних у реальному часі.

Існуючі рішення або занадто складні для новачків, або позбавлені інструментів автоматизованого прогнозування. Тому розробка концептуальної моделі вебплатформи, що поєднує класичний технічний аналіз із предиктивними можливостями нейронних мереж, є актуальним науковим та інженерним завданням.

Мета та методи дослідження

Метою роботи є проєктування архітектури інформаційної системи для аналізу ринку та генерації прогнозів ціни. Об'єкт дослідження – процес обробки та інтелектуального аналізу біржових даних. Методи: об'єктно-орієнтований аналіз, системний аналіз та візуальне моделювання за допомогою мови UML у середовищі StarUML.

1. Аналіз предметної області та методів прогнозування

Для забезпечення точності прогнозів у системі реалізовано синтез двох підходів:

- Технічний аналіз - автоматичний розрахунок індикаторів, таких як експоненційна ковзна середня для визначення тренду, індекс відносної сили для виявлення зон перекупленості/перепроданості та Смуги Боллінджера для оцінки волатильності.

- Штучний інтелект - використання рекурентних нейронних мереж архітектури LSTM (Long Short-Term Memory). На відміну від стандартних мереж, LSTM здатні «запам'ятовувати» довгострокові залежності в часових рядах, що є критичним для аналізу котирувань.

2. Моделювання архітектури системи (UML-аналіз)

У ході проєктування було розроблено низку діаграм, що описують систему з різних ракурсів:

- Функціональні вимоги - визначено ключових акторів: Гість, Треjder, Адміністратор та зовнішній API Криптовіржі. Головним прецедентом визначено «Отримання AI-прогнозу», доступ до якого мають лише авторизовані користувачі.

- Статична структура - описано логіку взаємодії об'єктів User, CryptoAsset, MarketData, TechnicalIndicator та AIPrediction. Це забезпечує надійну інкапсуляцію даних та методів їх обробки.

- Динамічна поведінка - змодельовано життєвий цикл запиту на прогноз: від ініціації користувачем до активації нейромережі та візуалізації результату. Передбачено стани обробки виняткових ситуацій (наприклад, помилка зв'язку з API).

3. Проектування бази даних та розгортання

Інформаційне забезпечення - спроектовано реляційну базу даних у 3-й нормальній формі. Структура включає таблиці для зберігання профілів користувачів, довідників активів, масивів даних (ціни та об'єми) та архіву прогнозів.

Технічна реалізація - обрано трирівневу клієнт-серверу архітектуру:

Клієнтський рівень - Frontend для інтерактивної візуалізації графіків у браузері.

Рівень додатку - Backend-сервер, що містить ядро системи та обчислювальний модуль AI Engine (LSTM).

Рівень даних - виділений сервер бази даних (PostgreSQL) для швидкої обробки SQL-запитів.

Зв'язок між вузлами реалізується через протоколи HTTPS/WSS (клієнт-сервер) та TCP/IP (внутрішні запити), що гарантує безпеку та мінімальні затримки.

Висновки

Розроблена модель інформаційної системи вирішує проблему складності аналізу крипторинку для пересічного користувача. Результати проектування є готовим технічним завданням для програмної реалізації FinTech-стартапу. Поєднання класичних математичних індикаторів із потужністю LSTM-мереж дозволяє мінімізувати вплив емоцій на торгівлю та забезпечує науково обґрунтовану підтримку прийняття рішень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Буч Г., Рамбо Д., Якобсон І. UML 2.0. Об'єктно-орієнтоване моделювання та розробка. 2-ге вид. Київ: Діалектика, 2020. 736 с. [<https://www.pearson.com/store/p/uml-2-user-guide/P100001277745>]
2. Фаулер М. UML. Основи. Короткий посібник зі стандартної об'єктної мови моделювання. 3-тє вид. Львів: Світ, 2019. 192 с. [<https://www.informit.com/store/uml-distilled-a-brief-guide-to-the-standard-object-modeling-language-3rd-edition-9780321193681>]
3. Ларман К. Застосування UML і патернів проєктування. Вступ до об'єктно орієнтованого аналізу, проєктування та ітеративної розробки. Київ: Вільямс, 2018. 736 с. [<https://www.informit.com/store/applying-uml-and-patterns-an-introduction-to-object-oriented-analysis-and-design-and-iterative-development-9780131489066>]
4. Офіційна документація інструментального середовища StarUML. URL: <https://staruml.io/docs/> (дата звернення: 10.11.2023).
5. Специфікація Unified Modeling Language (UML) версії 2.5.1 / Object Management Group (OMG). URL: <https://www.omg.org/spec/UML/> (дата звернення: 11.11.2023).

DESIGN OF CRYPTOCURRENCY PRICE DYNAMICS FORECASTING SYSTEM BASED ON TECHNICAL ANALYSIS METHODS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Illia Zinchenko, Oleksandr Radul, Oksana Liashenko

Abstract. *Abstract The report presents the design process of a specialized web platform intended for the visualization and forecasting of price dynamics in the cryptocurrency market. The research aim is to develop the information system architecture using object-oriented modeling methodology.*

In the course of the study, a detailed analysis of the subject area was conducted, and existing forecasting methods based on artificial intelligence and technical analysis were reviewed. Using the StarUML CASE tool and the UML language, a comprehensive system model was developed: functional requirements were defined (use case diagram), the static structure was formed (class diagram), and the dynamic behavior was described (sequence and state diagrams). Particular attention was paid to the design of the deployment architecture and the database structure.

The practical significance of the results lies in creating a theoretical and model-based foundation for the subsequent software implementation of analytical tools. The developed model can serve as a basis for creating real-world web services targeting crypto traders and financial analysts, contributing to more effective decision-making in volatile digital markets.

Keywords: *Design, Information System, UML, Web Platform, Cryptocurrencies, Forecasting, Artificial Intelligence, Technical Analysis.*

REFERENCE

1. Booch, G., Rumbaugh, J., & Jacobson, I. (2020). UML 2.0: Object-Oriented Analysis and Design. 2nd ed. Kyiv: Dialektyka. 736 p. [in Ukrainian] [<https://www.pearson.com/store/p/uml-2-user-guide/P100001277745>]
2. Fowler, M. (2019). UML Distilled: A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language. 3rd ed. Lviv: Svit. 192 p. [in Ukrainian] [<https://www.informit.com/store/uml-distilled-a-brief-guide-to-the-standard-object-modeling-language-3rd-edition-9780321193681>]
3. Larman, C. (2018). Applying UML and Patterns: An Introduction to Object-Oriented Analysis and Design and Iterative Development. Kyiv: Williams. 736 p. [in Ukrainian] [<https://www.informit.com/store/applying-uml-and-patterns-an-introduction-to-object-oriented-analysis-and-design-and-iterative-development-9780131489066>]
4. StarUML. StarUML Documentation. Available at: [URL <https://staruml.io/docs/>] (Accessed: 10 November 2023).
5. Object Management Group (OMG). (2017). Unified Modeling Language (UML) Specification Version 2.5.1. Available at: [URL <https://www.omg.org/spec/UML/>] (Accessed: 11 November 2023). [in Ukrainian].

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПОКАЗНИК ЯКОСТІ РОЗРОБКИ ТА МОДИФІКАЦІЇ СКЛАДНИХ СИСТЕМ - ЗВ'ЯЗНІСТЬ

Карповський Д.О.¹ [ORCID], Шинкаренко В.І.² [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

²Український державний університет науки і технологій,

д.т.н., професор, Україна

Анотація. У роботі розглядається зв'язність як один із ключових технологічних показників якості розробки та модифікації складних систем. Проаналізовано її роль у структурній організації програмного забезпечення та вплив на зрозумілість, підтримуваність і гнучкість системи. Показано взаємозв'язок зв'язності зі зчепленням та об'ємом, а також обґрунтовано доцільність досягнення високої зв'язності при низькому рівні залежностей між компонентами. Окрему увагу приділено прояву зв'язності в онтологічному моделюванні та організаційних системах, зокрема на виробництві та в університетському середовищі. Розглянуто, що високий рівень зв'язності забезпечує цілісність системи, спрощує її модифікацію та підвищує ефективність функціонування.

Ключові слова: програмне забезпечення, інформаційна система, програмна архітектура, зв'язність, онтології, складні системи, виробничі системи, організаційні структури.

Сучасні складні системи – незалежно від того, чи йдеться про програмне забезпечення, виробничі процеси або організаційні структури – мають спільну рису: вони складаються з великої кількості взаємопов'язаних елементів. Ефективність їх функціонування значною мірою залежить не лише від окремих компонентів, а й від того, як саме ці компоненти організовані [1].

У програмуванні зв'язність є одним із ключових принципів якісної побудови програмних систем. Вона визначає, наскільки логічно пов'язані між собою елементи всередині модуля, класу або функції. Висока зв'язність означає, що всі складові компонента спрямовані на виконання однієї чітко визначеної задачі. Наприклад, клас, який відповідає виключно за обробку платежів, є більш зв'язним, ніж клас, що одночасно займається обробкою платежів, логуванням та управлінням користувачами [2].

Такий підхід безпосередньо впливає на якість коду. Високозв'язні модулі легше читати, тестувати та підтримувати, оскільки їх поведінка є передбачуваною і зрозумілою. Крім того, зміни в одному компоненті рідше впливають на інші частини системи, що зменшує ризик виникнення помилок. Це особливо важливо в умовах постійної еволюції програмного забезпечення.

Низька зв'язність, навпаки, призводить до появи так званих «божественних об'єктів» (God objects), які виконують надто багато функцій. Такі компоненти важко модифікувати, оскільки будь-яка зміна може мати непередбачувані наслідки для всієї системи. У результаті зростає складність супроводу та знижується гнучкість програмного продукту.

Поняття зв'язності виступає універсальним показником якості системи. Зв'язність разом зі зчепленням та об'ємом визначає ефективність архітектури та рівень організації складних структур.

Зв'язність є важливою не лише в програмуванні. Її прояв можна спостерігати і в реальних організаційних системах, таких як виробництво або навчальні заклади.

Розглянемо виробничу систему. Сучасне підприємство складається з багатьох підрозділів: виробничих ліній, складів, логістики, контролю якості та управління. Кожен із цих підрозділів виконує певну функцію. Якщо всередині підрозділу всі процеси чітко спрямовані на досягнення єдиної мети (наприклад, виготовлення конкретного продукту), можна говорити про високу зв'язність [3].

Наприклад, виробнича лінія, яка відповідає лише за складання одного типу виробу, є більш зв'язною, ніж підрозділ, який виконує одночасно різноманітні задачі. У першому випадку процеси узгоджені, зрозумілі та легко оптимізуються. У другому – виникає плутанина, зростає кількість помилок і ускладнюється управління [4].

Зв'язність безпосередньо впливає на ефективність функціонування виробництва. Високозв'язні підсистеми легше автоматизувати, контролювати та масштабувати. У разі необхідності змін (наприклад, модернізації

обладнання) вони можуть бути реалізовані локально, без суттєвого впливу на інші частини системи.

Аналогічна ситуація спостерігається і в університетській системі. Університет складається з факультетів, кафедр, груп студентів, адміністративних підрозділів. Кожен із цих елементів має свою функціональну роль [5].

Якщо кафедра спеціалізується на одній галузі знань і всі її дисципліни логічно пов'язані між собою, це приклад високої зв'язності. Така структура забезпечує цілісність навчального процесу, полегшує координацію роботи викладачів і покращує якість освіти.

У випадку низької зв'язності, коли в межах однієї кафедри поєднуються несумісні або слабко пов'язані дисципліни, виникають труднощі в організації навчального процесу. Студентам складніше формувати системне розуміння предметної області, а викладачам – узгоджувати навчальні програми [6].

Функціонування системи в обох випадках (виробництво та університет) значною мірою залежить від рівня зв'язності її підсистем. Висока зв'язність забезпечує:

- чіткий розподіл функцій,
- зрозумілу структуру,
- спрощення управління,
- підвищення ефективності взаємодії [7].

У процесі проєктування складних систем важливу роль відіграє використання UML, що дозволяє формалізувати структуру та поведінку системи через взаємопов'язані діаграми. UML-проєкт охоплює різні типи діаграм, які відображають як статичні, так і динамічні аспекти системи. Через ці діаграми проявляються зв'язність і зчеплення, що дає змогу оцінювати якість архітектурних рішень ще на етапі проєктування [8].

Окремо варто розглянути зв'язність в онтологіях. У цьому випадку вона визначає, наскільки логічно пов'язані між собою поняття та відношення. Високозв'язна онтологія має чітку структуру, де кожне поняття займає своє місце і пов'язане з іншими через осмислені зв'язки [9].

Це дозволяє ефективно використовувати такі моделі в системах обробки знань, пошуку інформації та штучного інтелекту. Натомість низька зв'язність призводить до фрагментації знань і ускладнює їх автоматичне використання.

Таким чином, незалежно від природи системи – програмної, виробничої чи освітньої – зв'язність виступає ключовим фактором її ефективного функціонування. Вона визначає, наскільки добре організовані внутрішні процеси та наскільки система здатна адаптуватися до змін.

Висновок. Зв'язність є універсальним технологічним показником якості складних систем. Вона характеризує внутрішню узгодженість компонентів і визначає ефективність їх взаємодії. У програмних системах зв'язність впливає на підтримуваність і гнучкість коду. У виробничих системах – на ефективність процесів і можливість їх оптимізації. В освітніх структурах – на цілісність навчального процесу. В онтологіях – на логічну узгодженість знань. Забезпечення високої зв'язності дозволяє створювати системи, які є зрозумілими, керованими та здатними до подальшого розвитку, що робить її одним із ключових критеріїв якості в сучасній інженерії складних систем.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Ameneh Naghdipour, Seyed Mohammad Hossein Hasheminejad, A. Software design pattern selection approaches: a systematic literature review. Journal of Software Engineering Studies – 2022., P. 1–20. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/spe.3176>
2. Eramo, R., Tucci, M., Di Pompeo, D., Cortellessa, V., Di Marco, A., Taibi, D. Architectural support for software performance in continuous software engineering: a systematic mapping study. arXiv – 2023., P. 1–28. URL: <https://arxiv.org/abs/2304.02489>
3. Heiland, L., Hauser, M., Bogner, J. Design patterns for AI-based systems: a multivocal literature review and pattern repository. arXiv – 2023., P. 1–35., URL: <https://arxiv.org/abs/2303.13173>
4. Belle, A. B., El Boussaidi, G., Lethbridge, T. C., Kpodjedo, S., Mili, H., Paz, A. Systematically reviewing the layered architectural pattern principles and their use to reconstruct software architectures. arXiv – 2021., P. 1–25, URL: <https://arxiv.org/abs/2112.01644>
5. M. Ravindu An overview of structural design patterns in object-oriented software engineering2024.,P.115.,URL:https://www.researchgate.net/publication/377969013_An_Overview_of_Structural_Design_Patterns_in_Object-Oriented_Software_Engineering
6. M.Paixao. An Empirical Study of Cohesion and Coupling: Balancing Optimisation and Disruption, IEEE Transactions on Evolutionary Computation PP(99):1-1, URL:

https://www.researchgate.net/publication/316021372_An_Empirical_Study_of_Cohesion_and_Coupling_Balancing_Optimisation_and_Disruption

7. Palomba, F., Bavota, G., Di Penta, M., Oliveto, R., De Lucia, A. Detecting bad smells in source code using change history information. IEEE International Conference on Software Maintenance – 2013., P. 268–277, URL: <https://fpalomba.github.io/pdf/Conferencs/C2.pdf>

8. Shamaev E.V, Shinkarenko V.I. Quality characteristics of uml-project, The 4th International Workshop on Computer Science and Information Technologies. Book of Abstracts/ 18-20 September 2002, University of Patras, Greece, P.26

9. Guizzardi, G., Wagner, G., Almeida, J., Guizzardi, R. Towards ontological foundations for conceptual modeling: the Unified Foundational Ontology (UFO) story. Applied Ontology – 2015., P.259–271., URL: https://nemo.inf.ufes.br/wp-content/papercite-data/pdf/towards_ontological_foundations_for_conceptual_modeling_the_unified_foundational_ontology_ufo_story_2015.pdf

COHESION AS A TECHNOLOGICAL QUALITY INDICATOR IN THE DEVELOPMENT AND MODIFICATION OF COMPLEX SYSTEMS

Dmytro Karpovskyi, Viktor Shynkarenko

Abstract. *This paper examines cohesion as one of the key technological quality indicators in the development and modification of complex systems. Its role in the structural organization of software and its impact on system understandability, maintainability, and flexibility are analyzed. The relationship between cohesion, coupling, and system size is demonstrated, and the importance of achieving high cohesion with low inter-component dependencies is substantiated. Particular attention is given to the manifestation of cohesion in ontological modeling and organizational systems, including manufacturing and university environments. It is shown that a high level of cohesion ensures system integrity, simplifies its modification, and enhances operational efficiency.*

Keywords: *software, information system, software architecture, connectivity, ontologies, complex systems, production systems, organisational structures.*

ОЦІНКА ВПЛИВУ ПОПЕРЕДНЬОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ НА ЯКІСТЬ ВИБІРКИ В RAG-СИСТЕМАХ З ВЕКТОРНИМ ПОШУКОМ

Клименко І.В.¹ [ORCID], Лебідь Є.А.² [ORCID]

¹УДУНТ, к.е.н., доцент, Україна

²УДУНТ, аспірант, Україна

Анотація. В роботі проаналізовано сучасні підходи до оцінювання RAG-систем, що поєднують векторний пошук і генерацію відповідей великими мовними моделями (LLM). Розглянуто класичні метрики якості вибірки та LLM-орієнтовані метрики якості генерації, у тому числі в контексті фреймворків RAGAS, ARES, VERA та MIRAGE. Проведено машинний експеримент на базі Google Cloud Platform (GCP) Firestore колекції з векторним пошуком по датасету резюме IT-фахівців, де порівнюються стандартний векторний пошук і пошук з попередньою фільтрацією за метаданими. Встановлено, що попередня фільтрація підвищує частку релевантних документів у контексті, зменшує затримку вибірки та дозволяє збільшувати розмір контексту без пропорційного погіршення якості генерації. Результати експерименту підтверджують залежність якості відповідей RAG-систем від чистоти й релевантності контексту.

Ключові слова: комп'ютерні системи, інформаційні технології, інтелектуальний аналіз даних, штучний інтелект, RAG, машинний експеримент, генеративні мовні моделі

Системи Retrieval-Augmented Generation (RAG) поєднують пошук за зовнішніми джерелами з генерацією тексту великими мовними моделями (LLM), що дозволяє підвищувати точність відповіді та опиратися на релевантні для домену дані [1]. Такий підхід використовується в різноманітних комп'ютерних системах – корпоративних асистентах знань, службах підтримки клієнтів, пошуку по технічній документації та інших доменах, де відповідь має ґрунтуватися на заданому корпусі документів. Саме тому комплексна оцінка RAG-систем вимагає застосування окремих метрик для етапів вибірки і формування контексту (retrieval) та генерації відповіді (generation) [2]. У сучасних роботах щодо RAG застосовуються як reference-based (з наявною

множиною еталонних відповідей), так і reference-free (без еталонних відповідей) підходи до оцінювання якості відповіді та контексту.

Мета дослідження – проаналізувати сильні та слабкі сторони різних підходів до оцінки RAG-систем на базі GCP Firestore.

Метрики якості вибірки застосовуються для оцінки того, наскільки добре RAG підбирає контекст для подальшої передачі в LLM. Класичні метрики дають чітку кількісну оцінку якості вибірки, але вимагають наявності еталонної розмітки (множини релевантних документів) для кожного тестового запиту користувача. Така розмітка, як правило, створюється вручну експертами або за допомогою дорогого процесу анотації, що суттєво обмежує можливість підтримки бенчмарків [4]. Фреймворки без застосування еталонних відповідей (наприклад, RAGAS) оцінюють релевантність контексту та коректність відповіді застосовуючи LLM для виділення тверджень (claims) і їх підтвердження контекстом або за допомогою генерації гіпотетичних питань [2]. Перевагою такого підходу є можливість швидко оцінювати інформаційні системи на базі RAG-архітектури без попередньої еталонної розмітки даних.

До класичних метрик якості вибірки відносять:

- Precision@K – визначає частку релевантних документів (або їх фрагментів) серед K результатів пошуку.
- Recall@K – показує, яка частка всіх релевантних документів потрапила до топ-K результатів. Якщо релевантних документів багато, то низьке значення метрики означає втрату важливої інформації для генерації відповіді [4].
- MRR (Mean Reciprocal Rank) – оцінює позицію першого релевантного документу в ранжованому списку. Метрика є актуальною для сценаріїв, де необхідно отримати один релевантний документ на початку списку [3].
- Retrieval Latency (затримка вибірки) – показує час від формулювання запиту користувачем до отримання контексту без урахування часу генерації відповіді.

Варто відмітити, що сучасні фреймворки оцінки RAG (RAGAS, ARES, VERA, MIRAGE та інші) доповнюють класичні метрики якості вибірки додатковими метриками та пропонують різні підходи до їх оцінки.

Метрики якості генерації оцінюють згенеровану LLM відповідь на предмет коректності контексту, релевантності запиту та повноти. Найчастіше використовуються наступні дві метрики:

- Faithfulness – демонструє, наскільки кожне твердження у відповіді узгоджується з наданим LLM контекстом. Значення метрики знаходиться в діапазоні [0, 1], і чим ближче до 1, тим краща узгодженість з контекстом.
- Answer Relevancy – оцінює, наскільки отриманий результат відповідає введеному запиту. Значення метрики коливається від 0 до 1, де вищі показники означають кращу релевантність.

Окремо варто зазначити, що класичні метрики вибірки і генерації застосовуються здебільшого для невеликих контекстів і коротких відповідей. Для RAG-систем із довгими відповідями (long-form RAG), зокрема у завданнях підсумовування великих документів з посиланнями на джерела, потрібно вводити додаткові показники.

Експериментальна частина даного дослідження побудована у GCP Firestore, що підтримує векторний пошук. Тестовий набір даних – резюме кандидатів різноманітних спеціалізацій з IT-сфери. Для екстракції і фрагментації тексту, генерації векторних представлень та виокремлення метаданих кожен з документів було автоматично опрацьовано за допомогою моделей сервісу Google Vertex AI. Оброблені дані (текст, векторне представлення, метадані) були збережені в колекції Firestore, що надає можливість застосування стандартного векторного пошуку та пошуку з попередньою фільтрацією за метаданими у межах єдиної колекції. Таблиця 1 демонструє середні значення метрик якості (для різних значень K) та затримки вибірки для обох типів пошуку.

Таблиця 1

Метрики вибірки по типам пошуку

Метрика	Стандартний пошук	Пошук з фільтрацією
Precision@3	0,68	0,89
Recall@3	0,60	0,62
Precision@5	0,56	0,76
Recall@5	0,70	0,69
Precision@10	0,40	0,68
Recall@10	0,85	0,88
MRR	0,94	0,92
Затримка вибірки (мс)	48,91±0,36	19,21±0,19

Як бачимо, у випадку попередньої фільтрації значення метрик суттєво кращі, ніж у випадку стандартного векторного пошуку. Високе значення MRR також свідчить про те, що перший релевантний документ потрапляє на перші позиції видачі. Нижче на рис. 1. зображені метрики якості вибірки (Precision@K та Recall@K) для стандартного пошуку та пошуку з попередньою фільтрацією при різному розмірі контексту (K = 3, 5, 10).

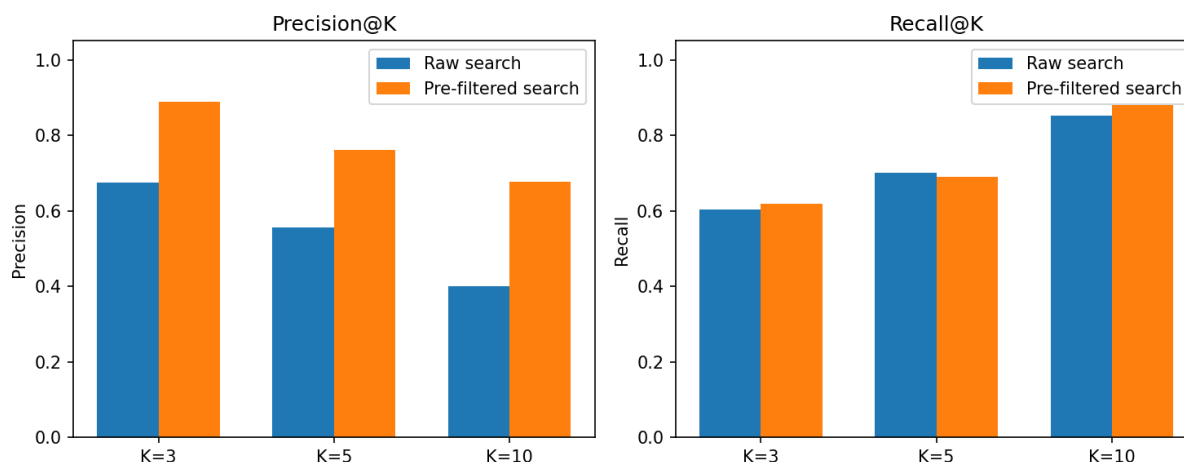


Рисунок 1. Метрики якості вибірки для обох типів пошуку

Пошук з попередньою фільтрацією за метаданими має вищі значення метрики Precision за рахунок зменшення шуму в контексті, а значення показника Recall може змінюватись залежно від того, чи не відсікають фільтри частину релевантних документів. Рис. 2 демонструє середні значення затримки вибірки (з довірчим інтервалом) для обох типів пошуку.

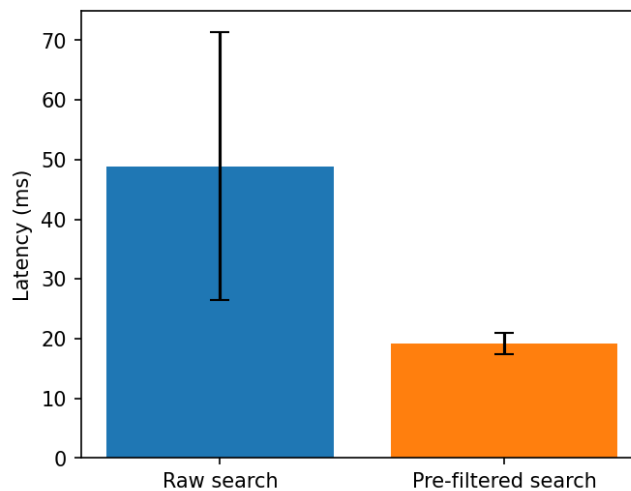


Рисунок 2. Середня затримка вибірки для обох типів пошуку

З графіку видно, що пошук з попередньою фільтрацією значно швидший за стандартний пошук завдяки суттєвому зменшенню об'єму даних для виконання векторного пошуку.

Для оцінки якості генерації проведено компактний експеримент, в якому кожен з тестових запитів проходив через RAG-пайплайн, після чого окрема модель-суддя (LLM-as-judge) оцінила метрики Faithfulness та Answer Relevancy за схемою, близькою до описаної в RAGAS [2]. Експеримент проведено для обох типів векторного пошуку при різному розмірі контексту ($K=3$ і $K=5$). В таблиці 2 наведено середні якість генерації для обох типів пошуку.

Таблиця 2

Метрики генерації по типам пошуку

Метрика	Стандартний пошук	Пошук з фільтрацією
Faithfulness ($K=3$)	1,00	1,00
Answer Relevancy ($K=3$)	0,94	0,78
Faithfulness ($K=5$)	0,72	0,94
Answer Relevancy ($K=5$)	0,65	0,80

У випадку стандартного векторного пошуку середнє значення метрики Faithfulness знижується при збільшенні контексту ($K=5$) – в контексті з'являється більше даних, тому відповіді можуть містити більше тверджень, частину з яких LLM-суддя не вважає повністю підтвердженою. Для пошуку з попередньою фільтрацією цей показник вищий, ніж у стандартного пошуку за рахунок більш релевантного контексту після фільтрації метаданих. Середні значення показника Answer Relevancy для стандартного пошуку при збільшенні

контексту також знижуються. Зазначимо, що отримане значення Answer Relevancy для пошуку з попередньою фільтрацією вище – це підтверджує гіпотезу про те, що попередня фільтрація зменшує шум у контексті.

Встановлено, що фреймворки на кшталт RAGAS, ARES, VERA, MIRAGE доповнюють класичні метрики якості вибірки та генерації і пропонують різні підходи до їх вимірювання. В той же час, через відсутність єдиного стандарту оцінки RAG [4], експериментальна верифікація окремих рекомендацій є особливо актуальною. На основі проведеного експерименту було з'ясовано наступне:

1. Векторний пошук з попередньою фільтрацією підвищує значення метрики Precision при практично незмінних Recall і MRR порівняно зі стандартним векторним пошуком.
2. Контекст у випадку пошуку з попередньою фільтрацією покращує значення показників Faithfulness та Answer Relevancy, що узгоджується з постулатом про залежність якості генерації від чистоти контексту.
3. При пошуку з попередньою фільтрацією затримка вибірки знижується завдяки зменшенню обсягу даних для виконання операції векторного пошуку на колекції Firestore.
4. Недостатній обсяг даних, переданих судді для валідації, може призводити до помилково низьких оцінок Faithfulness. Дана технічна проблема в проведеному експерименті вирішувалась збільшенням контексту, що передається LLM-судді (з 1000 до 10000 символів).
5. Збільшення контексту покращує Recall, але при стандартному векторному пошуку може погіршувати Faithfulness та Answer Relevancy. Пошук з попередньою фільтрацією дозволяє використовувати більший об'єм контексту без пропорційного погіршення метрик генерації.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Lewis P., Perez E., Piktus A., Petroni F., Karpukhin V., Goyal N., Küttler H., Lewis M., Yih W., Rocktäschel T., Riedel S., Kiela D. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. Advances in Neural Information Processing Systems. – 2020. Vol. 33. P. 9459-9474. DOI: 10.48550/arXiv.2005.11401
2. Es S., James J., Espinosa-Anke L., Steven S. RAGAS: Automated Evaluation of Retrieval Augmented Generation. Computer Science. Computation and Language. – 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2309.15217
3. Saad-Falcon J., Khattab O., Potts C., Zaharia M. ARES: An Automated Evaluation Framework for Retrieval-Augmented Generation Systems. Proceedings of the 2024 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics (NAACL). 2024. P. 3464-3483. DOI: 10.48550/arXiv.2311.09476

4. Yu Z., Gan Z., Zhang Y., Tong X., Liu H., Liu Q. Evaluation of Retrieval-Augmented Generation: A Survey. Computer Science. Computation and Language. – 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2405.07437

THE ASSESSMENT OF IMPACT OF PRE-FILTERING ON RETRIEVAL QUALITY IN RAG SYSTEMS WITH VECTOR SEARCH

I.V. Klymenko, Y.A. Lebid

Abstract. *The paper analyzes modern approaches to evaluating Retrieval-Augmented Generation (RAG) systems that integrate vector search with answer generation by large language models (LLMs). It examines classical retrieval quality metrics alongside LLM-oriented generation quality metrics, including their application within frameworks such as RAGAS, ARES, VERA, and MIRAGE. A computational experiment was conducted using a Google Cloud Platform (GCP) Firestore collection with vector search over a dataset of IT professionals' CVs, comparing standard vector search against search enhanced by pre-filtering on metadata. The results demonstrate that pre-filtering increases the proportion of relevant documents in the context, reduces retrieval latency, and enables larger context sizes without proportional degradation in generation quality. The experimental findings confirm the dependence of RAG system answer quality on the purity and relevance of the retrieved context.*

Keywords: *computer systems, information technologies, data mining, artificial intelligence, RAG, machine-based benchmarking, generative language models.*

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ РАННЬОЇ
ІДЕНТИФІКАЦІЇ КОНФІГУРАЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ
ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ**

Кожанов А.Є.¹ [ORCID], Євланов М.В.² [ORCID], Мороз Д.М.³ [ORCID]

¹Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант, Україна

²Харківський національний університет радіоелектроніки, д.т.н., проф., Україна

³Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»,
докт. філ., Україна

Анотація. Розглянуто особливості вирішення задачі ранньої ідентифікації конфігураційних елементів інформаційної системи. Встановлено значну залежність результатів вирішення цієї задачі від способу та якості представлень вимог, що висунуті до інформаційної системи. Розглянуто особливості використання методів та алгоритмів штучного інтелекту в процесів вирішення цієї задачі. Запропоновано вдосконалення методу вирішення задачі ранньої ідентифікації конфігураційних елементів інформаційної системи. Суть вдосконалення полягає у використанні алгоритму кластеризації DBSCAN для виявлення архітектурних елементів як кластерів окремих функцій інформаційної системи. Використання вдосконаленого методу дозволяє автоматизувати процедуру синтезу опису архітектури інформаційної системи. Застосування цієї автоматизованої процедури сприяє підвищенню якості розробки інформаційної системи за рахунок виділення для проєктування множини архітектурних сутностей цієї системи, яка є значно меншою, ніж множина елементарних функцій інформаційної системи.

Ключові слова: інформаційна система, конфігураційний елемент, задача ранньої ідентифікації, функція, архітектурна сутність, DBSCAN.

Процес управління конфігурацією є одним з найважливіших процесів життєвого циклу інформаційних систем (ІС) управління підприємствами та організаціями. Призначенням цього процесу є систематичний контроль за змінами конфігурації, підтримка цілісності та відстеження конфігурації протягом усього життєвого циклу продукту [1]. Незалежно від підходів до структуризації та опису окремих робіт і задач цього процесу, у ньому виділяється задача ідентифікації конфігурації, пов'язана із визначенням

системних елементів конфігурації («Configuration item», CI) [1, 2]. Рішення цієї задачі поступово встановлюють та підтримують поточну основу для контролю та обліку стану IC та її CI протягом усіх їхніх життєвих циклів [2].

Як показано у [3], існуючі основи систем управління конфігурацією IT-продуктів є надто узагальненими і не надають формальних описів вирішення задачі ідентифікації CI IC. Одним із підходів до подолання цього недоліку є пропозиція відмовитися від єдиного опису CI протягом усього життєвого циклу IC. Ця відмова дає змогу розглядати задачу ідентифікації конфігурації IC як сукупність таких задач: задача ранньої ідентифікації CI; задача проєктної ідентифікації CI; задача ідентифікації CI під час реалізації [4].

Головним сучасним підходом до вирішення задачі ранньої ідентифікації CI для IC є синтез описів архітектурних сутностей та загального опису архітектури з описів окремих системних елементів або вимог до цих елементів. Сучасні дослідження цього підходу з самого початку базуються на використанні методів та засобів штучного інтелекту. Це викликано виникненням проблем раннього поділу системи на окремі елементи, переважно, в результаті неправильного тлумачення вимог або упередженості особистого досвіду [5]. Часто для вирішення задач ідентифікації CI в межах цього підходу використовуються методи та алгоритми кластеризації. Але їх використання вимагає формалізації вимог, які висуваються до IC. У [6] було проведено систематичний огляд сучасних наукових досліджень інструментів, методів, прийомів та процесів вилучення вимог із середовищ, що базуються на методології Model-Based System Engineering, та генерації моделей на основі вимог, сформульованих природною мовою. Результати цього огляду встановили, зокрема, що генерація моделей на основі описів, зроблених природною мовою, залишається домінуючим способом формального опису вимоги до IC [6].

Метою дослідження є розробка нового або вдосконалення існуючого методу вирішення задачі ранньої ідентифікації CI IC. Це дозволить автоматизувати процедуру синтезу опису архітектури інформаційної системи. Застосування цієї автоматизованої процедури сприяє підвищенню якості розробки інформаційної системи за рахунок виділення для проєктування

множини архітектурних сутностей цієї системи, яка є значно меншою, ніж множина елементарних функцій інформаційної системи.

В процесі дослідження було вирішено розглядати опис архітектури ІС та сутностей цієї архітектури як результат задачі синтезу варіанта опису раціональної архітектури ІС. Цю задачу у [7] запропоновано описати теоретико-ігровою моделлю вигляду

$$\Gamma_{IS} = \langle \{Pr, U\}, \{X^{\{Pr, U\}}\}, \{f^{\{Pr, U\}}\} \rangle, \quad (1)$$

де Γ_{IS} – гра Постачальника та Споживача ІТ-послуг (функцій ІС); $\{Pr, U\}$ – множина гравців, які беруть участь у грі Γ_{IS} (Постачальник та Споживач відповідно); $\{X^{\{Pr, U\}}\}$ – множина стратегій гри Γ_{IS} , яка формується на основі множини варіантів описів архітектури створюваної ІС IT_{act} ; $\{f^{\{Pr, U\}}\}$ – множина функцій виграшу гри Γ_{IS} [7].

Для знаходження результату гри (1) у [7] було запропоновано використовувати метод пошуку рівноваг Неша для біматричної гри в чистих стратегіях. Результатом застосування цього методу є опис архітектури створюваної ІС як множини окремих функцій цієї ІС. Але такий детальний опис архітектури значно ускладнює подальший розподіл опису архітектури ІС між окремими командами Постачальника. Тому необхідно вдосконалити цей метод з метою зменшення кількості СІ в описі архітектури ІС. Вдосконалений метод передбачає виконання таких етапів.

Етап 0 (підготовчий). Сформувані множини формальних описів добре сформульованих вимог до ІС, які відображають точки зору Споживача й Постачальника ІТ-послуг [3].

Етап 1. Сформувані матриці виграшів Споживача й Постачальника ІТ-послуг.

Етап 2. Відзначити максимальні елементи в кожному стовпці матриці виграшів Споживача ІТ-послуг. Якщо в деякому стовпці даної матриці кілька максимальних елементів, то необхідно відзначити всі такі елементи.

Етап 3. Відзначити максимальні елементи в кожному рядку матриці виграшів Постачальника ІТ-послуг. Якщо в деякому рядку даної матриці кілька максимальних елементів, то необхідно відзначити всі такі елементи.

Етап 4. Провести пошук перетинання результатів Етапу 2 і Етапу 3.

Етап 5. Якщо результат виконання Етапу 4 не є порожньою множиною, зафіксувати відповідні варіанти описів архітектури створюваної ІС як описи раціональної архітектури даної ІС. У іншому випадку визнати, що опису раціональної архітектури ІС на чистих стратегіях не існує, та завершити застосування методу.

Етап 6. Виділити на зафіксованих описах окремих варіантів описів архітектури створюваної ІС описи архітектурних сутностей ІС як результат вирішення задачі кластеризації описів окремих функцій даної ІС з використанням алгоритму щільнісної кластеризації DBSCAN [4].

Етап 7. Виділити з результатів виконання Етапу 6 спрощені варіанти опису архітектури створюваної ІС за критерієм мінімальної наявності в описах архітектури CI, визначених як шум, і надати ці описи Споживачу та Постачальнику ІТ-послуг. Завершити застосування методу.

Використання для створення описів архітектурних сутностей ІС алгоритму щільнісної кластеризації DBSCAN обумовлене результатами порівняльного аналізу результатів вирішення задачі ранньої ідентифікації CI, отриманих з використанням щільнісного алгоритму DBSCAN, методів ієрархічної кластеризації DIANA, AGNES та Chameleon, а також алгоритму k-means. Для порівняння запропоновано критерії «Громіздкість рішення» та «Виявлення відокремлених CI». Крім цього, було проведено аналіз збігу окремих кластерів, розроблених з використанням зазначених методів та алгоритмів. За результатами порівняльного аналізу, алгоритм DBSCAN визнано кращим з тих методів ієрархічної кластеризації, які брали участь у аналізі. Використання цього алгоритму дає змогу отримати описи архітектурних сутностей ІС як кластерів, що складаються з описів окремих функцій ІС, схожих за описами їхніх структур даних [4].

Висновки

В результаті дослідження було вдосконалено метод вирішення задачі ранньої ідентифікації CI ІС. Суть вдосконалення полягає у використанні алгоритму кластеризації DBSCAN для виявлення архітектурних елементів як

кластерів окремих функцій інформаційної системи. Використання вдосконаленого методу дозволяє автоматизувати процедуру синтезу опису архітектури інформаційної системи. Застосування цієї автоматизованої процедури сприяє підвищенню якості розробки інформаційної системи за рахунок виділення для проєктування множини архітектурних сутностей цієї системи, яка є значно меншою, ніж множина елементарних функцій інформаційної системи.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Guide to the Software Engineering Body of Knowledge. Version 3.0 / eds. Bourque P., Fairley R.E. Washington, DC, United States: IEEE Computer Society, 2014. 335 p.
2. Quigley J.M., Robertson K.L. Configuration Management, Second Edition: Theory and Application for Engineers, Managers, and Practitioners. New York: Auerbach Publications, 2019. 453 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429318337>
3. Farayola O.A., Hassan A.O., Adaramodu O.R., Fakeyede O.G., Oladeinde M. Configuration management in the modern era: best practices, innovations, and challenges. Computer Science & IT Research Journal. 2023. Vol. 4, No 2. P. 140-157. DOI: <https://doi.org/10.51594/csitrj.v4i2.613>
4. Kozhanov A., Ievlanov M. Definition a clusterization method to solve the task of early identification of IT product configuration elements. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2026. Vol. 1. №. 2 (139). P. 77–90. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.352878>
5. Cadavid H., Andrikopoulos V., Avgeriou P., Chris Broekema P. System and software architecting harmonization practices in ultra-large-scale systems of systems: A confirmatory case study. Information and Software Technology. 2022. Vol. 150. № 106984. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.106984>
6. Santos J.L., Martins L.E.G., Molléri J.S. Requirements extraction from model-based systems engineering: A systematic literature review. Journal of Systems and Software. 2025. Vol. 226. № 112407. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2025.112407>
7. Evlanov M. Development of the model and method of selecting the description of rational architecture of information system. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 1, No. 2(79). P. 4–12. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.60583>

IMPROVEMENT OF THE METHOD FOR SOLVING THE TASK OF EARLY IDENTIFICATION OF INFORMATION SYSTEM CONFIGURATION ITEMS

Adrian Kozhanov, Maksym Ievlanov, Dmytro Moroz

Abstract. *The features of solving the task of early identification of an information system configuration items are considered. A significant dependence of the results of solving this task on the requirements method and quality of the representations put forward to the*

information system is established. The features of using artificial intelligence methods and algorithms in the processes of solving this task are considered. An improvement of the method for solving the task of early identification of an information system configuration items is proposed. The essence of the improvement is to use the DBSCAN clustering algorithm to identify architectural elements as clusters of individual functions of the information system. The use of the improved method allows you to automate the procedure for synthesizing the description of the information system architecture. The use of this automated procedure contributes to improving the quality of information system development by allocating for design a set of architectural entities of this system, which is much smaller than the set of elementary functions of the information system.

Keywords: *Information System, Configuration Item, Early Identification Task, Function, Architectural Entity, DBSCAN.*

РОЗРОБЛЕННЯ ТА АНАЛІЗ КОНЦЕПЦІЇ БІОНІЧНОГО ПРОТЕЗУ КИСТІ

Корендій В.М.¹ [ORCID], Дурняк М.Р.² [ORCID],

Кривуляк І.І.³ [ORCID], Маркович Б.М.⁴ [ORCID]

¹Національний університет «Львівська політехніка», к.т.н., доцент, Україна

²Національний університет «Львівська політехніка», аспірант, Україна

³Національний університет «Львівська політехніка», аспірант, Україна

⁴Національний університет «Львівська політехніка», д.ф.-м.н., професор, Україна

Анотація. У роботі розглянуто питання розроблення та дослідження концептуальної моделі біонічного протезу кисті, який класифікується як роботизований антропоморфний маніпулятор з п'ятьма незалежними ступенями вільності. Особлива увага приділяється механічній архітектурі пристрою, зокрема застосуванню принципу внутрішньої актуації з інтеграцією сервоприводів у несучу основу долоні. Описано інноваційну систему передачі руху на основі жорстких важільних механізмів і тяг, що має суттєві переваги над традиційними тросовими приводами: забезпечення активного згинання і розгинання фаланг, усунення механічного гістерезису та підвищення точності позиціонування. Здійснено детальний структурно-кінематичний аналіз розробленого модуля пальця як плоского багатоланкового механізму. Із застосуванням структурної формули Чебишева математично підтверджено наявність одного ступеня вільності для семиланкової конструкції пальця. Проведено розкладання кінематичного ланцюга на групи Ассура, що дозволило класифікувати пристрій як механізм другого класу. Розроблена кінематична схема забезпечує жорстку синхронізацію руху фаланг та детерміноване відтворення біоміметичної траєкторії схоплювання.

Ключові слова: біонічний протез, кінематичний аналіз, важільний механізм, ступені вільності, антропоморфний маніпулятор, внутрішня актуація, групи Ассура.

Вступ. Втрата верхньої кінцівки є однією з найбільш складних проблем, яка суттєво знижує якість життя людини, обмежуючи її можливості в самообслуговуванні та професійній діяльності. Сучасний етап розвитку біомедичної інженерії та робототехніки характеризується інтенсивним вдосконаленням технічних засобів реабілітації, зокрема створенням

високофункціональних біонічних протезів верхніх кінцівок [1]. Пріоритетним завданням при їх проєктуванні є максимальне наближення кінематики та моторики штучної кисті до біомеханіки людської руки.

Аналіз існуючих комерційних та експериментальних зразків показує, що для приведення в рух фаланг пальців найчастіше використовуються тросові системи передачі зусилля. Незважаючи на їхню відносну компактність та простоту, такі системи мають ряд суттєвих інженерних недоліків. Зокрема, вони схильні до розтягування тросів з часом, мають значний механічний гістерезис і здатні передавати зусилля лише на розтяг [2]. Це вимагає застосування додаткових еластичних елементів (зворотних пружин) для розгинання пальців, що знижує точність позиціонування та збільшує витрати енергії.

Альтернативним підходом, що дозволяє вирішити ці проблеми, є використання жорстких важільних механізмів передачі руху. Вони гарантують надійну фіксацію об'єктів та активне керування як фазою згинання, так і фазою розгинання. Метою даної роботи є розроблення концепції доступного біонічного протезу кисті антропоморфного типу з п'ятьма незалежними ступенями вільності на основі жорстких кінематичних зв'язків та проведення його структурно-кінематичного аналізу для підтвердження працездатності механізму [3].

Основний матеріал. Об'єктом розробки та дослідження у даній роботі є модель роботизованої кисті (рис. 1), що класифікується як біонічний маніпулятор антропоморфного типу з п'ятьма ступенями вільності. Концепція пристрою базується на відтворенні біомеханіки та моторики людської руки шляхом інтеграції механічних вузлів та системи керування в єдиний компактний модуль. Ключовою особливістю розробленої системи є наявність п'яти пальців з індивідуальною актуацією, що дозволяє реалізовувати складні кінематичні ланцюги та широкий спектр схоплювань.

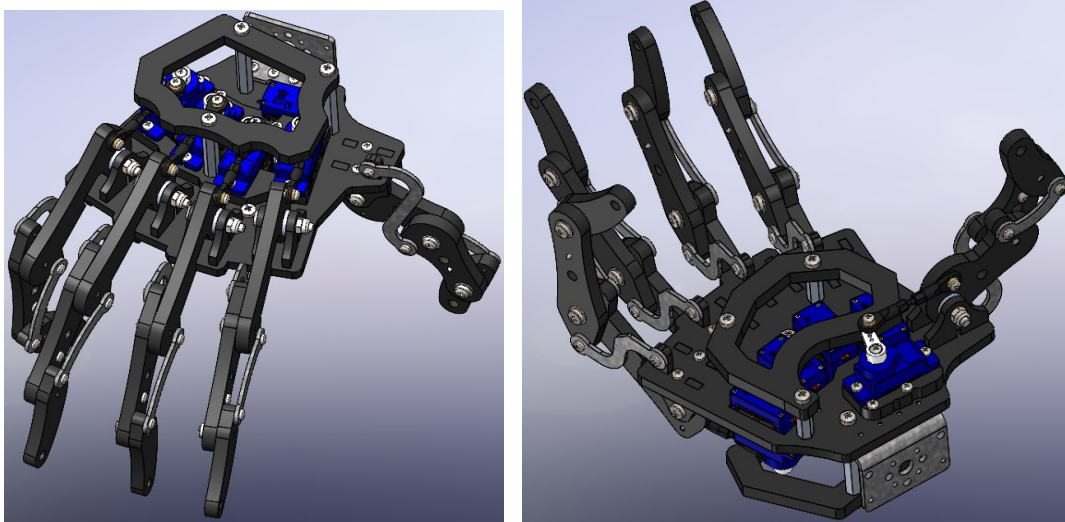


Рисунок 1 – Загальна концептуальна модель біонічного протезу кисті

Механічна підсистема протезу побудована за модульним принципом і включає три основні функціональні блоки: несучу основу (долоню), фалангові механізми пальців та систему передачі зусилля. Несуча основа виконана у вигляді складеної платформи, яка слугує жорстким шасі для розміщення виконавчих механізмів. Дизайн корпусу оптимізовано за принципом внутрішньої актуації [4]. Цей підхід передбачає інтеграцію мікро-сервоприводів безпосередньо в тіло кисті, а не їх винесення у гільзу передпліччя, що дозволяє створити самодостатній та компактний модуль. Шестикутна геометрія верхньої накладки забезпечує захист сервоприводів та конструктивну жорсткість на кручення. Важливою ергономічною особливістю є вузол великого пальця, встановлений на спеціальному виносному кронштейні під кутом до площини долоні. Така просторова конфігурація забезпечує функцію опозиції великого пальця решті масиву кисті, що є обов'язковою умовою для виконання силових циліндричних та точних щипкових захоплень.

Електромеханічна архітектура пристрою відзначається універсальністю. Виконавчими механізмами слугують мікро-сервоприводи (стандарту SG90 або MG90S) з металевим редуктором, розміщені горизонтально всередині несучої рами пальців для зменшення висоти профілю. Керування кутовим положенням здійснюється за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), що дозволяє програмно задавати швидкість руху кожного пальця та контролювати силу стискування. Апаратна частина відкрита до вибору мікроконтролера, включаючи

популярні платформи Arduino, ESP32 та STM32 для можливої інтеграції обробки електроміографічних (EMG) сигналів [5].

Основною інновацією розробленої моделі є застосована система передачі руху. Функціонально вона відповідає класу систем із дистальним приводом на основі жорстких важільних механізмів і тяг. Обертальний рух вихідного валу сервоприводу трансформується у зворотно-поступальний рух жорсткої тяги, з'єднаної з основою проксимальної фаланги. Жорсткі тяги дозволяють активно керувати як фазою згинання (флексії), так і розгинання (екстензії). У точці з'єднання тяги з приводом використано кульовий шарнір, що компенсує просторову неспіввісність площин обертання та запобігає заклинюванню механізму [3].

Кожен палець є уніфікованою функціональною одиницею та являє собою плоский важільний механізм модульної конструкції. Система фаланг включає проксимальну, середню та дистальну ланки, з'єднані циліндричними шарнірами. Передача руху реалізована через дворівневу систему важелів. Для узгодженого згинання середньої фаланги у вторинному контурі використано пасивну кінематичну ланку – металеву тягу S-подібної форми. Вигнута форма тяги дозволяє їй ефективно обходити вісь суглоба при глибокому згинанні, виключаючи механічну колізію з іншими елементами конструкції.

Для перевірки детермінованості руху модуля пальця та визначення його класу було проведено детальний структурно-кінематичний аналіз. Розрахункова модель базується на структурній схемі плоского важільного механізму з нижчими кінематичними парами (рис. 2). На основі топології ланцюга виділено одну нерухому ланку (стійку 0) та сім рухомих ланок ($n = 7$): кривошип 1 (важіль сервоприводу), шатун 2 (привідна тяга), проксимальна фаланга 4 (коромисло), напрямна S-подібна тяга 3, середня фаланга 6, тяга керування дистальною фалангою 5 та дистальна фаланга 7.

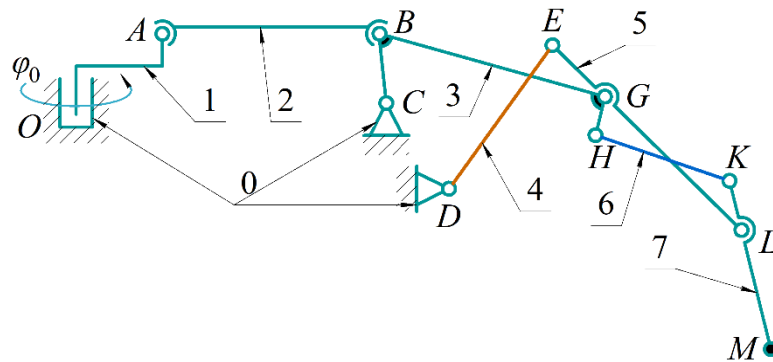


Рисунок 2 – Структурна схема одного з пальців біонічного протезу кисті

Усі з'єднання ланок є обертальними шарнірами, що відносяться до кінематичних пар V класу (p_5) за класифікацією Рело [3]. До них належать три з'єднання зі стійкою та сім міжланкових шарнірів, що загалом дає кількість кінематичних пар $p_5 = 10$. Вищі кінематичні пари (IV класу) у механізмі відсутні ($p_4 = 0$).

Ступінь вільності (рухомості) W плоского важільного механізму визначався за структурною формулою Чебишева [3]. Підставивши визначені значення топологічних параметрів, отримано:

$$W = 3 \cdot n - 2 \cdot p_5 - p_4 = 3 \cdot 7 - 2 \cdot 10 - 0 = 21 - 20 = 1. \quad (1)$$

Отриманий результат $W = 1$ математично доводить, що розроблений багатоланковий механізм пальця має рівно один ступінь вільності. Це означає, що рух усіх трьох фаланг є повністю детермінованим і однозначно залежить від єдиної узагальненої координати – кута повороту валу сервоприводу. Відповідно, запропонована кінематична схема забезпечує можливість точного керування процесом згинання цілого пальця за допомогою одного актуатора.

Для визначення класу механізму виконано розкладання кінематичного ланцюга на групи Ассура (структурні групи з нульовим ступенем вільності) [3]. Встановлено, що до первинного механізму I класу послідовно приєднуються три групи Ассура II класу 2-го порядку: перша забезпечує рух проксимальної фаланги, друга формує контур керування середньою фалангою, а третя узгоджує рух дистальної. Структурна формула має вигляд: $I(0,1) \rightarrow II_2(2,3) \rightarrow II_2(4,5) \rightarrow II_2(6,7)$. Відповідно, досліджуваний палець класифікується як механізм другого класу.

Висновки

У результаті проведеної роботи розроблено та досліджено концептуальну модель біонічного протеза кисті антропоморфного типу з п'ятьма незалежними ступенями вільності. Обґрунтовано та практично реалізовано використання системи внутрішньої актуації та жорстких важільних механізмів передачі руху (push-rod linkages). Доведено, що запропонована конструкція, на відміну від традиційних тросових систем, забезпечує можливість активного згинання і розгинання фаланг, підвищує жорсткість фіксації об'єктів та повністю усуває проблему механічного гістерезису.

Проведений структурно-кінематичний аналіз розробленого модуля пальця із застосуванням формули Чебишева математично підтвердив наявність одного ступеня вільності ($W=1$) у семиланковому механізмі. Декомпозиція кінематичного ланцюга дозволила класифікувати пристрій як плоский важільний механізм другого класу. Запропонована кінематична схема забезпечує жорстку синхронізацію руху фаланг та дозволяє реалізовувати детерміновану біоміметичну траєкторію захвату з високою точністю за допомогою одного приводу на палець, що робить її ефективним рішенням для подальших досліджень та протезування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Попадюха Ю.А. Особливості біонічних протезів верхніх кінцівок. Молодіжний науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. Фізичне виховання і спорт. 2017. Вип. 25. С. 26-42.
URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mnv_2017_25_6
2. Belter J. T., Segil J. L., Dollar A. M., Weir R. F. Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: A review. Journal of Rehabilitation Research and Development. 2013. Vol. 50, No. 5. P. 599–618.
URL: https://www.eng.yale.edu/grablab/pubs/Belter_JRRD2013.pdf
3. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин. Київ : Наукова думка, 2002. 660 с.
URL: http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2019/Kinitskiy_2004_272.pdf
4. Controzzi M., Clementi C., Peccerillo D., Cipriani C. The SSSA-MyHand: A dexterous lightweight myoelectric hand prosthesis. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2017. Vol. 25, No. 5. P. 459–468.
URL: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2016.2578980>
5. Козбур І.Р., Марущак П.О., Медвідь В.Р., Савків В.Б., Пісьціо В.П. Проектування мікропроцесорних систем керування. Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2022. 324 с.
URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39189>

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF THE BIONIC HAND

PROSTHESIS CONCEPT

Vitaliy Korendiy, Maksym Durniak, Ihor Kryvuliak, Bohdan Markovych

Abstract. *The paper discusses the development and investigation of a bionic hand prosthesis conceptual model, classified as a robotic anthropomorphic manipulator with five independent degrees of freedom. Special attention is paid to the mechanical architecture, applying the intrinsic actuation principle with servo drives integrated into the palm's base. An innovative motion transmission system based on rigid push-rod linkages is described. It has significant advantages over traditional tendon-driven mechanisms: providing active flexion and extension of the phalanges, eliminating mechanical hysteresis, and increasing positioning accuracy. A detailed structural and kinematic analysis of the finger module as a planar multi-link mechanism was conducted. Using Chebyshev's structural formula, one degree of freedom for the seven-link design was mathematically confirmed. The decomposition of the kinematic chain into Assur groups allowed classifying it as a second-class mechanism. The kinematic scheme ensures rigid synchronization of motion and deterministic reproduction of biomimetic grip trajectories.*

Keywords: *bionic prosthesis, kinematic analysis, linkage mechanism, degrees of freedom, anthropomorphic manipulator, intrinsic actuation, Assur groups.*

REFERENCES

1. Popadiukha Yu.A. Osoblyvosti bionichnykh proteziv verkhnikh kintsivok. Molodizhnyi naukovi visnyk Skhidnoievropeiskoho natsionalnoho universytetu imeni Lesi Ukrainky. Fizychno vykhovannia i sport. 2017. Vol. 25. P. 26–42. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mnv_2017_25_6. [in Ukrainian].
2. Belter J. T., Segil J. L., Dollar A. M., Weir R. F. Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: A review. Journal of Rehabilitation Research and Development. 2013. Vol. 50, No. 5. P. 599–618. URL: https://www.eng.yale.edu/grablab/pubs/Belter_JRRD2013.pdf
3. Kinytskyi Ya.T. Teoriia mekhanizmiv i mashyn. Kyiv : Naukova dumka, 2002. 660 p. [in Ukrainian]. URL: http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2019/Kinitskiy_2004_272.pdf
4. Controzzi M., Clementi C., Peccerillo D., Cipriani C. The SSSA-MyHand: A dexterous lightweight myoelectric hand prosthesis. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2017. Vol. 25, No. 5. P. 459–468. URL: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2016.2578980>
5. Kozbur I. R., Marushchak P. O., Medvid V. R., Savkiv V. B., Pisttsio V. P. Proektuvannia mikroprotsesornykh system keruvannia. Ternopil: Vyd-vo TNTU imeni Ivana Puliuia, 2022. 324 p. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39189>. [in Ukrainian].

БІОМЕХАНІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТАЗОВО-СТОПОВОГО МОДУЛЯ ПАСИВНОГО ЕКЗОСКЕЛЕТА

Корендій В.М.¹ [ORCID], Тис М.А.² [ORCID],

Вишневецький О.І.³ [ORCID], Маркович Б.М.⁴ [ORCID]

¹Національний університет «Львівська політехніка», к.т.н., доцент, Україна

²Національний університет «Львівська політехніка», аспірант, Україна

³Національний університет «Львівська політехніка», аспірант, Україна

⁴Національний університет «Львівська політехніка», д.ф.-м.н., професор, Україна

Анотація. У роботі виконано кінематико-силовий аналіз тазово-стопової частини пасивного екзоскелета нижніх кінцівок для реабілітації осіб із порушеннями опорно-рухового апарату. Конструкція охоплює стопу, гомілковий і стегновий важелі, тазову пластину та пружно-демпфувальні модулі. Під час циклу «присідання-вставання» відбувається накопичення та контрольований вивід енергії для зменшення зусиль користувача. Кінематичну модель побудовано за методом замкнених векторних контурів у MathCad, а імітаційне моделювання виконано у MapleSim, що підтвердило характерні траєкторії суглобів. Силовий аналіз включає розгляд статичного навантаження та переходу до згинального режиму. Стегновий важіль перевірено методом скінченних елементів у SolidWorks Simulation. Встановлено, що максимум еквівалентних напружень сягає 154 МПа, а прогин не перевищує 0,3 мм за навантаження до 1,5 кН, що повністю задовольняє умови міцності сталі Ст. 3 та підтверджує придатність конструкції для реабілітаційних завдань.

Ключові слова: пасивний екзоскелет, реабілітація, кінематичний аналіз, силовий аналіз, метод скінченних елементів, пружно-демпфувальний модуль..

Вступ. Порушення функцій опорно-рухового апарату суттєво обмежують виконання фундаментальних моторних функцій людини, серед яких найважливішими є процес переходу з положення сидячи у положення стоячи (цикл «присідання-вставання»), стабілізація постави та ініціація ходи. В останні десятиліття екзоскелети нижніх кінцівок стали перспективним інструментом для реабілітації пацієнтів, оскільки вони мають здатність ефективно перерозподіляти навантаження вздовж біокінематичного ланцюга «таз-коліно-гомілковостопний суглоб-стопа», направляти рух суглобів та

забезпечувати необхідну механічну підтримку без використання масивних і важких активних приводів [1, 2]. У конструкції таких пристроїв тазово-стоповий сегмент відіграє ключову роль, адже саме він безпосередньо взаємодіє з опорною поверхнею, визначає правильне просторове положення таза та, значною мірою, формує всі кінематичні і силові умови для функціонування екзоскелета загалом.

Головними інженерними викликами під час проєктування екзоскелетів залишаються узгодження осей штучних шарнірів механізму з анатомічними осями людини, збереження природних фізіологічних діапазонів руху, правильний вибір жорсткості та розміщення пружно-демпфувальних елементів, а також мінімізація загальної маси конструкції. Недостатня увага до цих аспектів часто призводить до збільшення пікових навантажень на суглоби, дискомфорту для користувача та погіршення якості рухів.

Процес вставання з положення сидючи є складною багатосуглобовою біомеханічною дією, що потребує значних моментів розгинання у тазостегновому та колінному суглобах, а також скоординованого нахилу тулуба вперед для генерації необхідного імпульсу [3]. Збільшення швидкості підйому значно підвищує пікові результуючі моменти в суглобах, що підкреслює необхідність створення таких пристроїв, які здатні модулювати навантаження без перешкоджання природній біомеханіці пацієнта. Використання квазіпасивних або пасивних модулів, які накопичують і вивільняють потенціальну енергію за допомогою пружин, є ефективним підходом для зниження загальних м'язових витрат і забезпечення підтримки під час вставання [4].

Метою даного дослідження є розроблення узагальненої аналітичної кінематико-силової моделі тазово-стопового сегмента пасивного нижньокінцівкового екзоскелета та виконання оцінки впливу його конструктивних параметрів на траєкторії руху механізму та структурні навантаження під час виконання типових реабілітаційних завдань.

Основний матеріал. Запропонована в даному дослідженні конструктивна компоновка тазово-стопової частини пасивного екзоскелета

(рис. 1) передбачає надійну жорстку фіксацію взуття користувача до спеціальної стопи екзоскелета. Ця стопа складається з передньої (носкової) та задньої (п'яткової) секцій, які рухомо з'єднані між собою за допомогою циліндричного шарніра. Надійний контакт із поверхнею опори та амортизація забезпечуються через профільовану гумову підшву. За допомогою шарнірного вузла, який виконує функцію гомілковостопного суглоба, стопа з'єднується з гомілковим важелем. Колінний шарнір з'єднує гомілковий важіль зі стегновим важелем, який, у свою чергу, шарнірно кріпиться до тазової пластини. Взаємне просторове і кутове положення всіх вказаних ланок механізму плавно регулюється системою енергоакумулювальних пружно-демпфувальних модулів.

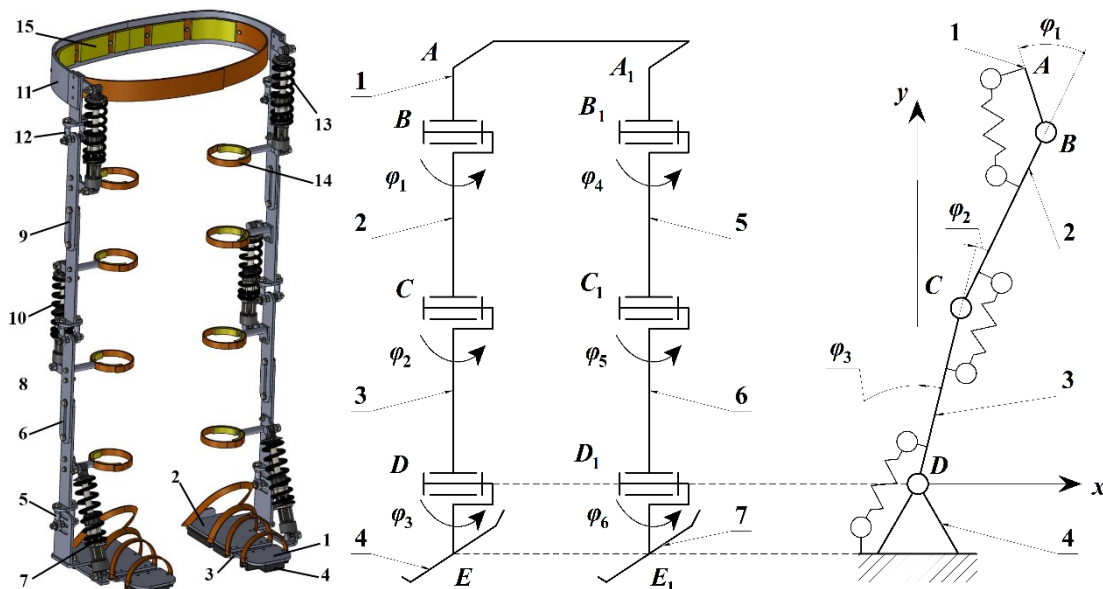


Рисунок 1 – Загальна компоновка та кінематична схема досліджуваного модуля

У номінальному (повністю ненавантаженому) стані конструкція екзоскелета забезпечує квазіфізіологічну установку всіх сегментів. Зокрема, гомілковий і стегновий важелі утримуються паралельно один одному, тазова пластина знаходиться перпендикулярно до стегнової ланки, а стопа встановлена під прямим кутом відносно гомілкового важеля. Під час виконання вправ реабілітації, таких як сідання або глибоке присідання, пружні елементи модулів стискаються, накопичуючи потенціальну енергію. Під час подальшої фази вставання ця акумульована енергія плавно вивільняється, виконуючи роль зовнішніх «пасивних м'язів», що суттєво знижує м'язове зусилля, необхідне користувачу для підняття власного тіла. Кожна нога

жорстко кріпиться до відповідних елементів екзоскелета спеціальними ремнями, а тазова пластина фіксується до тулуба.

Для математичного опису та кінематичного аналізу маневру «присідання-вставання» було розроблено плоску розрахункову кінематичну схему (рис. 1). У цій аналітичній моделі рух кожної ноги розглядається як рух відкритого кінематичного ланцюга, що складається з трьох рухомих ланок (гомілка, стегно, таз) та трьох обертальних шарнірів. За узагальнені координати було прийнято відносні кутові переміщення кожної наступної ланки відносно попередньої. Початок нерухомої декартової системи координат було розташовано безпосередньо в гомілковостопному суглобі.

Застосовуючи метод замкнених векторних контурів, було складено систему кінематичних рівнянь прямої кінематики. Ця система дозволяє однозначно визначати координати центрів обертання колінного та тазостегнового суглобів, а також просторове положення тулуба в будь-який момент часу. Чисельне комп'ютерне моделювання вказаного процесу було виконано у програмному середовищі Mathcad із використанням двофазних часових законів зміни кутів. Загальний час одного повного циклу маневру було прийнято рівним 2 с. Геометричні параметри моделі базувалися на реальних габаритах розробленої конструкції: довжина гомілкової ланки дорівнює 460 мм, стегнової ланки – 500 мм, а відстань на тазовій пластині – 160 мм.

Отримані результати аналітичних розрахунків показали, що під час виконання маневру присідання штучний колінний суглоб рухається по чіткій коловій траєкторії навколо гомілковостопного шарніра (рис. 2, а). Тазостегновий суглоб описує складну квазіеліптичну траєкторію, кривизна якої поступово зменшується мірою наближення до найнижчого положення. Розроблена модель відтворює контрольований нахил тулуба користувача вперед під час опускання та його подальше плавне повернення до вертикального положення. Для верифікації та підтвердження адекватності запропонованих аналітичних залежностей було розроблено детальну просторову імітаційну модель механічної системи екзоскелета у програмному пакеті MapleSim. Детальне порівняння результатів математичного

моделювання у середовищі Mathcad та імітаційного моделювання у MapleSim підтвердило їхню повну збіжність, що свідчить про високу точність розробленої кінематичної моделі та рівнянь руху.

Наступним важливим етапом дослідження стало виконання розгорнутого силового аналізу конструкції. В рамках цього етапу розглядалися розрахункові схеми навантаження, за яких на екзоскелет діє максимальна вертикальна статична сила, що еквівалентна масі тіла користувача. Для забезпечення запасу міцності цю розрахункову силу було прийнято рівною 1500 Н (що відповідає масі пацієнта до 150 кг). Точка прикладання цієї сили розміщена на тазовій пластині екзоскелета.

Знаходячись у повністю вертикальному положенні (стоячи), основні несучі ланки екзоскелета працюють переважно на осьове стиснення. У цьому випадку навантаження, що діє на кожну ланку, дорівнює повній вазі, коли людина спирається на одну ногу під час кроку. Однак, під час здійснення переходу до положення сидячи характер навантаження суттєво змінюється: поздовжня сила поступово перетворюється на значне згинальне навантаження. Проведені аналітичні розрахунки показали, що максимальний згинальний момент виникає у момент, коли стегновий важіль екзоскелета займає повністю горизонтальне положення. Його розрахункова величина становить близько 750 Н·м. Такий високий показник дозволив ідентифікувати стегновий важіль як найбільш критичний та навантажений структурний елемент пристрою.

Для детальної перевірки міцності та жорсткості виявленого критичного елемента було проведено комплексний аналіз його напружено-деформованого стану за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) у програмному додатку SolidWorks Simulation (рис. 2, б). Було побудовано точну просторову модель стегового важеля та згенеровано скінченно-елементну сітку з використанням тетраедричних елементів другого порядку. Для забезпечення максимальної точності результатів було здійснено локальне ущільнення сітки в зонах потенційних концентраторів напружень – навколо отворів для кріплення деталей та поздовжніх пазів. Як конструкційний матеріал було обрано сталь марки Ст. 3 із заявленою границею текучості 220 МПа.

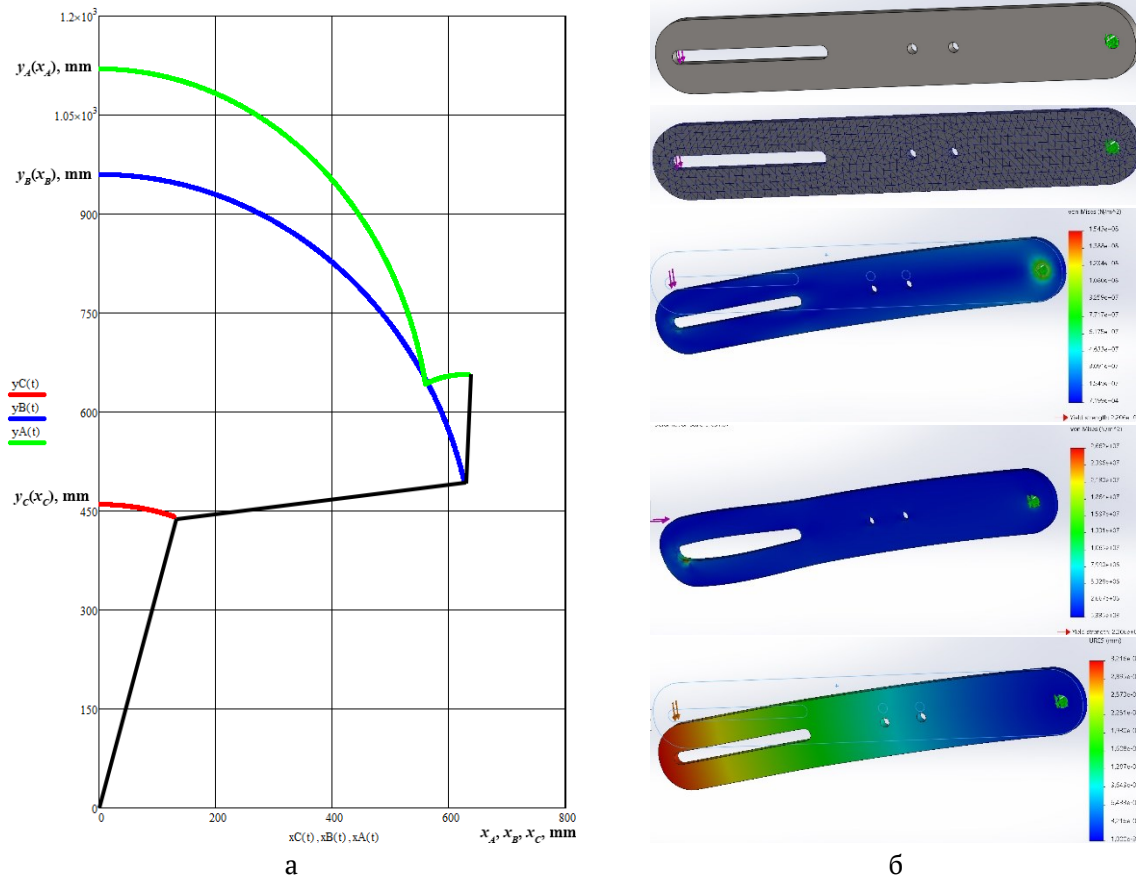


Рисунок 2 – Результати моделювання руху характерних точок екзоскелета у програмному продукті Mathcad (а) та аналізу напружено-деформованого стану стегового важеля у SolidWorks Simulation

Один кінець моделі жорстко фіксувався, а до іншого прикладалися розрахункові зусилля, що імітують вертикальну (стоячу) і горизонтальну (сидячу) конфігурації екзоскелета. Отримані результати лінійно-пружного розрахунку на інтенсивне згинання продемонстрували, що максимальні еквівалентні напруження, обчислені за критерієм міцності Мізеса (von Mises), виникають переважно у зонах геометричних концентраторів безпосередньо біля технологічних отворів кріплення і досягають пікового значення приблизно 154 МПа. Враховуючи, що регламентоване допустиме напруження для даної марки сталі у подібних конструкціях приймається на рівні 160 МПа, можна стверджувати, що конструкція задовольняє умови міцності. Розрахунковий коефіцієнт запасу міцності по відношенню до границі текучості становить 1,43.

При розрахунку на осьовий стиск (вертикальне положення) максимальні напруження у матеріалі важеля не перевищують 27 МПа, що становить менше

15 % від границі текучості та гарантовано виключає будь-який ризик втрати поздовжньої стійкості ланки. Додатково проведений аналіз пружних деформацій показав, що максимальний прогин вільного кінця стегового важеля при дії згинального навантаження становить від 0,3 до 0,32 мм. Зважаючи на жорсткі вимоги до забезпечення біомеханічної сумісності пристрою з тілом людини та необхідності мінімізації відхилень осей шарнірів (які не повинні перевищувати 0,5 мм), такі деформації є цілком допустимими і гарантують високу кінематичну точність і загальний комфорт для користувача під час процесу реабілітації [5].

Висновки

У рамках даного дослідження розроблено та валідовано комплексну кінематичну і силову модель тазово-стопового сегмента пасивного екзоскелета нижніх кінцівок. Використання методу замкнених векторних контурів дозволило точно відтворити фізіологічно коректні траєкторії руху людських суглобів під час виконання складного реабілітаційного маневру присідання та вставання. Адекватність розробленої розрахункової схеми та отриманих часових залежностей надійно підтверджено шляхом імітаційного моделювання у програмному комплексі MapleSim.

Проведений силовий аналіз дозволив чітко визначити найбільш навантажений елемент конструкції – стеговий важіль, який у горизонтальному положенні зазнає дії згинального моменту до 750 Н·м. Комплексний аналіз напружено-деформованого стану методом скінченних елементів у системі SolidWorks Simulation беззаперечно довів структурну надійність розроблених елементів. Встановлено, що при екстремальному розрахунковому навантаженні 1500 Н максимальні напруження у деталі сягають 154 МПа, що лежить у безпечних межах допустимих напружень для конструкційної сталі Ст. 3, а прогин не перевищує 0,32 мм.

Отримані результати підтверджують, що запропонована просторова компоновка та вибрані характеристики пружно-демпфувальних модулів забезпечують ефективне пасивне асистування користувачу та можуть бути використані як науково-обґрунтована база для подальшої оптимізації

реабілітаційного обладнання під індивідуальні антропометричні параметри пацієнтів.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Rodríguez-Fernández A., Lobo-Prat J., Font-Llagunes J. M. Systematic review on wearable lower-limb exoskeletons for gait training in neuromuscular impairments. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2021. Vol. 18, No. 1. P. 22. URL: <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00815-5>
2. Nepomuceno P., Souza W. H., Pakosh M., Musselman K. E., Craven B. C. Exoskeleton-based exercises for overground gait and balance rehabilitation in spinal cord injury: a systematic review of dose and dosage parameters. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2024. Vol. 21, No. 1. P. 73. URL: <https://doi.org/10.1186/s12984-024-01365-2>
3. Pai Y. C., Rogers M. W. Speed variation and resultant joint torques during sit-to-stand. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 1991. Vol. 72, No. 11. P. 881–885. URL: [https://doi.org/10.1016/0003-9993\(91\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0003-9993(91)90004-3)
4. Lee H., Kim S. H., Park H.-S. A fully soft and passive assistive device to lower the metabolic cost of sit-to-stand. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020. Vol. 8. P. 966. URL: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00966>
5. Korendiy V., Markovych B., Tys M., Vyshnevskiy O. Predictive Simulation of the Human Sit-to-Stand Transition // *Modeling, control and information technologies (MCIT)*. 2025. No. 8. – P. 272–275. URL: <https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.084>

BIOMECHANICAL MODELING OF THE PELVIS-FOOT MODULE OF A PASSIVE EXOSKELETON

Vitaliy Korendiy, Mykhailo Tys, Oleksandr Vyshnevskiy, Bohdan Markovych

Abstract. *This study presents a kinematic and force analysis of the pelvis-foot section of a passive lower-limb exoskeleton for the rehabilitation of individuals with musculoskeletal disorders. The architecture comprises a two-segment foot, shank and thigh links, a pelvic plate, and energy-storing spring-damper modules. During sit-to-stand transitions, these modules accumulate and release energy, significantly reducing user muscular effort. A closed-vector-loop kinematic model for a planar three-link chain was simulated in Mathcad and validated using a MapleSim multibody model, confirming physiologically sound joint trajectories. Force analysis addressed maximum bending moments during seating transition. Finite-element analysis of the critically loaded thigh link in SolidWorks Simulation revealed a maximum equivalent stress of 154 MPa and a tip deflection of 0.3 mm under a 1.5 kN design load. The design fully satisfies strength criteria for steel St. 3 structural elements, proving its feasibility for passive rehabilitation assistance.*

Keywords: *passive exoskeleton, rehabilitation, kinematics, force analysis, finite-element method, spring-damper module.*

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ

Косолап А.І. [ORCID]

Дніпровський національний університет ім. О. Гончара,

докт. фіз.-мат. наук, професор, Україна

Анотація. Розглядається задача математичного моделювання систем оптимального розподілу обмежених ресурсів. Ця задача залишається актуальною та найбільш досліджуваною вже понад сімдесят років. Це пов'язано зі складністю задач оптимального розподілу ресурсів, яка відноситься до класу NP-складних задач. Побудовано безліч оптимізаційних моделей, які мають велику розмірність та комбінаторну структуру. Такі моделі можуть розв'язуватися сучасними програмами тільки для задач малої розмірності. В роботі пропонуються порівняно прості оптимізаційні моделі, для яких розроблено програмне забезпечення. Програмне забезпечення використовує модуль Python CP-SAT для розв'язування лінійних оптимізаційних задач з цілими та булевими змінними. Розроблено також алгоритм розподілу ресурсів, на кожній ітерації якого розв'язуються ще простіші оптимізаційні задачі. Проведені обчислювальні експерименти показують, що запропоновані оптимізаційні моделі можуть ефективно розв'язуватися для задач середньої і навіть великої розмірності.

Ключові слова: оптимізаційна модель, оптимальний розподіл ресурсів, модуль CP-SAT, обчислювальні результати.

Вступ. Кожен проект, який реалізується в більшості сфер людської діяльності так чи інакше використовує ресурси. Це може бути сировина, устаткування, машини, фінанси, робітники, інформація, час та інше. Так як більшість ресурсів обмежена, то виникає проблема їх оптимального використання. Задача оптимального розподілу ресурсів включає деяку послідовність пов'язаних робіт з заданими термінами та ресурсами для їх виконання. Необхідно виконати дану послідовність робіт за мінімальний час і при цьому не перевершити заданої границі використання кожного ресурсу. Проект, як правило, представляється мережевим графіком, дуги якого вказують на послідовність виконання робіт.

Даній темі присвячено безліч публікацій, зокрема й оглядових робіт [1-5]. Розробляються як точні, так і метаевристичні методи [4-5]. Більшість моделей

оптимального розподілу ресурсів розбивають інтервал T виконання проекту, що складається з n робіт, на m підінтервалів. Тоді кожній роботі відповідає m булевих змінних, які дорівнюють одиниці тільки на інтервалі виконання кожної роботи. Таким чином, отримуємо $mT + 1$ змінну, достатню для побудови оптимізаційної моделі. Наприклад, для 100 робіт та 100 інтервалів часу отримаємо модель з 10000 булевими змінними. Якщо в якості змінних брати час початку кожної роботи, то модель буде містити тільки $n + 1$ змінну, але при цьому виникає проблема, як задати обмеження на використання ресурсів. Ця проблема вирішується в даній роботі.

Основний матеріал. Будемо припускати, що маємо послідовність n робіт з термінами їх виконання t_i , $i = 1, \dots, n$. Крім того, відомо кількість ресурсів r_i , яка потрібна для виконання i -ї роботи, а також максимальна кількість ресурсу R , яка не може бути перевершена під час виконання проекту. Необхідно виконати проект за мінімальний час при якому в кожний момент часу використовується не більше R ресурсів. Задачі виконання проектів часто розглядаються на мережевих графіках, зокрема знаходяться критичні шляхи в мережевому графіку, але при цьому задача оптимального розподілу ресурсів, як правило, не розглядається.

При виконанні проекту необхідно враховувати, що деякі роботи передують іншим, що визначається мережевим графіком робіт. Ця задача допускає різні узагальнення. Зокрема, ресурсів може бути декілька, терміни робіт можуть змінюватись, а також змінюватись інтенсивність використання ресурсів. Буде показано, що ці узагальнення легко врахувати, якщо побудована ефективна модель початкової задачі.

Для побудови моделі необхідно знати час початку виконання кожної роботи, який ми будемо позначати через x_i і його потрібно знайти. Задача полягає в мінімізації часу T виконання проекту, тобто

$$\min\{T \mid x_i + t_i \leq T, i=1, \dots, n, x_i \geq 0, x_i + t_i \leq t_j, \text{ " } ij \in B\}, \quad (1)$$

де B – множина пар індексів пов'язаних робіт.

В модель (1) необхідно додати обмеження на ресурси. Кількість ресурсів достатньо визначати тільки на початку виконання кожної роботи, так як тільки в ці моменти збільшується використання ресурсів. В кожний такий момент

необхідно визначити, які роботи виконуються і знайти сумарне значення таких ресурсів. Легко показати, що якщо i -та робота виконується в момент початку j -ї роботи, то тільки тоді буде виконуватися наступна квадратична нерівність

$$(x_i + t_i - x_j)(x_j - x_i) \geq 0, \quad i \neq j. \quad (2)$$

Тоді обмеження на ресурси можна записати у вигляді

$$r_j + \sum_{i=1(i \neq j)}^n r_i (\text{sign}[(x_i + t_i - x_j - \varepsilon)(x_j - x_i + \varepsilon)] + 1) / 2 \leq R, \quad j = 1, \dots, n. \quad (3)$$

Величина $\varepsilon = 0,001$ виключає рівність нулю функції sign . Коефіцієнт при r_i в формулі (3) буде дорівнювати одиниці тільки тоді, коли i -та робота виконується. Таким чином, отримана модель оптимального розподілу ресурсу (1), (3) мінімальної розмірності. Але обмеження (3) є досить складним, що затрудняє розв'язок задачі (1), (3) існуючими методами та програмами.

Для побудови практичної моделі введемо нові змінні z_{ij} , які дорівнюють нулю, якщо в момент початку j -го завдання виконується i -те завдання, інакше ця змінна дорівнює нулю. Це дозволяє задати обмеження на ресурси у вигляді

$$r_j + \sum_{i=1}^n r_i z_{ij} \leq R, \quad j = 1, \dots, n. \quad (4)$$

Значення змінних z_{ij} будуть залежати від значень x_i , тому таку залежність необхідно задати додатковими обмеженнями. Для цього введемо ще одну змінну y_{ij} , яка дорівнює одиниці, якщо $x_i \leq x_j$ інакше вона дорівнює нулю. Тоді будемо мати наступні обмеження

$$\begin{aligned} -Q y_{ij} &\leq (x_i - x_j - \varepsilon) \leq Q(1 - y_{ij}), \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, n (j \neq i), \\ Q(z_{ij} - y_{ij}) &\leq (x_i + t_i - x_j) \leq Q(z_{ij} - y_{ij} + 1), \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, n (j \neq i), \\ z_{ij} &\leq y_{ij}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, n (i \neq j), \end{aligned} \quad (5)$$

де Q – велике число, достатньо покласти $Q = \sum_{i=1}^n t_i$.

Покажемо, що обмеження (5) еквівалентні обмеженням (2). Обмеження (5) виконується, якщо $y_{ij} = 1$. Якщо $y_{ij} = 0$, то умова $x_i \leq x_j$ не виконується, в цьому випадку $x_i \geq x_j$. Розглянемо перше обмеження (5). Нехай $z_{ij} = 1$, тоді й $y_{ij} = 1$ з останнього обмеження (5). Тоді виконується обмеження $x_i + t_i - x_j \geq 0$ і $x_j - x_i \geq 0$ і умова (5) виконується. Якщо $z_{ij} = 0$ і $y_{ij} = 0$, то $x_i + t_i - x_j > 0$, $x_j - x_i < 0$ і умова порушується. Навіть, якщо $z_{ij} = 0$ і $y_{ij} = 1$, то $x_i + t_i - x_j < 0$, $x_j - x_i > 0$ і умова (5) знову порушується. Таким чином, побудована модель оптимального розподілу ресурсів (1), (4)-(5), яка є лінійною з булевими та цілими змінними. Кількість змінних моделі дорівнює $1 + 2n^2 - n$, а кількість обмежень $3n^2 - n$ не враховуючи лінійні обмеження для пов'язаних робіт.

Для моделі (1), (4)-(5) розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє розв'язувати задачі оптимального розподілу ресурсів з кількістю робіт 100 і більше. Нижче, на рис. 1 показаний графік виконання робіт, отриманий програмою.

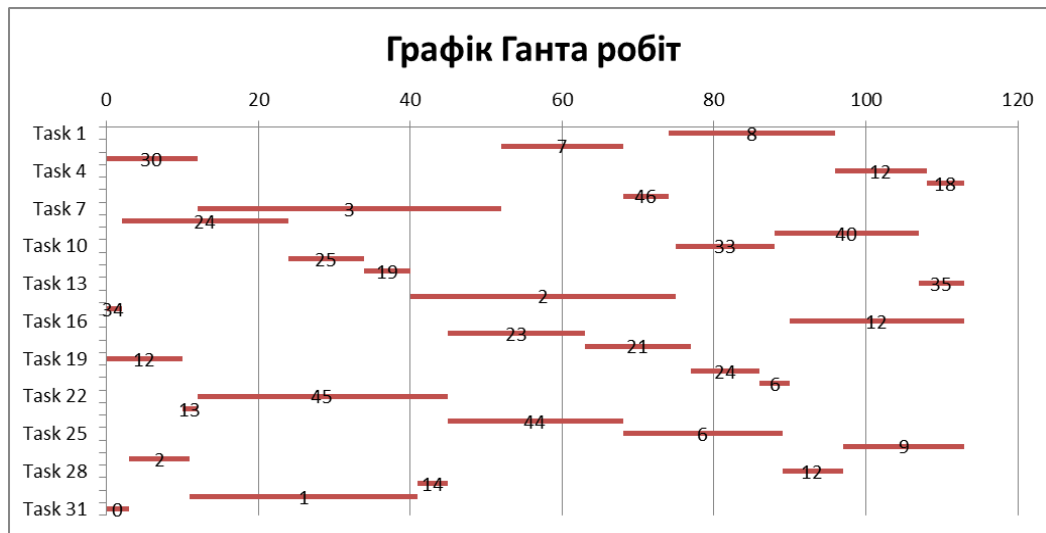


Рисунок 1 – Графік Ганта оптимального виконання робіт

Далі побудуємо дещо спрощену модель даної задачі. Будемо допускати, що мається послідовність n робіт і для кожної роботи відомий максимальний термін її виконання $[p_i, q_i]$ та обсяг ресурсів w_i на їх виконання. Обсяг ресурсу на кожну роботу в довільний момент часу не повинен перевищувати величини r_i , а сумарна кількість ресурсів величини R . Необхідно виконати всі роботи за мінімальний час і при цьому не порушити обмеження на ресурси. Розібемо інтервал планування проекту $[0, \max\{q_i\}]$ на m підінтервалів. Позначимо через x_{ij} кількість ресурсів, яка виділяється на виконання i -ї роботи в j -му періоді. Будемо розв'язувати задачу

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^n x_{iq_i} \mid \sum_{j=p_i}^{q_i} x_{ij} = w_i, i=1, \dots, n, \sum_{i=1}^n x_{ij} \leq R, j = p_1, \dots, p_n, 0 \leq x_{ij} \leq r_i, i, j = p_1, \dots, p_n \right\}. \quad (6)$$

Якщо в розв'язку задачі (6) деякі з x_{iq_i} дорівнюють нуля, то зміщуємо на один інтервал наступні роботи і знову розв'язуємо задачу (6). Процес пошуку оптимального розподілу ресурсів закінчується якщо всі x_{iq_i} будуть більше нуля. Тоді час виконання проекту буде дорівнювати оновленному значенню $\max\{q_i\}$. Лінійна модель (6) дозволяє розв'язувати задачі великої розмірності і також реалізована програмно з використанням модуля CP-SAT.

Висновки. Запропоновані нові оптимізаційні моделі оптимального розподілу ресурсу при виконанні послідовності робіт. Проведені обчислювальні експерименти, які свідчать про ефективність запропонованих моделей. Моделі легко узагальнюються на задачі з декількома видами ресурсів за рахунок додаткових відповідних обмежень.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Artigues C., Hartmann S., Vanhoucke M. Fifty years of research on resource-constrained project scheduling explored from different perspectives. *European Journal of Operational Research*. – 2026. № 328(2). P. 367–389. DOI: 10.1016/j.ejor.2025.03.024.
2. Hartmann S., Briskorn, D. An updated survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*. – 2022. № 297(1). P.1–14. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.05.004.
3. Artigues C. On the strength of time-indexed formulations for the resource-constrained project scheduling problem. *Operations Research Letters*. – 2017. № 45(2). P. 154–159. DOI: 10.1016/j.orl.2017.02.001.
4. Vanhoucke M., Coelho J. A matheuristic for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*. – 2024. №319(3), P. 711–725. DOI: 10.1016/j.ejor.2024.07.016.
5. Pellerin R., Perrier N., Berthaut F. A survey of hybrid metaheuristics for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*. – 2020. № 280(2). P. 395–416. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.01.063.

MODELING OF OPTIMAL RESOURCE ALLOCATION PROBLEMS

Anatolii Kosolap

Abstract. *We consider the problem of mathematical modeling of systems of optimal allocation of limited resources. This problem remains relevant and has been the most studied for over seventy years. This is due to the complexity of optimal resource allocation problems, which belong to the class of NP-hard problems. Many optimization models have been constructed that have a high dimension and a combinatorial structure. Such models can be solved by modern programs only for low-dimensional problems. The work proposes relatively simple optimization models for which software has been developed. The software uses the Python CP-SAT module to solve linear optimization problems with integer and Boolean variables. A resource allocation algorithm has also been developed, at each iteration of which even simpler optimization problems are solved. The computational experiments performed show that the proposed optimization models can be effectively solved for problems of medium and even high dimension.*

Keywords: *optimization model, optimal resource allocation, CP-SAT module, computational results.*

ПРОЄКТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ

Куроп'ятник О. С. [ORCID]

Український державний університет науки і технологій, к. т. н., доцент, Україна

Анотація. Метою роботи є формування рекомендацій до проєктування енергоефективних стрічкових конвеєрів на основі використання оптимальних значень характеристик цих транспортних засобів. Проведено низку теоретичних досліджень енергоефективності таких конвеєрів на основі оцінювання впливу їх характеристик на питомі енерговитрати. Окружне зусилля приводу визначалося з використанням методу обходу за контуром. Для встановлення оптимальних значень продуктивності конвеєра та швидкості руху стрічки ширину стрічки було подано як функцію цих величин з урахуванням фізико-механічних властивостей транспортованого вантажу, особливостей конструкції роликпопору та кута нахилу конвеєра. Як результат, для окремих вантажів отримано оптимальні значення ширини стрічки та співвідношення продуктивності конвеєра та швидкості руху стрічки, за яких питомі енерговитрати є мінімальними.

Ключові слова: стрічковий конвеєр; енергоефективність; продуктивність; ширина стрічки; оптимізація

Стрічковими конвеєрами є машини безперервної дії, основним елементом яких є прогумована вертикально замкнута стрічка, що огинає кінцеві барабани, один з яких, як правило, є приводним, інший – натяжним. Стрічкові конвеєри дуже широко застосовуються на підприємствах хімічної, металургійної, машинобудівної промисловості, у виробництві будівельних матеріалів, транспортному та промисловому будівництві, на вуглезбагачувальних фабриках. Тому задача підвищення ефективності таких машин, а також ефективності транспортних процесів з їх використанням, є актуальною.

Автори роботи [1] виділяють два способи зниження енергоспоживання на шахтному магістральному конвеєрному транспорті: встановлення додаткових рухомих або стаціонарних бункерів та використання засобів для забезпечення змінності швидкості руху конвеєрної стрічки пропорційно вхідному

вантажопотоку. Відмічається, що підвищення коефіцієнта корисної дії приводу, заміна муфт на більш сучасні, покращення пускових режимів шляхом упровадження пристроїв плавного пуску, а також застосування нових типів стрічок збільшують термін служби рухомих елементів конвеєра, але знижують споживання електроенергії незначною мірою. Більш сучасні дослідження, ґрунтовний огляд яких наведено в роботі [2], показують, що ключовими рішеннями у підвищенні енергоефективності є використання стрічок з низьким тертям, частотно-регульованих приводів, систем моніторингу та автоматизації.

Питанням підвищення енергоефективності стрічкових конвеєрів присвячено роботи [3, 4]. Методики досліджень, які використали автори, є схожими, однак робота [4] спрямована на оцінювання впливу окремих параметрів конвеєра на його енергоефективність, а в дослідженні [3] представлено результати теоретичного та емпіричного аналізу використання енергії в конвеєрах для розкривних порід та вугілля з акцентом на балансуванні взаємозв'язку між швидкістю стрічки та навантаженням. Також проводилися дослідження характеру розподілу втрат енергії під час завантаження [5]. Встановлено, що використання регулятора напруги дозволяє зменшити втрати енергії, які виникають через зміни технологічних параметрів стрічкового конвеєра. У роботі [6] проведено експериментальні дослідження по визначенню питомих енерговитрат стрічкових конвеєрів за різних значень їхніх характеристик. Їх результати отримано шляхом виконання статистичного аналізу даних про конвеєри, що використовуються на різних цементних заводах.

Аналіз літературних джерел показав, що питанням енергоефективності стрічкових конвеєрів приділено багато уваги, проте не висвітлено окремі аспекти проєктування енергоефективних конвеєрів, які базуються на використанні оптимальних значень характеристик цих транспортних засобів. Вирішенню цього питання присвячено дану роботу.

Метою роботи є формування рекомендацій до проектування енергоефективних стрічкових конвеєрів на основі використання оптимальних значень характеристик цих транспортних засобів.

Оптимальні значення характеристик стрічкових конвеєрів будемо визначати, виходячи з необхідності мінімізації питомих енерговитрат e , які відображають витрати енергії E на транспортування вантажу масою m на відстань s : $e = E/(ms)$. Витрати енергії може бути визначено за формулою $E = Fs/\eta$, де F – окружне зусилля приводу; η – коефіцієнт корисної дії приводу. Після виконання математичних перетворень отримуємо

$$e = \frac{F}{\eta m}. \quad (1)$$

Окружне зусилля приводу конвеєра з гнучким тяговим органом, в тому числі стрічкового, визначається з використанням методу обходу за контуром, відповідно до якого

$$S_{i+1} = S_i + W_{i,i+1}, \quad (2)$$

де S_i , S_{i+1} – натяги стрічки в точках i та $i+1$ тягового контуру; $W_{i,i+1}$ – опір руху стрічки на ділянці контуру між точками i та $i+1$.

Розрахунки будемо проводити для конвеєрів зі схемою, наведеною на рис. 1.

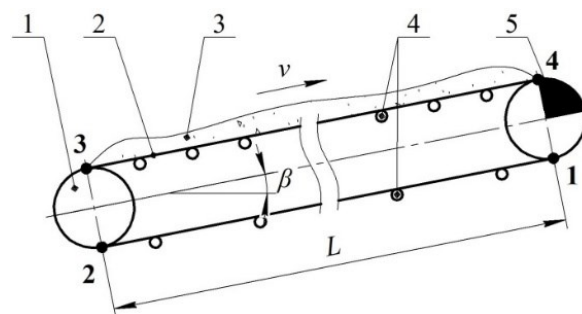


Рисунок 1 – Схема конвеєра:
1 – натяжний барабан; 2 – стрічка;
3 – транспортований вантаж;
4 – роликоопори; 5 – приводний барабан

Відповідно до позначень, прийнятих на рис. 1, окружне зусилля приводу

$$F = S_4 - S_1, \quad (3)$$

де S_1 , S_4 – натяги стрічки у точках її збігання з приводного барабана та набігання на барабан відповідно.

Можливість реалізації тяги стрічкового конвеєра забезпечується у разі дотримання умови

$$F = S_4 - S_1, \quad (4)$$

де f – коефіцієнт зчеплення стрічки з приводним барабаном; α – кут огинання стрічкою приводного барабана.

Після виконання низки математичних перетворень маємо:

$$S_1 = \frac{kW_{12} + W_{34}}{\exp(f\alpha) - k}; \quad (5)$$

$$S_4 = \frac{\exp(f\alpha)}{\exp(f\alpha) - k} (kW_{12} + W_{34}). \quad (6)$$

Тоді окружне зусилля приводу

$$F = \frac{\exp(f\alpha) - 1}{\exp(f\alpha) - k} (kW_{12} + W_{34}). \quad (7)$$

Величини опорів руху стрічки визначаємо так:

$$W_{12} = q_0 g L (w' \cos \beta - \sin \beta) + q_p'' g L w' \cos \beta; \quad (8)$$

$$W_{34} = (q + q_0) g L (w' \cos \beta + \sin \beta) + q_p' g L w' \cos \beta. \quad (9)$$

У цих формулах q – погонна маса транспортованого вантажу; q_0 – погонна маса стрічки; q_p' , q_p'' – погонні маси роlikоопор (робочої та холостої віток стрічки відповідно); L , β – довжина та кут нахилу конвеєра (див. рис. 1); w' – приведений коефіцієнт опору руху стрічки.

Поеднуючи вирази (7)–(9), отримуємо:

$$F = \frac{\exp(f\alpha) - 1}{\exp(f\alpha) - k} [kq_0 g L (w' \cos \beta - \sin \beta) + kq_p'' g L w' \cos \beta + (q + q_0) g L (w' \cos \beta + \sin \beta) + q_p' g L w' \cos \beta]. \quad (10)$$

Після підставлення (10) у (1) та виконання математичних перетворень отримуємо:

$$e = \frac{g}{\eta} \frac{\exp(f\alpha) - 1}{\exp(f\alpha) - k} \left[\left(1 + \frac{m_0}{m} + \frac{m_p}{m} \right) w' \cos \beta + \left(1 + \frac{m_0}{m} \right) \sin \beta + k \frac{m_0}{m} (w' \cos \beta - \sin \beta) \right]. \quad (11)$$

Отже, отримано залежність питомих енерговитрат від параметрів конвеєра, у якій прийнято такі позначення: $m = qL$ – маса транспортованого вантажу; $m_0 = q_0 L$ – маса стрічки на одному напрямку руху (без врахування частини стрічки, що знаходиться на барабанах); $m_p = (q_p' + kq_p'')L$ – узагальнена маса роlikоопор на обох напрямках руху стрічки.

Детальний аналіз виразу (11) показав, що питомі енерговитрати залежать від таких характеристик конвеєра, як ширина стрічки B , кут нахилу конвеєра β , продуктивність Π , швидкість v та приведений коефіцієнт опору руху стрічки w' . Також певний вплив мають фізико-механічні властивості транспортованого вантажу, зокрема, коефіцієнт C продуктивності, який залежить від форми роликоопор та фізико-механічних властивостей транспортованого вантажу, та γ – насипна щільність транспортованого вантажу. Розглянемо окремі випадки сполучення цих величин для різних вантажів [7]:

- пісок – $C\gamma = 470 \cdot 1,45 \approx 680$;
- ґрунт – $C\gamma = 470 \cdot 1,6 \approx 750$;
- гравій – $C\gamma = 470 \cdot 1,8 \approx 845$;
- щебінь – $C\gamma = 550 \cdot 1,6 = 880$.

З рис. 2 видно, що функція $e(B)$ має два екстремуми, отже, існує оптимальне значення ширини стрічки B_{opt} , за якого питомі енерговитрати набувають мінімального значення. Також можна стверджувати, що використання стрічки шириною, яка відповідає першому екстремуму цієї функції, є небажаним, тому що за таких умов питомі енерговитрати є найбільшими. Характер залежності $e(B)$ для різних матеріалів є незмінним, до того ж ця функція набуває екстремальних значень за одних і тих самих значень аргументу. Отже, оптимальне значення ширини стрічки не залежить від виду транспортованого вантажу, так само й від форми роликоопор. Дослідження показали, оптимальне значення ширини стрічки, за якого питомі енерговитрати є мінімальними, залежить тільки від кута нахилу конвеєра (більшою мірою) та від коефіцієнтів, які визначають втрати енергії, зокрема, коефіцієнта опору руху стрічки. При цьому вплив коефіцієнта опору руху стрічки зростає зі збільшенням кута нахилу конвеєра. Відмічаємо, що B_{opt} не залежить від довжини конвеєра, його продуктивності та швидкості руху стрічки.

Функцію $e(\Pi)$ подано у графічному вигляді на рис. 3. Вона має два екстремуми: перший відповідає максимальним питомим енерговитратам, другий – мінімальним. Отже, існує певне оптимальне значення продуктивності Π_{opt} , за якого конвеєр є найбільш енергоефективним (питомі енерговитрати

найменші). Таке значення залежить від швидкості руху стрічки, до того ж ця залежність є лінійною.

Залежність питомих енерговитрат від співвідношення $\xi = \Pi/v$ для різних видів транспортованого вантажу подано на рис. 4. Як бачимо, функція $e(\xi)$ має два екстремуми, так само як і функція $e(B)$, але її аргументи, що відповідають екстремальним значенням, різняться для кожного з видів транспортованого вантажу. Оптимальні значення співвідношення ξ подано в табл. 1.

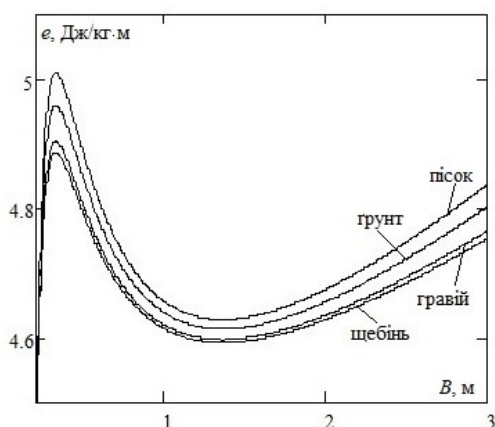


Рисунок 2 - Залежність питомих енерговитрат від ширини стрічки для різних видів транспортованого вантажу

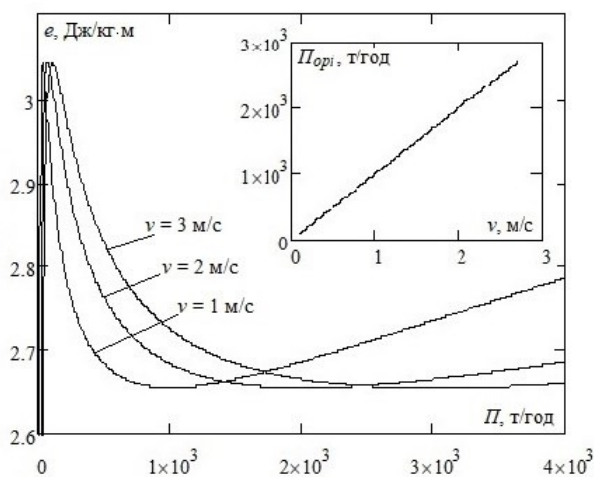


Рисунок 3 - Залежність питомих енерговитрат від продуктивності конвеєра за різних значень швидкості руху стрічки

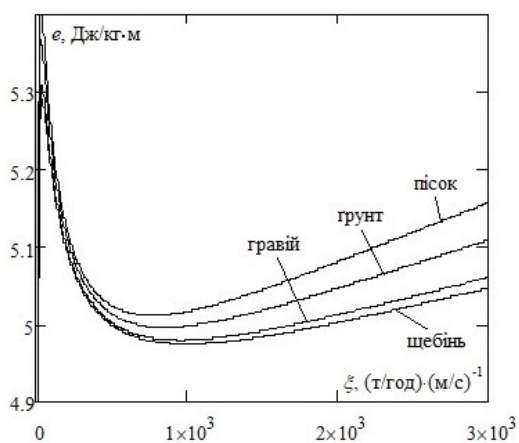


Рисунок 4 - Залежність питомих енерговитрат від співвідношення продуктивності та швидкості руху стрічки для різних видів транспортованого вантажу

Таблиця 1

Оптимальні співвідношення ξ_{opt} ,
(т/год)·(м/с)⁻¹

Транспортований вантаж	ξ_{opt}
Пісок	770
Грунт	850
Гравій	958
Щебінь	998

Висновки

Проектування енергоефективних стрічкових конвеєрів вимагає врахування оптимальних значень їхніх характеристик, зокрема, ширини стрічки, продуктивності та швидкості, за яких питомі енерговитрати стають мінімальними. Доцільність вибору інших значень повинно мати достатнє техніко-економічне обґрунтування. Разом із тим слід враховувати, що чисельні значення величин, наведені в цій роботі, отримано для певних сполучень характеристики транспортованих вантажів і можуть відрізнятися за інших умов використання конвеєрів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Разумний Ю. Т., Прокуда В. М. Енергоефективність магістрального конвеєрного транспорту вугільних шахт : монографія. Дніпро : НГУ, 2018. 120 с.
2. Konieczna-Fuławka M. Energy-saving solutions applied in belt conveyors: a literature review. *Energies*. 2025. Vol. 18. 3019. doi: 10.3390/en18123019
3. Jurdziak L., Bajda M. Balancing load and speed: a new approach to reducing energy use in coal conveyor systems. *Energies*. 2025. Vol. 18. 4716. doi: 10.3390/en18174716
4. Kulinowski P. Directions for reducing the energy consumption of mining belt conveyors. *Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering*. 2022. № 3 (551). P. 21–34. doi: 10.7494/miag.2022.3.551.21
5. Печеник М. В., Бур'ян С. О., Казьміна Л. М. Дослідження характеру розподілу втрат під час завантаження конвеєра. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2018. № 2. С. 63–67. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2215/2160> (дата звернення: 01.04.26).
6. Jena M. Ch., Mishra S. K., Moharana H. S. Experimental investigation on maximizing conveying efficiency of belt conveyors used in series application and estimation of power consumption through statistical analysis. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2022. Vol. 42 (3). 14031. doi: 10.1002/ep.14031
7. Bohomaz V. M. Research of dependence of belt conveyer drive power on its design parameters. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2016. № 1. P. 131–146. doi: 10.15802/stp2016/61024

DESIGN OF ENERGY EFFICIENT BELT CONVEYORS

Oleksii Kuropiatnyk

Abstract. *The aim of the work is to formulate recommendations for the design of energy-efficient belt conveyors based on the use of optimal values of the characteristics of these transport vehicles. A number of theoretical studies of the energy efficiency of such conveyors were conducted based on the assessment of the influence of their*

characteristics on specific energy consumption. The drive force was determined using the contour bypass method. To establish optimal values of the conveyor productivity and belt speed, the belt width was given as a function of these values, taking into account the physical and mechanical properties of the transported cargo, the design features of the roller supports and the angle of inclination of the conveyor. As a result, for individual cargoes, optimal values of the belt width and the ratio of conveyor productivity and belt speed were obtained, at which the specific energy consumption is minimal.

Keywords: belt conveyor; energy efficiency; productivity; belt width; optimization

REFERENCES

1. Razumnyi Yu. T., Prokuda V. M. Enerhoefektyvnist mahistralnoho konveiernoho transportu vuhilnykh shakht : monohrafiia. Dnipro : NHU, 2018. 120 p. [in Ukrainian]
2. Konieczna-Fuławka M. Energy-saving solutions applied in belt conveyors: a literature review. *Energies*. 2025. Vol. 18. 3019. doi: 10.3390/en18123019.
3. Jurdziak L., Bajda M. Balancing load and speed: a new approach to reducing energy use in coal conveyor systems. *Energies*. 2025. Vol. 18. 4716. doi: 10.3390/en18174716.
4. Kulinowski P. Directions for reducing the energy consumption of mining belt conveyors. *Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering*. 2022. № 3 (551). P. 21–34. doi: 10.7494/miag.2022.3.551.21.
5. Pechenyk M. V., Burian S. O., Kazmina L. M. Doslidzhennia kharakteru rozpodilu vtrat pid chas zavantazhennia konveiera. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. 2018. № 2. P. 63–67. [in Ukrainian]
6. Jena M. Ch., Mishra S. K., Moharana H. S. Experimental investigation on maximizing conveying efficiency of belt conveyors used in series application and estimation of power consumption through statistical analysis. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2022. Vol. 42 (3). 14031. doi: 10.1002/ep.14031.
7. Bohomaz V. M. Research of dependence of belt conveyer drive power on its design parameters. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2016. № 1. P. 131–146. doi: 10.15802/stp2016/61024

ДЕФІЦИТ УВАГИ НАУКОВОЇ СПІЛЬНОТИ ДО ПРОБЛЕМАТИКИ API В ЕПОХУ МІКРОСЕРВІСНОЇ АРХІТЕКТУРИ

Кушнір Б. Т.¹ [ORCID], Іванов О. П.² [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

²Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

Анотація. Досліджено аномалію сучасного наукового дискурсу щодо мікросервісної архітектури – систематичне недооцінювання важливості ролі інтерфейсів прикладного програмування (API) на тлі домінування публікацій з хмарних обчислень, штучного інтелекту та інших перспективних напрямків. Проведений аналіз публікацій у провідних наукометричних базах даних за період 2020–2025 рр. засвідчив суттєвий дисбаланс: обсяг досліджень мікросервісної архітектури та суміжних технологій значно перевищує кількість робіт, присвячених безпосередньо менеджменту, еволюції та дизайну програмних інтерфейсів. API виступає ключовим елементом мікросервісів, без якого компоненти залишаються ізольованими, а система – нефункціональною. Виявлено прогалини в науковому дискурсі, зокрема недостатню розробку методологій сталого розвитку API, проблеми зворотної сумісності та управління несумісними змінами.

Ключові слова: програмне забезпечення, мікросервісна архітектура, еволюція API, зворотна сумісність.

Метою даної роботи є проведення аналізу наукової літератури, виявлення прогалин у дослідженні проблематики API в контексті мікросервісної архітектури та формулювання науково обґрунтованих пропозицій щодо подолання виявленого дефіциту.

Для досягнення поставленої мети було виконано аналіз публікацій у провідних наукових базах даних, зокрема Google Scholar, IEEE Xplore, ACM Digital Library, ResearchGate та arXiv, за період 2020–2025 рр. Ключові пошукові запити включали «Microservices API evolution», «API breaking changes», «API maintenance costs», «REST API versioning microservices». Додатково було залучено результати третинних досліджень, зокрема роботи Stojanov та інших [1], які проаналізували 44 вторинні дослідження з мікросервісної архітектури.

Результати пошуку демонструють суттєву асиметрію в науковому дискурсі. Кількість публікацій з мікросервісної архітектури в цілому сягає десятків тисяч, тоді як робіт, присвячених безпосередньо менеджменту та дизайну API, – лише кілька сотень. При цьому тематика еволюції API та несумісних змін представлена ще меншою кількістю публікацій. Серед основних тем досліджень мікросервісної архітектури домінують архітектурний дизайн, життєвий цикл, міграція та виклики впровадження. Однак питання API в цих роботах розглядаються переважно побічно, без глибокого аналізу специфічних проблем.

Найбільш релевантними дослідженнями з проблематики API в мікросервісній архітектурі є роботи Lercher [2], присвячені управлінню еволюцією API. Виявлено, що команди розробників неформально комунікують зміни REST API, а також проблеми з несумісними змінами та міграцією споживачів на нові версії. Дослідження Collina, Maraschi та Pirini [3] запропонувало алгоритм для визначення ризику, пов'язаного з кожною зміною будь-якого мікросервісу в системі, при цьому автори зазначають, що здатність незалежно розгортати сервіси водночас ускладнює управління ризиками, оскільки будь-яка модифікація сервісу може спричинити відмову всієї системи. Lahtinen [4] з Гельсінського університету присвятила дослідження спрощеному методу виявлення пошкоджень API в мікросервісних архітектурах. Yaroshynskiy та інші [5] дослідили проблеми та ризики, пов'язані зі змінами API під час еволюції програмного забезпечення.

Аналіз літератури дозволив виділити основні прогалини в науковому дискурсі:

- більшість публікацій фіксує проблеми методологій сталого розвитку API, але не пропонує системних рішень;
- питання зворотної сумісності розглядаються фрагментарно, без комплексних підходів до управління та стратегій її забезпечення;
- вартість підтримки API та витрати на міграцію споживачів майже не досліджуються, що свідчить про низький рівень досліджень економічних аспектів;
- бракує емпіричних досліджень, оскільки переважають теоретичні роботи, тоді як практичні кейси та кількісні дані представлені обмежено.

У контексті мікросервісної архітектури API відіграє роль системоутворювального елемента, що забезпечує комунікацію між сервісами шляхом передачі даних та команд, інтеграцію гетерогенних компонентів у єдину систему, абстракцію через приховування внутрішньої реалізації сервісів, а також контракт, що визначає чіткі правила взаємодії між компонентами. Без належним чином спроектованих API мікросервіси стають ізольованими та не здатні утворити функціональну систему. Це підтверджується принципом автономності, який є одним із ключових принципів мікросервісної архітектури.

Для систематичного дослідження проблематики API доцільно застосувати методологічну рамку, що охоплює життєвий цикл API – від проєктування через версіювання і документування до моніторингу та застарівання, якісні атрибути API, зокрема продуктивність, надійність, безпеку, зрозумілість та зворотна сумісність, організаційні аспекти, включаючи управління змінами, комунікацію між командами та керівництвом, а також економічні фактори – кошторис розробки, підтримки та міграції споживачів. Такий комплексний підхід дозволяє охопити всі аспекти життєвого циклу API та ідентифікувати проблемні зони, що потребують наукового дослідження.

Однією з найгостріших проблем в управлінні мікросервісними системами є проблема «breaking changes» – змін в API, що порушують сумісність із попередніми версіями. Як зазначається в дослідженні Yaroshynskyi та інших [5], центральним питанням є виклики та ризики, пов'язані з модифікацією API під час еволюції програмного забезпечення, які можуть призвести до несподіваних наслідків. Зміни в API одного мікросервісу можуть спричинити каскадні відмови в усій системі. Collina та інші [3] безпосередньо адресують цю проблему, пропонуючи алгоритм оцінки ризику змін у мікросервісній архітектурі, при цьому автори наголошують, що кожна модифікація сервісу може спричинити відмову всієї системи, що робить управління ризиками критично важливим.

У літературі виділяють кілька підходів до версіювання API. URL-based версіювання передбачає включення версії в URL, наприклад /api/v1/resource. Header-based версіювання передбачає передачу версії в заголовках HTTP. Media

type версіювання ґрунтується на використанні Content-Type для визначення версії. Кожен із цих підходів має переваги та недоліки, однак систематичні дослідження їх ефективності в різних контекстах залишаються обмеженими.

Проблема крихкості мікросервісних систем тісно пов'язана з управлінням API. Система стає крихкою, коли зміни в одному сервісі непередбачувано впливають на інші, відсутні механізми виявлення та ізоляції відмов, документація API є застарілою або неповною, а також коли відсутні чіткі контракти між сервісами.

Висновки

Проведене дослідження дозволяє сформулювати такі висновки. По-перше, існує системний дефіцит уваги наукової спільноти до проблематики API в контексті мікросервісної архітектури, при цьому кількість публікацій з цієї теми є неспівмірно малою порівняно з загальним обсягом досліджень мікросервісів. По-друге, наявні публікації переважно констатують проблеми, але не пропонують системних методологій їх вирішення, особливо це стосується питань еволюції API та зворотної сумісності. По-третє, API є критичним елементом мікросервісних систем, що вимагає такого ж рівня наукової уваги, як і інші аспекти архітектури. Економічні аспекти, зокрема кошторис підтримки API та витрати на міграцію споживачів, залишаються майже недослідженими.

На підставі виявлених прогалин пропонуються такі напрямки майбутніх досліджень:

- розробка методологій сталого розвитку API, що передбачає системні підходи до управління еволюцією API з урахуванням потреб усіх стейкхолдерів;
- дослідження механізмів зворотної сумісності та аналіз ефективності різних підходів до її забезпечення;
- емпіричні дослідження вартості, спрямовані на кількісну оцінку витрат на підтримку API та міграцію споживачів у промислових умовах;
- дослідження автоматизації виявлення важливих змін, що передбачає розробку інструментів та методів для раннього виявлення потенційних проблем сумісності;
- стандартизація підходів та формування галузевих стандартів і найкращих практик управління API в мікросервісних системах;
- дослідження людських та організаційних факторів, зокрема вплив організаційної культури та процесів на ефективність управління API.

ЖИТЕПАТҮПА / REFERENCE

1. Stojanov Z., Hristoski I., Stojanov J., Stojanov A. Research Trends and Recommendations for Future Microservices Research. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS. 2024. Vol. 36, issue 1. P. 105–130. DOI: 10.15514/ISPRAS-2024-36(1)-7.
2. Lercher A. Managing API Evolution in Microservice Architecture. Proceedings of the 2024 IEEE/ACM 46th International Conference on Software Engineering. 2024.
3. Collina M., Maraschi L., Pirini T. Evaluating the Risk of Changes in a Microservices Architecture. arXiv:2309.06238. 2023.
4. Lahtinen S. Light-weight Method for Detecting API Breakages in Microservice Architectures. University of Helsinki. 2022.
5. Yaroshynskiy M., Puchko I., Prymushenko A., Kravtsov H. Investigating the Evolution of Resilient Microservice Architectures: A Compatibility-Driven Version Orchestration Approach. MDPI Digital. 2025.

LACK OF ATTENTION OF THE SCIENTIFIC COMMUNITY TO API PROBLEMS IN THE ERA OF MICROSERVICE ARCHITECTURE

Bohdan Kushnir, Oleksandr Ivanov

Abstract. *This study explores an anomaly in contemporary scientific discourse regarding microservice architecture: the systematic undervaluation of the role of Application Programming Interfaces (APIs) amidst a dominance of publications on cloud computing, artificial intelligence, and other emerging fields. An analysis of publications in leading scientometric databases for the period 2020–2025 reveals a significant imbalance: the volume of research on microservice architecture and related technologies substantially exceeds the number of works dedicated specifically to the management, evolution, and design of software interfaces. The API serves as a pivotal element of microservices; without it, components remain isolated and the system non-functional. The research identifies gaps in the scientific discourse, particularly the insufficient development of methodologies for sustainable API development, issues of backward compatibility, and the management of breaking changes.*

Keywords: *software, microservice architecture, API evolution, backward compatibility.*

CHALLENGES IN THE EFFICIENCY ANALYSIS OF HIGH-TECH LONG-TERM INVESTMENT PROJECTS UNDER MODERN STOCHASTIC ECONOMIC CONDITIONS

Lapkhanov E.O.¹ [ORCID], Kabachenko D.V.² [ORCID]

¹ *Institute of technical mechanics of the National academy of sciences of Ukraine,
Ph.D, Ukraine, State space agency of Ukraine, Ph.D, Ukraine*

² *Dnipro University of Technology, Ph.D., Associated Professor, Ukraine*

Abstract. *The accurate evaluation of investment projects in modern business environments remains a significant challenge. This is driven, on the one hand, by the increasing stochasticity of the economic environment and, on the other hand, by the growing complexity of business projects, which requires more accurate estimation, particularly for long-term operations. Consequently, key parameters of business analysis, such as the discount rate, market supply and demand, and sales volume, require more advanced modeling approaches. Therefore, there is a need for a new paradigm for investment evaluation. The proposed paradigm is based on representing key parameters as continuous functions with stochastic components, while the investment analysis process itself is formulated in terms of ordinary differential equations. The application of this approach enables a more comprehensive assessment of the robustness of investment projects through Monte Carlo simulations with respect to the stochastic properties of the economic environment.*

Keywords: *high-tech long-term investments, business project, discount rate, ordinary differential equations, Furrier series, net present value, profit index, Monte-Carlo tests*

Traditional approaches to investment project evaluation are still largely based on discounted cash flow, net present value, and related deterministic capital-budgeting indicators. However, recent studies increasingly emphasize that such methods are often insufficient under modern uncertainty [1-3], since they treat key inputs as fixed or scenario-based quantities and therefore do not fully reflect the dynamic character of real economic environments [3]. One approach to improving the accuracy of accounting for stochastic factors in mathematical models of financial and economic forecasting is the use of ordinary differential equations (ODEs) with input parameters represented by Fourier series [1, 2] and stochastic processes [4], as well as the application of uncertain differential equations (UDEs) [3]. For example, in

[1], a model was proposed for evaluating key economic indicators, including net present value and the profit index, which are used to assess the efficiency of investment projects. The model is formulated in terms of ordinary differential equations incorporating a time-varying discount rate with periodic components representing political risks, modeled via Fourier series. In turn, the supply and demand coefficients derived from marketing studies, which are used as input parameters in the differential equations [1], are estimated using various regression models based on the least squares method. The developed methodology has demonstrated good performance in forecasting an investment project related to the sale of gasoline electrical generators. However, since supply and demand are represented by regression models, a key limitation is the requirement for sufficiently large datasets on the sales of similar products over a given time period. The availability of sufficiently large statistical datasets from marketing studies is difficult to ensure for new types of products that have recently entered the market, which may impose certain limitations on the methodology [1].

In subsequent studies, ODE-based mathematical models were extended by introducing two types of systems [2]: (1) for forecasting projects with long preparation and development phases and a short implementation phase, and (2) for forecasting projects characterized by time-periodic cash flows [4]. In addition, in [4], a stochastic component modeled as white noise was introduced into the discount rate. Given the incorporation of stochastic parameters into the governing equations, the next step is to employ Monte Carlo methods for repeated statistical simulations.

Considering current trends, probabilistic techniques, particularly Monte Carlo simulation, are widely used in investment appraisal. For example, Pawlak [5] proposed a real-options valuation method based on double Monte Carlo simulation for flexible and multi-stage projects, showing that managerial flexibility and multiple sources of risk can be incorporated more effectively than in static appraisal schemes. Similarly, Tveter et al. [6] demonstrated that Monte Carlo procedures can replace point estimates in cost-benefit analysis with ranges and confidence intervals, which may materially change decision outcomes. In applied project domains, Vilani et al. [7] also combined capital-budgeting techniques, Monte Carlo simulation, and

real-options analysis into an integrated appraisal framework for agricultural investments.

Given the increasing relevance of Monte Carlo methods, additional stochastic components are introduced into the systems of differential equations (1) and (2) as follows:

$$\begin{aligned}\frac{dV}{dt} &= V_{cur}, \\ \frac{dCF}{dt} &= V_{cur} \cdot P \cdot k_n - V_{cur} \cdot CP + CP \cdot V_{cur} \cdot k_\alpha, \\ NPV &= CF \cdot e^{-rt} - I_{oi} \cdot e^{\varphi t}, \\ PI &= \frac{CF \cdot e^{-(r+\varphi)t}}{I_{oi}};\end{aligned}\tag{1}$$

$$\begin{aligned}\frac{dV}{dt} &= V_{cur}, \\ \frac{dCF}{dt} &= V_{cur} \cdot P \cdot k_n - V_{cur} \cdot CP + CP \cdot V_{cur} \cdot k_\alpha, \\ \frac{dPVI}{dt} &= (V_{cur} \cdot P \cdot k_n - V_{cur} \cdot CP + CP \cdot V_{cur} \cdot k_\alpha) \cdot e^{-rt}, \\ NPV &= PVI - I_{oi} \cdot e^{\varphi t}, \\ PI &= PVI / I_{oi} \cdot e^{\varphi t},\end{aligned}\tag{2}$$

where V is the production volume (the quantity of manufactured products) or the volume of services/goods (for non-production sectors and retail trade); V_{cur} is the production rate, units per determined time (day, hour, etc.); CP is the production cost (of goods or services); CF is the cash flow; I_{oi} is the initial investment provided by the investor (or the investment at the beginning of the forecasting period); k_n is the expected sales coefficient for the enterprise over the forecast period, determined using expert evaluation methods; k_α is the depreciation coefficient, determined using expert evaluation methods depending on the characteristics of the equipment, the type of enterprise, and the depreciation calculation method; r is the discount rate incorporating both deterministic and stochastic components; φ is the investor's interest rate; t is the forecasting time, with the integration step.

Considering that stochastic components are incorporated into the discount rate, it can be written as follows:

$$r_k = f_{pol}^{USA}(t) + f_{pol}^{UA}(t) + R_{inf} + R_{bi} + \sigma_r \xi_k,\tag{3}$$

where r_k is the current discount rate value in the k -th Monte-Carlo run; $f_{pol}^{USA}(t)$ and $f_{pol}^{UA}(t)$ are continuous functions of political risks due to president elections in USA and Ukraine that are modeled by Fourier series [1]; $R_{inf} \sim U(a_{inf}, b_{inf})$ denotes the uniform distribution with minimum value of inflation risk a_{inf} and maximum value of inflation risk b_{inf} ; $R_{bi} \sim U(a_{bi}, b_{bi})$ denotes the uniform distribution with minimum value of industry risk coefficient a_{bi} and maximum value of industry risk coefficient b_{bi} ; σ_r is the standard deviation characterizing the intensity of stochastic fluctuations of the discount rate; $\xi_k \sim N(0, 1)$ represents standard Gaussian white noise.

The variables R_{inf} and R_{bi} are drawn once per Monte Carlo realization and kept fixed over time, while $\xi_k \sim N(0, 1)$ is independently sampled at each integration step t_k of the numerical ODE solver for eqs. (1)–(2), thus forming a discrete-time approximation of white noise.

Conclusions

Thus, the ordinary differential equation-based mathematical model has been adapted for Monte Carlo simulations, enabling the incorporation of stochastic components into the investment analysis framework. The proposed approach allows key economic parameters, including the discount rate, inflation, and industry-specific risks, to be represented as random variables and processes. It should be noted that the introduction of stochastic components does not inherently improve the predictive accuracy of the model; rather, it provides a more realistic representation of uncertainty. The primary advantage of the proposed methodology lies in enabling a more rigorous assessment of the robustness and sensitivity of investment projects under uncertain market conditions. The separation of parametric and dynamic uncertainties ensures a consistent and structured modeling framework. Therefore, the developed approach can be effectively used for robust decision-making support in investment project evaluation, particularly in the presence of significant uncertainty.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Kabachenko D., Lapkhanov E. Development and justification of the system methodological approach to assessing the investment business project implementation efficiency under conditions of the external market environment factors impact. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – Vol. 3(123). – No. 3 – P. 6–21. – <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.279621>
2. Lapkhanov E., Kabachenko D. Peculiarities of the net present value and profit index calculations using continuous functions and differential equations models. Traditional and innovative approaches in economics: theory, methodology, practice. – 2024. – P. 547–565. – <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-407-8-25>
3. Jin T., Gong Z., Zhang B., Xiao S., Liu Y. Multi-stage research and development project appraisal under uncertain composite real options. Information Sciences. – 2025. – Vol. 716. – Art. 122252. – <https://doi.org/10.1016/j.ins.2025.122252>
4. Kabachenko D. V. Evaluation of the effectiveness of the implementation of an investment business using a mathematical model of differential equations and continuous functions. Naukovi Perspektivy – 2025. – Vol. 65. – No. 11. – P. 746–762. [https://doi.org/10.52058/2708-7530-2025-11\(65\)-746-762](https://doi.org/10.52058/2708-7530-2025-11(65)-746-762) [in Ukrainian]
5. Pawlak M. Valuation of real options using Monte Carlo simulation. Procedia Computer Science. – 2024. – Vol. 246. – P. 3410–3419. – <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.09.216>
6. Tveter E., Welde M., Odeck J. Accounting for uncertainties in cost-benefit analyses of road projects: A procedure illustrated by real-world projects. Transport Policy. – 2025. – Vol. 170. – P. 137–146. – <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2025.05.012>
7. Vilani L., Zanin A., Lizot M., Trentin M. G., Afonso P., de Lima J. D. A framework for investment and risk assessment of agricultural projects. Journal of Risk and Financial Management. – 2024. – Vol. 17. – No. 9. – Art. 378. – <https://doi.org/10.3390/jrfm17090378>

ПРОБЛЕМИ АНАЛІЗУ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ ДОВГОСТРОКОВИХ ІНВЕСТИЦІЙНИХ ПРОЕКТІВ У СУЧАСНИХ УМОВАХ СТОХАСТИЧНОГО ЕКОНОМІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

Е.О. Лапханов, Д. В. Кабаченко

Анотація. Точна оцінка інвестиційних проєктів у сучасному бізнес-середовищі залишається суттєвою проблемою. Це зумовлено, з одного боку, зростанням стохастичності економічного середовища, а з іншого – підвищенням складності бізнес-проєктів, що потребує більш точного оцінювання, особливо для довгострокових процесів. У зв'язку з цим ключові параметри бізнес-аналізу, такі як ставка дисконтування, ринкові попит і пропозиція, а також обсяги продажів, потребують застосування більш досконалих підходів до моделювання. Тому виникає необхідність у формуванні нової парадигми оцінювання інвестицій. Запропонована парадигма ґрунтується на поданні ключових параметрів у вигляді неперервних функцій зі стохастичними складовими, тоді як сам процес

інвестиційного аналізу формалізується за допомогою звичайних диференціальних рівнянь. Застосування такого підходу дає змогу здійснювати більш повну оцінку робастності інвестиційних проєктів за допомогою методів Монте-Карло з урахуванням стохастичних властивостей економічного середовища.

Ключові слова: високотехнологічні довгострокові інвестиції, бізнес-проєкт, ставка дисконтування, звичайні диференціальні рівняння, ряди Фур'є, чиста приведена вартість, індекс прибутковості, методи Монте-Карло.

АВТОМАТИЗОВАНЕ ВІДНОВЛЕННЯ ПРОДУКЦІЙНИХ ГРАМАТИК НА ОСНОВІ СТРУКТУРНОГО АНАЛІЗУ МАТЕМАТИЧНИХ ФОРМУЛ У ФОРМАТІ LATEX

Андрющенко В.О.¹ [ORCID], Лебеденко А.В.² [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій,
канд. техн. наук, доц., Україна

²Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

Анотація. Досліджено проблему семантико-структурного аналізу математичних виразів у наукових текстах, поданих у форматі LaTeX. Проведено аналіз існуючих підходів у галузі Математичного інформаційного пошуку та виявлено їхні недоліки, пов'язані із залежністю від статичних словників або низькою інтерпретованістю. Запропоновано метод автоматизованого відновлення продукційних граматики на основі принципів конструктивно-продукційного моделювання. Розроблено алгоритм, який здійснює динамічний лексичний аналіз, побудову абстрактного синтаксичного дерева з урахуванням префіксних операторів, а також висхідне згортання дерева для генерації правил. Відмінністю підходу є динамічне виділення термінального носія і сигнатури конструкторів без попередньо заданих шаблонів. Результати є базовим етапом для створення прозорих алгоритмів кластеризації наукових документів на основі їхнього математичного апарату.

Ключові слова: інформаційні технології, програмне забезпечення, конструктивно-продукційне моделювання, формальні граматики, структурний аналіз.

Вступ. Сучасні цифрові бібліотеки містять величезні обсяги документів, насичених математичним апаратом. Проте більшість існуючих систем інформаційного пошуку та обробки природної мови (NLP) стикаються з проблемою «семантичної сліпоти» щодо математичних формул, поданих у форматі LaTeX.

Аналіз останніх досліджень у галузі математичного інформаційного пошуку (MathIR) показує розвиток двох основних напрямків. Перший — використання дерев розташування символів та дерев операторів (наприклад, система Tangent-L [1]). Цей підхід є ефективним, проте він критично залежить

від жорстко заданих, статичних словників LaTeX-команд і не здатний до динамічної адаптації. Другий напрямок — застосування великих мовних моделей, таких як MathBERT [3]. Вони здатні враховувати нелінійний контекст, але функціонують як "чорні скриньки" та не надають математично строгої інтерпретації структурної подібності. З огляду на це, актуальною є задача розробки повністю прозорих структурних методів, що здатні до самостійного виведення правил побудови формул на основі теорії формальних граматик та конструктивно-продукційного моделювання (КПМ) [2].

Метод вирішення. У рамках дослідження розв'язано підзадачу автоматизованого семантико-структурного аналізу математичних виразів, поданих у форматі LaTeX. Головна проблема полягає у неможливості машинного виділення глибокої математичної логіки з "сирого" тексту розмітки без залучення громіздких ручних словників або втрати ієрархічної структури формули. Розроблений підхід вирішує задачу автоматичного відновлення формальної грамматики з коду формул, перетворюючи їх на набір строгих математичних правил.

В основу роботи алгоритму покладено принципи конструктивно-продукційного моделювання (КПМ). Формула розглядається як результат роботи узагальненого конструктора [2]:

$$C = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle \quad (1)$$

де M — носій (елементи формул), Σ — сигнатура операцій (продукційні правила), Λ — інформаційна підтримка. Процес обробки кожної формули здійснюється у три послідовні етапи:

1. *Семантична токенизація*: спочатку текст розбивається на логічні примітиви, зберігаючи пробіли як розділювачі та класифікуючи елементи на змінні (VAR), числа (NUM), диференціали (DIFF) та оператори.
2. *Синтаксичний аналіз (побудова абстрактного синтаксичного дерева)*: Реалізовано механізм "жадібного" поглинання для префіксних операторів. Наприклад, оператор інтеграла рекурсивно сканує вираз до токена диференціала, формуючи єдиний структурний вузол.
3. *Відновлення грамматики*: за допомогою методу висхідного згортання (від листків дерева до кореня) генеруються строгі продукційні правила. При цьому відбувається чітке відокремлення термінального носія (змінні, числа) від

сигнатури конструкторів (суми, дробу, рівняння), після чого локальні правила формул об'єднуються в єдину узагальнену граматику предметної області.

Розглянемо приклад відновлення продукційної граматики у табл. 1:

Таблиця 1

Приклад відновлення продукційної граматики

$y = kx + b$	$a = (b + c)(x + y)$
$EQUATION \rightarrow VAR\ OP\ SUM$ $SUM \rightarrow PRODUCT\ OP\ VAR$ $PRODUCT \rightarrow VAR\ OP\ VAR$ $VAR \rightarrow 'b' \mid 'k' \mid 'x' \mid 'y'$ $OP \rightarrow '*' \mid '+' \mid '='$	$EQUATION \rightarrow VAR\ OP\ PRODUCT$ $PRODUCT \rightarrow PARENS\ OP\ PARENS$ $PARENS \rightarrow '('\ SUM\ ')'$ $SUM \rightarrow VAR\ OP\ VAR$ $VAR \rightarrow 'a' \mid 'b' \mid 'c' \mid 'x' \mid 'y'$ $OP \rightarrow '*' \mid '=' \mid '+' \mid '(' \mid ')'$
Відновлена продукційна граматика $EQUATION \rightarrow VAR\ OP\ SUM \mid VAR\ OP\ PRODUCT$ $SUM \rightarrow PRODUCT\ OP\ VAR \mid VAR\ OP\ VAR$ $PRODUCT \rightarrow VAR\ OP\ VAR$ $PARENS \rightarrow '('\ SUM\ ')'$ $VAR \rightarrow 'a' \mid 'b' \mid 'c' \mid 'k' \mid 'x' \mid 'y'$ $OP \rightarrow '*' \mid '+' \mid '=' \mid '(' \mid ')'$	

Розроблений підхід має дві принципові переваги над існуючими рішеннями у галузі MathIR:

По-перше, на відміну від символічних і деревоподібних методів (наприклад, системи Tangent-L), запропонований метод не потребує наперед заданих, вичерпних статичних словників LaTeX-команд. Алгоритм здатний до динамічної адаптації — він самостійно визначає арність та структуру невідомих функцій на основі синтаксичного контексту (наявності фігурних дужок чи індексів). По-друге, порівняно з сучасними нейромережевими моделями на базі трансформерів (наприклад, MathBERT), розроблений метод є концепцією "білої скриньки". Замість неінтерпретованих векторних вкладень (embeddings), алгоритм видає математично строгий, прозорий та зрозумілий людині набір продукційних правил, що дозволяє не лише групувати наукові документи, але й логічно пояснювати причину їхньої структурної подібності.

Висновки

Розроблено метод автоматизованого відновлення продукційних граматики для математичних формул. На відміну від існуючих підходів (Tangent-L, MathBERT), метод не використовує статичних словників і забезпечує повну

"білу скриньку" інтерпретації результатів. Виділення базового носія та сигнатури конструкторів ідеально узгоджується з теоретичними засадами конструктивно-продукційного моделювання. Отримані множини продукційних правил пропонується використати як ознаковий простір для TF-IDF векторизації з метою високоточної кластеризації наукових документів.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Greiner-Petter R. et al. Discovering Mathematical Objects of Interest – A Study of Mathematical Notations // Proceedings of The Web Conference (WWW '20). ACM, 2020. P. 1445-1456.
2. Shynkarenko V. I., Ilman V. M. Constructive-Synthesizing Structures and Their Grammatical Interpretations. I. Generalized Formal Constructive-Synthesizing Structure // Cybernetics and Systems Analysis. — 2014. — Vol. 50, No. 5. — P. 655–662. DOI: 10.1007/s10559-014-9655-z.
3. Zhong J. et al. MathBERT: A Pre-Trained Model for Mathematical Formula Understanding // arXiv preprint arXiv:2105.00377. 2021. 12 p.

AUTOMATED RECONSTRUCTION OF PRODUCTION GRAMMARS BASED ON STRUCTURAL ANALYSIS OF MATHEMATICAL FORMULAS IN LATEX FORMAT

Vadym Andriushchenko, Anton Lebedenko

Abstract. *The problem of semantic-structural analysis of mathematical expressions in scientific texts presented in LaTeX format is investigated. The analysis of existing approaches in the field of Mathematical Information Retrieval is carried out and their shortcomings associated with dependence on static dictionaries or low interpretability are revealed. A method of automated restoration of production grammars based on the principles of constructive-production modeling is proposed. An algorithm is developed that performs dynamic lexical analysis, construction of an abstract syntactic tree taking into account prefix operators, as well as upward tree folding for rule generation. The difference of the approach is the dynamic selection of the terminal carrier and signatures of constructors without predefined templates. The results are a basic stage for creating transparent algorithms for clustering scientific documents based on their mathematical apparatus.*

Keywords: *information technology, software, structural and production modeling, formal grammars, structural analysis.*

**АЛГОРИТМ BRANCH-CUT-AND-PRICE ДЛЯ ТОЧНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ
ЗАДАЧІ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З ОБМЕЖЕННЯМИ
НА ВАНТАЖОПІДЙОМНІСТЬ**

Ленський М.М.¹ [ORCID], Михальчук Г.Й.² [ORCID]

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, аспірант, Україна

²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,
кандидат фізико-математичних наук, Україна

Анотація. У роботі подано реалізацію алгоритму *branch-cut-and-price* для точного розв'язання задачі маршрутизації транспортних засобів з обмеженнями на вантажопідйомність (*Capacitated Vehicle Routing Problem, CVRP*). Метод поєднує модель розбиття множини (*set partitioning formulation*), стартову евристику на основі алгоритму Кларка-Райта, породження маршрутів із від'ємною зведеною вартістю (*reduced cost*) та округлені ємнісні нерівності (*rounded capacity inequalities*). У межах генерації стовпців алгоритм спочатку намагається знайти нові маршрути швидшим евристичним способом; за певних налаштувань під час такого пошуку застосовується спрощена перевірка того, що маршрут не містить повторних відвідувань клієнтів. Якщо таким способом нових маршрутів не знайдено, алгоритм переходить до точного пошуку маршрутів без повторних відвідувань клієнтів і лише після цього завершує генерацію стовпців. На стандартних екземплярах CVRP розмірності від 16 до 60 вершин включно з депо реалізація алгоритму відтворила відомі оптимуми.

Ключові слова: CVRP, маршрутизація транспортних засобів, *branch-cut-and-price*, генерація стовпців, розбиття множини, комбінаторна оптимізація, цілочисельне програмування, лінійна релаксація, точні та евристичні методи, логістика.

Вступ. Задача маршрутизації транспортних засобів з обмеженнями на вантажопідйомність (*Capacitated Vehicle Routing Problem, CVRP*) є однією з базових задач транспортної логістики та комбінаторної оптимізації [1]. Для її точного розв'язання найбільш результативними вважаються методи, що поєднують модель розбиття множини (*set partitioning formulation*), генерацію стовпців і систему відсічень [2-6]. Практична цінність таких підходів полягає в

тому, що вони дають не лише план маршрутів, а й підтвердження його оптимальності.

Основний матеріал. У запропонованому методі кожний допустимий маршрут розглядається як окрема змінна моделі розбиття множини (set partitioning formulation). Головна задача вимагає, щоб кожного клієнта було включено рівно до одного маршруту, а сумарна кількість обраних маршрутів не перевищувала кількість доступних транспортних засобів. Початковий допустимий розв'язок формується стартовою евристикою на основі алгоритму Кларка-Райта.

На кожній ітерації розв'язується обмежена головна задача, тобто модель з поточним набором уже згенерованих маршрутів, після чого виконується пошук нового маршруту, здатного покращити поточну лінійну релаксацію. Для цього розв'язується підзадача генерації стовпців, у якій шукаються маршрути з від'ємною зведеною вартістю (reduced cost). Після додавання відсічень і обмежень розгалуження у виразі зведеної вартості враховуються також двоїсті оцінки відповідних активних обмежень.

Для прискорення пошуку спочатку використовується евристичний режим підзадачі; за певних налаштувань алгоритму він застосовує спрощену перевірку відсутності повторних відвідувань клієнтів у маршруті. Якщо нових стовпців у цьому режимі не знайдено, перед завершенням генерації стовпців обов'язково виконується точний пошук маршрутів без повторних відвідувань клієнтів. Отже, генерація стовпців завершується лише тоді, коли точно встановлено, що маршрутів без повторних відвідувань клієнтів із від'ємною зведеною вартістю більше не існує.

Округлені ємнісні нерівності (rounded capacity inequalities) [4, 5] посилюють лінійну релаксацію і поліпшують оцінку знизу для цільової функції. Якщо в поточному вузлі дерева пошуку отримано дробовий розв'язок, виконується розгалуження за дугою, тобто за переходом між двома вершинами, сумарне використання якого в обраних маршрутах є нецілим. У цілочисленному розв'язку така дуга або використовується, або не використовується, тобто відповідна величина набуває лише значень 0 або 1. В

одному дочірньому вузлі накладається умова, що ця дуга має використовуватися, а в іншому - що її використання заборонено. Така схема зберігає узгодженість між головною задачею та підзадачею породження маршрутів і забезпечує коректність усієї процедури branch-cut-and-price.

Для експериментальної перевірки використано одинадцять стандартних екземплярів CVRP серії P, що охоплюють діапазон розмірностей від 16 до 60 вершин включно з депо і різну кількість доступних транспортних засобів [7]. Серія тестів має валідаційний характер і призначена для перевірки реалізації алгоритму. Обчислення виконувалися на персональному комп'ютері з процесором AMD Ryzen 5 7600 (6 ядер, 12 потоків) та 32 ГБ оперативної пам'яті. Для кожного екземпляра було виконано по десять послідовних запусків у штатній конфігурації реалізації; час вимірювався як повний час одного завершеного запуску алгоритму, після чого обчислювалося середнє арифметичне. У табл. 1 наведено відомі оптимуми, отримані значення цільової функції та середній час за десять запусків.

Таблиця 1

Результати обчислювального експерименту

Екземпляр	Кількість вершин, включно з депо	Кількість доступних транспортних засобів	Відомий оптимум	Отримане значення	Час, с
P-n16-k8	16	8	450	450	0,31
P-n19-k2	19	2	212	212	1,32
P-n20-k2	20	2	216	216	1,36
P-n21-k2	21	2	211	211	0,91
P-n22-k2	22	2	216	216	1,29
P-n23-k8	23	8	529	529	0,36
P-n40-k5	40	5	458	458	16,13
P-n45-k5	45	5	510	510	107,15
P-n50-k7	50	7	554	554	13,87
P-n50-k10	50	10	696	696	31,86
P-n60-k10	60	10	744	744	72,97

Із табл. 1 видно, що на всіх досліджених екземплярах у всіх десяти запусках отримані значення повністю збігаються з відомими оптимумами. Для задач із 16-23 вершинами включно з депо середній час розв'язання не перевищує 2 с, а для задач із 40-60 вершинами змінюється в межах від 13,87 до

107,15 с. Порівняння наведених у табл. 1 результатів показує, що складність задачі визначається не лише кількістю вершин, а й структурою конкретного екземпляра. Сукупність наведених результатів свідчить про практичну придатність запропонованого методу в розглянутому діапазоні задач малої та середньої розмірності.

Висновки

Подано реалізацію алгоритму branch-cut-and-price для точного розв'язання задачі маршрутизації транспортних засобів з обмеженнями на вантажопідйомність, у якій поєднано модель розбиття множини, генерацію стовпців, округлені ємнісні нерівності та розгалуження за дугами з нецілим сумарним використанням у поточному розв'язку. У поданій реалізації евристичне породження маршрутів використовується лише як прискорювальний етап, тоді як генерація стовпців завершується тільки після точного пошуку маршрутів без повторних відвідувань клієнтів. Обчислювальні експерименти на одинадцяти стандартних екземплярах із 16-60 вершинами включно з депо показали, що реалізація алгоритму у всіх наведених випадках відтворює відомі оптимуми. Отримані результати дають підстави розглядати цей підхід як придатну основу для подальших досліджень точних і гібридних методів маршрутизації в розглянутому діапазоні розмірностей.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Archetti C., Coelho L.C., Speranza M.G., Vansteenwegen P. Beyond fifty years of vehicle routing: Insights into the history and the future. *European Journal of Operational Research*. 2026. Vol. 330, No. 2. P. 355-372. DOI: 10.1016/j.ejor.2025.06.014.
2. Costa L., Contardo C., Desaulniers G. Exact Branch-Price-and-Cut Algorithms for Vehicle Routing. *Transportation Science*. 2019. Vol. 53, No. 4. P. 946-985. DOI: 10.1287/trsc.2018.0878.
3. Feillet D., Dejax P., Gendreau M., Gueguen C. An exact algorithm for the elementary shortest path problem with resource constraints: Application to some vehicle routing problems. *Networks*. 2004. Vol. 44, No. 3. P. 216-229. DOI: 10.1002/net.20033.
4. Fukasawa R., Longo H., Lysgaard J., Poggi de Aragao M., Reis M., Uchoa E., Werneck R.F. Robust Branch-and-Cut-and-Price for the Capacitated Vehicle Routing Problem. *Mathematical Programming*. 2006. Vol. 106, No. 3. P. 491-511. DOI: 10.1007/s10107-005-0644-x.

5. Baldacci R., Christofides N., Mingozzi A. An exact algorithm for the vehicle routing problem based on the set partitioning formulation with additional cuts. *Mathematical Programming*. 2008. Vol. 115, No. 2. P. 351-385. DOI: 10.1007/s10107-007-0178-5.
6. Pecin D., Pessoa A., Poggi M., Uchoa E. Improved branch-cut-and-price for capacitated vehicle routing. *Mathematical Programming Computation*. 2017. Vol. 9, No. 1. P. 61-100. DOI: 10.1007/s12532-016-0108-8.
7. All Instances – CVRPLIB. GALGOS – Algorithms, Optimization and Simulation Group. URL: <https://galgos.inf.puc-rio.br/cvrplib/index.php/en/instances> (date of access: 02.04.2026).

BRANCH-CUT-AND-PRICE ALGORITHM FOR THE EXACT SOLUTION OF THE VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH CAPACITY CONSTRAINTS

Mykhailo Lenskyi, Hanna Mykhalchuk

Abstract. *The paper presents an implementation of a branch-cut-and-price algorithm for the exact solution of the Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP). It combines a set-partitioning formulation, a Clarke-Wright-based initial heuristic, the generation of negative reduced-cost routes, and rounded capacity inequalities. Within the column-generation procedure, the algorithm first attempts to find new routes by a faster heuristic search; under certain algorithm settings, this search uses a simplified check that a route does not revisit customers. If no new routes are found in this way, the algorithm performs an exact search for routes without repeated customer visits before terminating column generation. On standard CVRP instances with 16 to 60 vertices, including the depot, the implementation matched the known optimal values.*

Keywords: *CVRP, vehicle routing, branch-cut-and-price, column generation, set partitioning, combinatorial optimization, integer programming, linear relaxation, exact and heuristic methods, logistics.*

ФОРМУВАННЯ АЛГОРИТМІВ СОРТУВАННЯ ЗАСОБАМИ КОНСТРУКТИВНО-ПРОДУКЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ

Макаров О. В.¹ [ORCID], Шинкаренко В.І.² [ORCID]

¹Український державний університет науки та технологій, аспірант, Україна

²Український державний університет науки та технологій,

д.т.н., професор, Україна

Анотація. Розглянуто підхід до автоматизованого синтезу алгоритмів сортування на основі конструктивно-продукційного моделювання. Описано конструктивну модель хромосоми деревовидної структури, яка кодує алгоритм сортування у вигляді ієрархічної композиції алгоритмічних фрагментів і допоміжних операцій. Представлено систему з трьох взаємопов'язаних конструкторів: конструктора формування хромосоми-дерева, конструктора-трансформера для перетворення деревоподібної хромосоми у лінійну послідовність генів та конструктора-трансформера, що забезпечує генерацію програмного коду алгоритму сортування мовою програмування.

Показано, що використання чотирьох етапів конструктивно-продукційного моделювання – спеціалізації, інтерпретації, конкретизації та реалізації – дозволяє формалізувати процес переходу від абстрактного опису алгоритму до його виконуваної програмної реалізації. Застосування генетичного алгоритму забезпечує еволюційний відбір та оптимізацію алгоритмів сортування за заданими критеріями якості з урахуванням властивостей вхідних даних і обмежень обчислювального середовища.

Запропонований підхід створює умови для структурної адаптації алгоритмів, поєднання базових алгоритмічних примітивів у нові коректні композиції та розширення простору пошуку ефективних алгоритмічних рішень. Отримані результати підтверджують доцільність використання конструктивно-продукційного моделювання як основи для автоматизованого синтезу та оптимізації алгоритмів сортування.

Ключові слова: конструктивно-продукційне моделювання, програмне забезпечення, інформаційні технології, алгоритм, генетичний алгоритм.

Сучасний етап розвитку інтелектуальних інформаційних технологій характеризується стійким зростанням інтересу до задач автоматизованого синтезу алгоритмів [1], зокрема алгоритмів обробки, впорядкування та аналізу

даних. Алгоритми сортування є базовим компонентом багатьох програмних систем, а їх ефективність безпосередньо впливає на продуктивність прикладних і системних рішень. Традиційні підходи [2] до проектування таких алгоритмів здебільшого спираються на аналітичні міркування та евристичний досвід розробника, що істотно обмежує простір пошуку можливих структур алгоритмів і ускладнює виявлення нетривіальних або вузькоспеціалізованих рішень, адаптованих до конкретних класів задач або даних.

У цьому контексті перспективним напрямом є застосування конструктивно-продукційного моделювання [3], яке дозволяє формалізувати процес формування алгоритмів у вигляді послідовного застосування конструктивних правил і продукцій. Такий підхід забезпечує явне представлення структури алгоритму, підтримує модульність та відкриває можливість систематичного перебору альтернативних варіантів побудови. Поєднання конструктивно-продукційного моделювання з методами еволюційних обчислень, зокрема генетичними алгоритмами [4], створює передумови для автоматизованого формування, оцінювання та оптимізації алгоритмів сортування за заданими критеріями якості.

У межах запропонованого підходу алгоритм сортування подається у вигляді хромосоми-дерева [5], яка кодує його логічну та структурну організацію на рівні конструктивних елементів. За допомогою спеціалізованих конструкторів здійснюється перехід від деревоподібного подання до лінійної генетичної форми, придатної для застосування операторів селекції, схрещування та мутації, а також до програмного коду, що може бути безпосередньо виконаний і протестований. Це дозволяє реалізувати замкнений цикл еволюційного синтезу, в межах якого відбувається автоматизований вибір найкращих варіантів алгоритмів сортування відповідно до заданих показників ефективності, таких як швидкодія, кількість порівнянь або адаптивність до характеристик вхідних даних.

Частини існуючих алгоритмів сортування, а також допоміжні операції, подаються у вигляді символів, що відповідають англомовним аббревіатурам (FSS, BSB, QP, SR тощо). У межах конструктивно-продукційного підходу ці

символи інтерпретуються як гени хромосоми генетичного алгоритму та утворюють базовий алфавіт конструктора.

Перший конструктор призначений для формування початкової структурної моделі алгоритму у вигляді хромосоми-дерева. Побудова здійснюється відповідно до заданої системи продукційних правил, що визначають допустимі комбінації генів і порядок їх композиції.

Кожний вузол має початкову і кінцеву послідовності генів. Усі вузли окрім листових мають вказівники на лівий і правий вузли нащадки, що дозволяє відображати ієрархічну структуру алгоритму.

Визначимо спеціалізацію конструктору C_{SA} – моделі формування хромосоми що кодує алгоритм сортування. Для формування конструкцій у вигляді хромосоми у C_{SA} передбачені операції підстановки, часткового та повного виводу. Вивід виконується від початкового нетерміналу, який є початковою формою, ітераційним виконанням операцій часткового виводу. Операція часткового виводу обирає одне з правил з множини Ψ та виконує заміну лівої частини правила на праву у поточній формі та виконує операції над атрибутами. Вона використовує операцію підстановки: саме зміну поточної форми і є частиною операції повного виводу починаючи з початкового нетерміналу і закінчуючи готовою конструкцією.

У процесі формування хромосоми операції підстановки (на основі відповідних відношень підстановки) реалізують додавання терміналів (генів) до вузлів дерева і нових вузлів до дерева

Розглянемо особливості відношень підстановки.

$\beta \xrightarrow{\tau} \gamma \begin{matrix} \nearrow \rho \\ \searrow \delta \end{matrix}$, де β , γ , δ і ρ – деякі послідовності терміналів і нетерміналів.

Відношення надає можливість виконати заміну β на γ у сформованій частині хромосоми, а конкретно у поточному вузлі хромосоми-дерева, якщо в ній є β і атрибут доступності τ дорівнює true. Відношення « $\nearrow$ » і « $\searrow$ » дають можливість додати лівий і правий вузли нащадки до поточного вузла дерева і додати ρ і δ до відповідних вузлів.

Побудована хромосома-дерево є проміжним поданням алгоритму сортування і використовується як основа для подальшого конструктивного перетворення. На наступному етапі за допомогою другого конструктора здійснюється трансляція деревоподібної структури у лінійне генетичне подання.

Визначено C_{CD} – конструктор-трансформер, який реалізує перетворення дерева-хромосоми з закодованими складовими алгоритму сортування у масив (послідовність) генів. Для цього застосовується обхід дерева в глибину (DFS), який забезпечує збереження логічної послідовності виконання алгоритму.

Конструктор C_{CD} містить правила підстановки $\psi_i = (s_{i,1}, s_{i,2}), (g_{i,1}, g_{i,2})$, де відношення $s_{i,1}$ реалізує розбір хромосоми з використанням стеку для збереження проміжних результатів. Відношення $s_{i,2}$ призначене для формування списку генів. Операції виконуються у наступній послідовності: спочатку виконуються операції над атрибутами $g_{i,1}$, потім операції підстановки $s_{i,1}$ та $s_{i,2}$, і в кінці – $g_{i,2}$.

Конструктор формування тексту програм C_{PF} (теж конструктор-трансформер) декодує послідовність генів, що кодує алгоритм сортування, у текст програми на обраній мові програмування. Кожному гену відповідає фрагмент коду, а їх композиція формує функціонально завершений алгоритм сортування. Конструктор забезпечує синтаксичну та семантичну коректність згенерованого коду, зокрема узгодження змінних, індексів, умов переходу та меж оброблюваних підмасивів.

Конструктор перетворює лінійну послідовність генів на текст програми сортування. Виконується послідовне декодування нетерміналів у фрагменти програми на обраній мові програмування. Усі термінали $T^* \in T_{PF}$ мають атрибут $text \downarrow T^*$ – відповідна частина тексту програми яка кодується геном.

У результаті формується не тільки виконуваний алгоритм сортування, який може бути безпосередньо скомпільований або інтерпретований та використаний для експериментального оцінювання. А ще і текстове представлення коду усього файлу реалізації (.cpp). Відповідний заголовковий

файл (.h) не змінюється у залежності від хромосоми і створюється заздалегідь. Він включає оголошення функції сортування що конструюється.

Як метод еволюційного пошуку у просторі конструйованих алгоритмів сортування використовується генетичний алгоритм. Усі програми сортування конструйовані на попередніх етапах використовуються для сортування вхідних даних різної структури (випадкові, майже відсортовані, зворотно відсортовані масиви). Відсоток кращих індивідів популяції, які визначаються за часовими показниками, переходить до наступної популяції. Решта індивідів створюються за допомогою операцій схрещування і конструювання нових індивідів. Оператори схрещування застосовуються до хромосом деревовидної структури з урахуванням конструктивних обмежень, що знижує ймовірність появи некоректних або нефункціональних алгоритмів.

Висновки

Була запропонована конструктивна модель хромосоми деревовидної структури яка кодує алгоритм сортування. Розроблена модель дозволяє явно відобразити ієрархічну організацію алгоритму та взаємозв'язки між його фрагментами, що є принципово важливим для керованого структурного синтезу. Викладена спеціалізація та конкретизація конструктора формування хромосом, конструктора-трансформера який перетворює хромосому на лінійну послідовність генів. А також конструктора-трансформера послідовності генів у текст програми сортування на мові програмування.

При структурній адаптації алгоритмів досягається можливість гнучко перебудовувати їх внутрішню структуру залежно від властивостей вхідних даних, цільових вимог чи обмежень обчислювального середовища. Такий підхід дозволяє поєднувати фундаментальні алгоритмічні фрагменти у нові структури, що зберігають коректність і водночас покращують часові та ресурсні характеристики.

Запропонований підхід забезпечує поєднання базових алгоритмічних примітивів та фрагментів відомих алгоритмів сортування у нові композиційні структури, які зберігають логічну узгодженість і водночас демонструють покращені часові характеристики. Таким чином, конструктивно-продукційне

моделювання виступає ефективним інструментом розширення простору пошуку алгоритмічних рішень.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. J. R. Koza. Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. – MIT Press, 1992. <https://mitpress.mit.edu/9780262111706/genetic-programming/>
2. R. Sedgewick, K. Wayne. Algorithms. – Addison-Wesley, 2011. <https://algs4.cs.princeton.edu/home/>
3. V.I. Shynkarenko, V.M. Ilman. Constructive-Synthesizing Structures and Their Grammatical Interpretations. I. Generalized Formal Constructive-Synthesizing Structure / Cybernetics and Systems Analysis, Volume 50, Issue 5, pp 655-662. <https://doi.org/10.1007/s10559-014-9655-z>
4. M. Mitchell. An Introduction to Genetic Algorithms. – MIT Press, 1998. <https://mitpress.mit.edu/9780262631853/an-introduction-to-genetic-algorithms/>
5. V. Shynkarenko, O. Makarov. Structural Adaptation of Sorting Algorithms Based on Constructive Fragments / 14th International Scientific and Practical Programming Conference, UkrPROG 2024, CEUR Workshop Proceedings. Vol. 3806, pp. 16–29. <https://ceur-ws.org/Vol-3806/>

SORTING ALGORITHMS FORMATION BY MEANS OF CONSTRUCTIVE- SYNTHESIZING MODELING AND GENETIC ALGORITHM

O. Makarov, V. Shynkarenko

Abstract. *An approach to automated synthesis of sorting algorithms based on constructive-synthesizing modeling is considered. A constructive model of a chromosome with a tree-like structure is described, which encodes the sorting algorithm in the form of a hierarchical composition of algorithmic fragments and auxiliary operations. A system of three interconnected constructors is presented: a constructor for forming a chromosome-tree, a constructor-transformer for transforming a tree-like chromosome into a linear sequence of genes, and a constructor-transformer that provides the generation of the sorting algorithm program code written in a programming language.*

It is shown that the use of four stages of constructive-synthesizing modeling – specialization, interpretation, concretization, and implementation – allows formalization of transition from an abstract description of the algorithm to its executable program implementation process. The use of a genetic algorithm provides evolutionary selection and optimization of sorting algorithms according to specified quality criteria, considering the properties of the input data and the limitations of the computing environment.

The proposed approach creates conditions for structural adaptation of algorithms, combination of basic algorithmic primitives into new correct compositions and expansion of the search space for effective algorithmic solutions. The obtained results confirm the feasibility of using constructive-synthesizing modeling as a basis for automated synthesis and optimization of sorting algorithms.

Keywords: *constructive-synthesizing modeling, software, information technology, algorithm, genetic algorithm.*

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ЗАНУРЕННЯ ЧАСТИНОК РЕАГЕНТУ З ГАЗОМ У РОЗПЛАВ ПРИ ІНЖЕКЦІЙНІЙ ПОЗАПІЧНІЙ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ЧАВУНУ

Маначин І.О.¹ [ORCID], Єлісєєв В.І.² [ORCID],

Кисляков В.Г.³ [ORCID], Рибальченко М.О.⁴ [ORCID]

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України,
к.т.н., ст. досл, Україна, Український державний університет науки і технологій,
доцент, Україна

² Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України,
к.ф-м.н., с.н.с., Україна,

³ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, к.т.н., Україна,

³ Український державний університет науки і технологій, доцент, Україна

⁴ Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доц., Україна

Анотація. Технології позапічної інжекційної ковшової десульфурзації чавуну засновані на введенні частинок реагенту в рідкий чавун за допомогою швидкісних газових струменів. Закономірності поведінки та взаємодій двофазних струменів (транспортуючий газ+реагент) з розплавом чавуну складні, оскільки втрачаються індивідуальні динамічні характеристики окремої частинки. Також важливим є питання про співвідношення кількості частинок, що пішли вглиб металу, і частинок, що опинилися у спливаючому пазурі. У цій роботі для оцінки факторів та параметрів занурення частинки реагенту при ковшовій десульфурзації чавуну сформульовано мету роботи - розробити наближену математичну модель з метою оцінки занурення частинок реагенту з газом у розплав чавуну. Наближена математична модель розроблена з урахуванням динамічного характеру процесу, в якій прийняті деякі величини відповідають більшим швидкостям руху

Ключові слова: реагент, частинка, модель, занурення, магній.

Вступ. Процеси позапічної інжекційної ковшової десульфурзації чавуну засновані на введенні частинок реагенту в рідкий чавун за допомогою інжекційних газових струменів [1, 2]. Залежно від виду технології ковшового рафінування чавуну застосовуються такі реагенти як магній, вапно і карбід кальцію.

Постановка задачі. Закономірності поведінки та взаємодій двофазних струменів (транспортуючий газ+реагент) з розплавом чавуну складні, оскільки втрачаються індивідуальні динамічні характеристики окремої частинки. Також залишається незрозумілим, але важливим питання про співвідношення кількості частинок, що пішли вглиб металу, і частинок, що опинилися у спливаючому пузирі. Внаслідок цього, важливим є питання про занурення окремої частки, що летить, у розплав. З гідродинамічної точки зору задачі проникнення тіл у рідину відносяться до класичного типу гідродинамічних задач і актуальні й в наш час. На основі рівнянь гідро- і аеродинаміки, рівнянь Нав'є - Стокса розроблені математичні методи для знаходження динамічних характеристик тіла, що занурюється у рідину з урахуванням каверни, що за ним утворюється [3, 4].

На рис. 1, наведеному з роботи [3], добре видно результати експериментальних та теоретичних досліджень у цьому напрямку. З рис.1 видно, що за тілом, яке падає у воду, утворюється газова порожнина (каверна), яка в міру руху спочатку розширюється, а потім швидко зхлопується. В результаті цього тіло виявляється в рідині разом із газовим пузирем. За наведеним на рис.1 часом слідує, що весь процес практично закінчується за долі секунди. Дослідниками це добре розумілося і раніше, внаслідок чого в інших роботах в основу розгляду завдань про вхід тіл були покладені рівняння руху ідеальної рідини [5, 6], що дають можливість визначати динамічні характеристики руху.

Для оцінки факторів та параметрів занурення частинки реагенту при ковшовій десульфурзації чавуну сформульовано **мету роботи** - розробити наближену математичну модель з метою оцінки занурення частинок реагенту з газом у розплав чавуну.

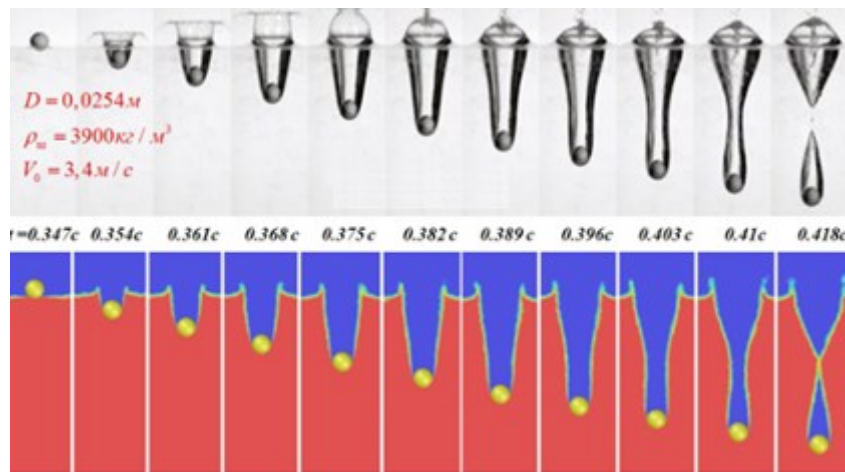


Рисунок 1 - Вхід сталеві кульки у воду [3].

Розробка наближеної математичної моделі. Для оцінки динаміки частинки реагента використовуємо модель ідеальної рідини у найпростішому вигляді. Прийнемо, що кульове тіло нерухоме, а на нього набігає шар рідини, рух квазістаціонарний і тиск вздовж поверхні кулі (реагента), що входить в рідину, підпорядковується закону Лагранжа - Коші [7], тоді:

$$p + \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho (v^2 + w^2) - \rho g x = C, \quad (1)$$

де p – тиск на поверхні тіла; ϕ - потенціал швидкості; ρ - густина рідини; w, v - дотична і нормальна до поверхні тіла складові швидкості, g - прискорення вільно падаючого тіла; x - поздовжня координата, що збігається з напрямком руху тіла; C – постійна інтегрування.

Прийнемо припущення, що потенціал швидкості в даній задачі до точки відриву потоку дорівнює потенціалу, що виникає при обтоці кулі, тоді в сферичних координатах, де r - радіус і θ - кут, що вимірюється від початкової точки, можна записати, як у [7]:

$$\phi = Ur \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{R_{CH}}{r} \right)^3 \right] \cos \theta, \quad (2)$$

де Ur - швидкість умовно потоку, що набігає (швидкість частинки).

Тоді на поверхні кулі маємо:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{3}{2} R_{CH} \frac{dU}{dt} \cos \theta, \quad v = 0, \quad w = -\frac{3}{2} R_{CH} U \cdot \sin \theta, \quad (3)$$

Далі приймемо, що в точці відриву потоку, з якої утворюється каверна, тиск дорівнює тиску над рідиною, наприклад, атмосферному $p = p_A$. Підставляючи ці дані в рівняння (1) і, враховуючи, що $x = R_{CH} \cos \theta$ отримаємо величину постійної C . Потім можна записати:

$$p = p_A + \frac{3}{2} \rho R_{CH} (\cos \theta_* - \cos \theta) \frac{dU}{dt} + \frac{9}{8} \rho U^2 (\sin^2 \theta_* - \sin^2 \theta) - \rho g R_{CH} (\cos \theta_* - \cos \theta) \quad (4)$$

Тепер обчислимо силу тиску рідини за формулою $F_D = 2\pi R_{CH}^2 \int_0^{\theta_*} p \sin \theta \cos \theta d\theta$, яка збігається з напрямом руху рідини. Враховуючи поверхневий натяг, у вигляді сили, прикладеної до окружності тіла в напрямку потоку, що зривається, отримаємо, що

$$F_D = \pi R_{CH}^2 \left[-\rho R_{CH} \frac{dU}{dt} \left(1 + \frac{1}{2} \cos^3 \theta_* - \frac{3}{2} \cos \theta_* \right) + \rho g R_{CH} \frac{2}{3} \left(1 + \frac{1}{2} \cos^3 \theta_* - \frac{3}{2} \cos \theta_* \right) + \right. \\ \left. + \frac{9}{16} \rho U^2 \sin^4 \theta_* + 2 \frac{\sigma}{R_{CH}} \sin \theta_* \cos \theta_* \right] \quad (5)$$

Рівняння руху тіла, що проникає в рідину, тепер можна записати у вигляді

$$(M_{CH} + M_{PR}) \frac{dU}{dt} = F + g M_{CH}, \quad (6)$$

де $M_{PR} = \rho \pi R_{CH}^3 \left(1 + \frac{1}{2} \cos^3 \theta_* - \frac{3}{2} \cos \theta_* \right)$ - приєднана маса,

$$F = \pi R_{CH}^2 \left[\rho g R_{CH} \frac{2}{3} \left(1 + \frac{1}{2} \cos^3 \theta_* - \frac{3}{2} \cos \theta_* \right) + \right. \\ \left. + \frac{9}{16} \rho U^2 \sin^4 \theta_* + 2 \frac{\sigma}{R_{CH}} \sin \theta_* \cos \theta_* \right] - \text{сила опору.}$$

З останнього співвідношення видно, що сила опору великою мірою залежить від кута відриву потоку. При $\theta_* = 0$, природньо, $F = 0$, при $\theta_* = 180$ град сила буде рівною архимедовій виштовхуючій силі $\frac{4}{3} \pi R_{CH}^3 \rho g$. При обтіканні кулі ламінарним потоком нестискуваної рідини кут відриву дорівнює 109.6 град [8], проте, при утворенні каверни за кулястим насадком автори роботи [9] рекомендують приймати $\theta_* = 60-65$ град. Проведемо розрахунки для двох близьких значень кута відриву та порівняємо їх із результатами роботи [3].

Основні результати дослідження. Результати досліджень. Так як час досягнення нульової швидкості частки у цій задачі надзвичайно малий, то,

передбачається, що частка не встигає розплавитися. З рис. 6 слідує, що глибина занурення частки магнію радіусом 0.5 мм за наявності каверни за часткою становить кілька калібрів. Для початкової швидкості частинки 20 м/с розмір каверни складає близько 6 калібрів, а для швидкості 140 м/с – близько 10 калібрів. Ці значення близькі до раніше обчислених величин без утворення каверн [10]. Далі частка починає виштовхуватися силою Архімеда. Таким чином, частинка реагента практично не йде далеко від основної поверхні пузиря, що утворюється струменем газу. Подальші стадії процесу пов'язані, як із дрібномасштабною турбулентністю, що утворюється в результаті коливань кінчика газового струменя, так і від поведінки самого міхура, від його відриву від сопла, спливання та дроблення. У разі застосування магнію найважливішою стороною процесу є його розплавлення, випаровування, а потім завдяки високому парціальному тиску пари [11] порівняно швидке розчинення в масі металу. Це забезпечує досить швидке об'ємне споживання магнію при десульфурації, що основною перевагою технології з його використанням.

Висновки

1. Наближена математична модель розроблена з урахуванням динамічного характеру процесу, в якій прийняті деякі величини відповідають більшим швидкостям руху. Проте, як випливає з розрахунків, швидкості часток швидко падають, що має призводити зміну структури течії, тобто. у разі існування каверни за тілом, значну роль гратимуть капілярні сили. У розробленій моделі вони враховані, але як додатковий чинник. Облік цих сил у повному обсязі досить складний процес, і потребує додаткових досліджень. У нашому випадку ці ефекти, мають слабо проводити представлений результат (глибину проникнення), так як сила Архімеда, яка є досить значною, далі переважатиме над іншими силами. Крім того, крім їхнього процесу ще містить ряд явищ, які можуть істотно впливати на весь процес в цілому.

2. Глибина занурення частки реагенту радіусом 0.5 мм за наявності каверни залежить від швидкості частки. Для початкової швидкості 20 м/с довжина каверни близько 6 калібрів, а для швидкості 140 м/с – близько 10 калібрів.

ЖИТЕПАТҮПА / REFERENCE

1. Shevchenko A.F., Bolshakov V.I., Bashmakov A.M. Tehnologiya i oborudovanie desulfuracii chuguna magniem v bolshegruznyh kovshah: monografiya Kiev: Naukova dumka. 2011. 208s.
2. Shevchenko A.F., Manachin I.A., Vergun A.S., Dvoskin B.V., Kislyakov V.G. Shevchenko S.A., Ostapenko A.V. Vnepechnaya desulfuraciya chuguna v kovshah. Tehnologiya, issledovaniya, analiz, sovershenstvovanie: monografiya Dnepr: Dnipro – VAL. 2017. 252s.
3. Konstantinov S.G. Chislennoe modelirovanie svobodnogo padeniya tverdogo shara v vodu. Trudy MAI. Vyp. № 101. 2018. <https://trudymai.ru/published.php?ID=96562>
4. Tyatyushkina E.S. Issledovanie parametrov kaverny na poverhnosti vody pri padenii tela. Informatika i upravlenie v tehnikeskikh i socialnyh sistemah. Truda NGTU im. R.E. Alekseeva. 2019 №2 (125) C. 79-88
5. Sagomonyan A.Ya. Pronikanie. Moskva: Izd-vo moskovskogo universiteta. 1974. 300s.
6. Logvinovich G.V. Gidrodinamika techenij so svobodnymi granicami. Kiev: Naukova dumka. 1969. 209s.
7. Lojcyanskij L.G. Mehanika zhidkosti i gaza. M.: DROFA. 2003. 840s.
8. Shlihting G. Teoriya pogrannichnogo sloya. M.: Nauka. 1969. 742s.
9. Fedorov S.V., Veldanov V.A. K opredeleniyu kavitacionnoj polosti v vode za dvizhushimsya s vysokoy skorostyu cilindricheskim telom. Zhurnal tehnikeskoj fiziki. 2013. T. 83, Vyp. 2. S. 15 – 20.
10. Shevchenko S.A., Shevchenko A.F., Eliseev V.I. Zakonomernosti vnedreniya chastic magniya v rasplav chuguna pri vduvanii cherez furmu bez isparitelnoj kamery na vyhode. Sb. nauchn. Tr. IChM Fundamentalnye i prikladnye problemy chernoj metallurgii. 2008. Vyp. 17. S. 111 – 115.
11. Voronova N.A. Desulfuraciya chuguna magniem. M.: Metallurgiya. 1980. 239s.

DEVELOPMENT OF A MODEL OF IMMERSION OF REAGENT PARTICLES WITH GAS INTO THE MELTEN DURING INJECTION OUTSIDE-FURNACE DESULFURIZATION OF CAST IRON

Ivan Manachyn, Volodymyr Yelisyeyev, Volodymyr Kysliakov, Mariya Rybalchenko

Abstract. *Technologies of non-furnace injection ladle desulfurization of cast iron are based on the introduction of reagent particles into liquid cast iron using high-speed gas jets. The patterns of behavior and interactions of two-phase jets (transport gas + reagent) with molten cast iron are complex, since the individual dynamic characteristics of an individual particle are lost. Also important is the question of the ratio of the number of particles that have gone deep into the metal and particles that have ended up in a floating bubble. In this work, to assess the factors and parameters of the immersion of a reagent particle in ladle desulfurization of cast iron, the aim of the work is formulated - to develop an approximate mathematical model in order to assess the immersion of reagent particles with gas into molten cast iron. The approximate mathematical model is developed taking into account the dynamic nature of the process, in which some of the values adopted correspond to higher speeds of movement.*

Keywords: *reagent, particle, model, immersion, magnesium*

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ВІЗКІВ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ ДЛЯ МІЖНАРОДНОГО СПОЛУЧЕННЯ

Мямлін С.С. [ORCID]

Український державний університет науки і технологій (УДУНТ),

к.т.н., докторант, Україна

Анотація. Розвиток міжнародного транспортного сполучення на сучасному етапі потребує не тільки поєднання транспортних мереж різних держав, а й забезпечення технічної сумісності рухомого складу. Особливо це актуально для вітчизняного залізничного транспорту, тому що європейські залізниці крім різниці в стандартах колії, потребують для допуску до інфраструктури виконання ще цілої низки технічних вимог. Автором розглянуто можливість удосконалення конструкції двовісного візка типової європейської конструкції Y25 для вітчизняних вантажних вагонів та запропоновано конструктивні рішення, що не тільки дозволяють застосовувати дану конструкцію візка на коліях різної ширини, а й дозволяють суттєво покращити динамічні якості вантажних вагонів з удосконаленою конструкцією візків. Результати роботи мають практичну направленість та пропонуються для застосування в експлуатації на залізничному транспорті.

Ключові слова: залізничний транспорт, вантажний вагон, конструкція візків, ресорне підвішування, математичне моделювання

Одною із основних проблем інтеграції залізничного транспорту України до транспортної мережі залізниць Європейського Союзу є забезпечення технічної сумісності та інтероперабельності рухомого складу. Особливості конструкції рухомого складу в Україні, як і в інших державах мережі залізниць стандарту колії 1520 мм, не дозволяють використовувати його на мережі залізниць стандарту колії 1435 мм без врахування в конструкції вимог технічних специфікацій інтероперабельності для рухомого складу, а саме, для вантажних вагонів. Тому, актуальним є напрямок досліджень, що пов'язаний з удосконаленням конструкції рухомого складу залізниць для забезпечення перевезення вантажів у міждержавному сполученні з урахуванням технічних вимог до рухомого складу для стандартів колії шириною 1520 мм та 1435 мм. В даному дослідженні пропонується розглянути можливість удосконалення

конструкції двовісних візків вантажних вагонів для забезпечення перевезення вантажів за напрямком Україна-Європа.

Конструкторами та дослідниками приділялося багато уваги питанням створення та удосконалення конструкції візків вантажних вагонів для забезпечення вантажних перевезень у міждержавному сполученні [1,2]. В основному пропонувалися конструктивні рішення, що стосуються використання розсувних колісних пар, які дозволяють використовувати рухомий склад на мережі залізниць з різною шириною колії. За участю автора запропоновано деякі варіанти конструктивного виконання колісних пар з розсувними колесами [3]. Також одним із варіантів забезпечення перевезень вантажів між залізницями різних стандартів колії, як відомо, є використання технології зі зміною візків на пунктах стикування залізниць. Але дана технологія потребує накопичення значної кількості візків для обміну на пунктах перетину між залізницями різної ширини колії та значними затримками поїздів при проведенні операцій із заміни візків. Обидві технології мають право на існування та успішно застосовуються на західних кордонах нашої держави, хоча використання рухомого складу з візками, які мають колісні пари з розсувними колесами не набули широкого застосування через значну вартість візків.

В даній роботі пропонується поєднати переваги двох основних напрямків перетину кордону між залізницями різних стандартів колії за рахунок використання конструкції двовісного візка вантажного вагону типу Y25, що є типовою конструкцією для європейської мережі залізниць 1435 мм. При цьому пропонуються наступні варіанти реалізації, а саме: удосконалення конструкції візка Y25 для використання на залізницях стандарту колії 1520 мм та передбачити можливість застосування колісних пар з розсувними колесами. У зв'язку з тим, що на даний час не існує варіанту виконання візку Y25 для колії 1520 мм, то пропонується також і удосконалення системи ресорного підвішування даного типу візку для покращення його динамічних якостей.

Автором запропоновано удосконалену конструкцію двовісного візка вантажного вагону рамного типу, що на відміну від типової конструкції

трьохелементних візків, які містять крупне литво, мають покращені динамічні характеристики. Покращення динаміки вантажних вагонів з візками удосконаленої конструкції досягається завдяки введенню в конструкцію рами візка пружних елементів оригінального технічного виконання. При цьому параметри цих пружних елементів розраховуються, як складові частини загальної системи гасіння коливань вагону, що дозволяє досягнути максимального ефекту. Для обґрунтування технічного виконання обраної конструктивної схеми та параметрів пружних елементів візка Y25 виконано теоретичні дослідження просторових коливань вантажних вагонів у всьому діапазоні експлуатаційних швидкостей до 160 км/год, що значно перевищує існуючий в експлуатації рівень швидкостей для вантажних поїздів. При проведенні теоретичних досліджень автором виконано математичне моделювання просторових коливань вантажних вагонів [4] та застосовано власний програмний комплекс DYNRAIL-PRO [5]. Отримані результати математичного моделювання підтверджують коректність обраних технічних рішень та параметрів пружних елементів удосконаленої конструкції візків вантажних вагонів.

Висновки

Для забезпечення вантажних перевезень у міждержавному сполученні між залізничними мережами з різними стандартами колії 1520 мм та 1435 мм запропоновано удосконалену конструкцію візків типу Y25. Удосконалення стосується використання оригінальних технічних рішень пружних елементів рами візка, що дозволяє значно покращити динамічні якості вантажних вагонів із запропонованими візками.

Автором проведено необхідний комплекс теоретичних досліджень просторових коливань вантажних вагонів з візками удосконаленої конструкції та визначено параметри додаткових пружних елементів і основні динамічні характеристики вантажних вагонів для порожнього і завантаженого режиму у всьому діапазоні експлуатаційних швидкостей. При цьому вдалося збільшити максимальну швидкість руху вантажних вагонів з удосконаленими візками до 160 км/год. Теоретичні дослідження виконувалися за допомогою

математичного моделювання просторових коливань вантажних вагонів та визначення основних показників динаміки та безпеки руху. Результати роботи мають прикладний характер та пропонуються для використання, як на мережі залізниць 1520 мм, так і залізниць стандарту 1435 мм.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Kirpa, H. M. (1998). Orhanizatsiia kontreilernykh perevezen v Ukraini [Organization of piggyback transport in Ukraine]. Dnipropetrovsk: ArtPress. [in Ukrainian]
2. Kurhan, M. B. (2016). Dosvid ekspluatatsii kontreilernykh poizdiv u vnutrishnomu ta mizhnarodnomu spoluchenni [Experience of operating piggyback trains in domestic and international traffic]. Ukrainska Zaliznytsia, (12), 49–54. [in Ukrainian] URL: <http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/9431/1/Kurhan.pdf>.
3. Kolisna para iz zminnym polozhenniam kolis [Wheelset with variable wheel position]. (2018). Patent UA 126489. [in Ukrainian] URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/675152/>
4. Miamlin, S. S. (2020). Matematicheskaya model prostranstvennykh kolebaniy chetyrekhnosnogo poluvagona na telezhkakh s uprugoy svyazu kolesnykh par i bokovykh ram [Mathematical model of spatial vibrations of a four-axle open wagon on bogies with elastic connection of wheelsets and side frames]. Zaliznychnyi Transport Ukrainy, (3), 43–50. [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2020-136-3-43-50>
5. Kompiuterna prohrama "Prohramma modelyrovannya prostranstvennykh kolebanyy zheleznodorozhnykh ekypazhey" [Computer program "Program for modeling spatial vibrations of railway vehicles"]. (2023). Copyright Certificate No. 116761. [in Ukrainian] URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1739217/>

IMPROVEMENT OF THE DESIGN OF FREIGHT CARS BOGIES FOR INTERNATIONAL COMMUNICATION

Serhii Miamlin

Abstract. *The development of international transport connections at the present stage requires not only the combination of transport networks of different states, but also ensuring the technical compatibility of rolling stock. This is especially relevant for domestic railway transport, because European railways, in addition to the difference in track, require a number of technical requirements for admission to the infrastructure. The author considered the possibility of improving the design of a two-axle bogie of a typical European design Y25 for freight cars and proposed design solutions that not only allow this bogie design to be used on tracks of different widths, but also allow significantly improving the dynamic qualities of freight cars with an improved bogie design. The results of the work have a practical focus and are proposed for use in operation on railway transport.*

Keywords: *railway transport, freight car, bogie design, spring suspension, mathematical modeling*

УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РУХУ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК У ПОТОЦІ РІДИНИ

Надригайло Т.Ж.¹ [ORCID], Богданенко О.С.² [ORCID]

¹ Дніпровський державний технічний університет, к.т.н., доцент, Україна

² Дніпровський державний технічний університет, студентка, Україна

Анотація. Рух твердих частинок у потоці рідини є класичною задачею двофазної гідродинаміки.

У роботі розглянуто основні закономірності руху твердих частинок у потоці рідини. Проведено аналіз сил, що діють на частинку, та сформульовано математичну модель руху в рамках підходу Ейлер-Ейлер. Особливу увагу приділено режимам течії, впливу турбулентності та міжфазній взаємодії.

Актуальність теми дослідження полягає в тому, що процеси, пов'язані з рухом частинок, лежать в основі хімічних реакторів, теплообмінних апаратів, систем очищення води й газу. Моделювання переносу зважених частинок необхідне для прогнозування забруднення водойм, оцінки накопичення осаду, аналізу поширення мікропластику. Процеси транспортування твердих частинок важливі при гідротранспорті вугілля і руди, бурінні свердловин, роботі нафтогазових систем. Таким чином, проблема, що розглядається, має широке застосування в гідродинаміці, хімічній технології, екології і енергетиці.

Ключові слова: потік рідини, суспензія, рух твердих частинок, двофазне середовище, масоперенос.

Рух твердих частинок у рідині являє собою складний фізичний процес, обумовлений взаємодією інерційних, в'язких і гравітаційних сил. Такі процеси широко зустрічаються в природніх і інженерних системах: транспорт наносів у річках, пневмо-гідротранспорт, процеси осадження і фільтрації, робота реакторів з псевдозрідженим шаром.

В залежності від концентрації частинок розрізняють:

- розріджені дисперсні системи (одиначні частинки);
- щільні суспензії (взаємодія частинок суттєва);

Складність задачі обумовлена нелінійністю рівнянь руху і різноманітним режимів течії.

Фундаментальна теорія руху частинок у турбулентних потоках представлена у роботі [1]. Монографії [2, 3] містять теорію з багатофазних течій та моделювання. У роботах [4, 5] описані сучасні чисельні методи (DNS, DEM), що використовуються для вирішення задач руху твердих частинок у потоці рідини та газах.

В даній роботі представлено математичну модель руху твердо-рідинного середовища (суспензії). Для моделювання руху твердих частинок у потоці рідини зазначимо наступні припущення:

- взаємодія між частинками не враховується, оскільки їх розміри та маси є незначними в порівнянні з потоком рідини;
- взаємодія частинок на навколишнє середовище (рідину) також ігнорується, оскільки кількість частинок значно менша за кількість рідини в системі;
- розмір і маса частинок вважаються постійними, так само як і густина рідини.

Тобто, маємо два суцільних середовища, де рідина переносить частинки. Кількість цих частинок невелика і вони не розчиняються у рідині. Рух середовища можна зобразити у вигляді наступної системи рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{v}}{dt} = & -\vec{\nabla}p' + v_1(1 + \beta(A + y))\Delta\vec{v} + \\ & + \left(\zeta' + \frac{v_1}{3} + \beta \left(\zeta'y + \frac{v_1}{3}(A + y) \right) \right) \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla}\vec{v}) - \\ & - \beta y \vec{g} - x \nabla^k (\beta \vec{w}_2 w_2^k), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\vec{\nabla}\vec{v} = y(-\vec{\nabla} \cdot (\beta \vec{w}_2) + \Phi), \quad (2)$$

де $\vec{v}$ – барицентрична швидкість середовища в цілому, $p' = p_d/\rho_1^0$ – динамічна складова тиску нормована на густину рідини, $v_1 = \mu_1/\rho_1^0$ – кінематична в'язкість рідини, $\zeta' = \zeta'/\rho_1^0$ – друга в'язкість рідини, $\Phi = J_{12}/\rho_2^0$ – інтенсивність фазових перетворень, $y = 1 - x$, $x = \rho_2^0/\rho_1^0$, A – коефіцієнт моделі в'язкості Ейнштейна, β – об'ємна частка твердої фази, $\vec{g}$ – вектор прискорення вільного падіння, $\vec{w}_2$ – дифузійна швидкість твердої фази.

Враховуючи припущення 3, складова $\Phi = 0$. А враховуючи припущення 2, складовою $x \nabla^k (\beta \vec{w}_2 w_2^k)$ знехтуємо.

Тоді, можемо записати рівняння швидкості руху твердої фази:

$$(C_A + x) \frac{d_2 \vec{v}_2}{dt} = -y \vec{g} + \vec{f}_D - \frac{1}{\beta} x \Phi \vec{v}_2, \quad (3)$$

$$\vec{f}_D = - \left(C_{1D} v_1 \frac{v_{21}}{d^2} + C_{2D} \frac{v_{21}^2}{d} \right) \vec{n}_{21}, \quad (4)$$

де C_A – коефіцієнт приєднаної маси, $\vec{v}_2$ – швидкість руху твердої фази, $\vec{f}_D$ – питома сила опору, $\vec{v}_{21} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$ – відносна швидкість фаз, C_{1D} – лінійний (в'язкий) опір (відповідає закону Стокса), C_{2D} – квадратичний (інерційний) опір, який відповідає закону Ньютона при великих числах Рейнольдса. Для наших припущень маємо: $C_{1D} = 18$, $C_{2D} = 0$.

Припущення для рівняння (1) включає незмінність кількості частинок у вибраному одиничному об'ємі, яке виконується при їх узгодженому колективному русі, якщо це не так, то до рівняння (1) ще додається ефективна дифузійна компонента:

$$\vec{w}_2^d = - \frac{1}{\beta} D \vec{\nabla} \beta. \quad (5)$$

Тоді

$$\vec{v}_2 = \vec{v}_2^c + \vec{w}_2^d, \quad (6)$$

де $\vec{v}_2^c$ – колективна складова швидкості твердої фази, яка задовольняє рівнянню (1). З урахуванням цього, рівняння масопереносу твердої фази матиме вигляд:

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\beta \vec{v}_2^c) = \vec{\nabla} \cdot (D \vec{\nabla} \beta) + \Phi, \quad (7)$$

де D – ефективний коефіцієнт, що описує нерегулярний рух частинок за рахунок турбулентних вихорів.

Турбулентний характер руху враховується двопараметричною моделлю турбулентності, в якості якої виступає алгебраїчний вираз. Для розв'язку рівнянь моделі (1) – (7) використовуємо метод розщеплення за фізичними факторами для несоленоїдалного руху [6].

Висновки

Рух твердих частинок у потоці рідини являє собою фундаментальну задачу механіки суцільних середовищ і багатофазних течій. Сучасні математичні моделі дозволяють враховувати широкий спектр фізичних ефектів, однак

залишаються нерозв'язані проблеми, пов'язані з турбулентністю і взаємодією частинок.

Дана математична модель є удосконаленою версією моделі руху шламу абразивної обробки металу в миючому розчині [7], в якій було використано лагранжевий підхід для опису руху твердих частинок.

Подальший розвиток методів моделювання, включаючи чисельні та експериментальні підходи є перспективним напрямком наукових досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Balachandar, S., & Eaton, J. K. (2010). Turbulent dispersed multiphase flow. Annual Review of Fluid Mechanics, 42, 111–133.
<https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.010908.165243>
2. Crowe, C. T., Schwarzkopf, J. D., Sommerfeld, M., & Tsuji, Y. (2011). Multiphase Flows with Droplets and Particles (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11103>
3. Fox, R. O. (2012). Computational Models for Turbulent Reacting Flows. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139033898>
4. Tenneti, S., Garg, R., & Subramaniam, S. (2011). Drag law for monodisperse gas–solid systems using particle-resolved direct numerical simulation. International Journal of Multiphase Flow, 37(9), 1072–1092. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.05.010>
5. Guo, Y., & Curtis, J. S. (2015). Discrete element method simulations for complex granular flows. Annual Review of Fluid Mechanics, 47, 21–46.
<https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010814-014644>
6. Огурцов А.П., Самохвалов С.Е. Математичне моделювання теплофізичних процесів у багатофазних середовищах. – К.: Наукова думка. – 2001. – 412 с.
7. T. Nadryhailo, V. Vernyhora, A. Korobochka, A. Sasov. Modeling the trajectory of motion of metallic and abrasive particles in a washing gutter / Eastern European Journal of Advanced Technologies. VOL 1, NO 1 (103) (2020) ENGINEERING TECHNOLOGICAL SYSTEMS C. 21-31.

IMPROVEMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE MOTION OF SOLID PARTICLES IN LIQUID FLOW

Tetiana Nadryhailo, Olha Bohdanenko

Abstract. *The motion of solid particles in a fluid flow is a classical problem of two-phase hydrodynamics.*

The paper considers the basic laws of motion of solid particles in a fluid flow. The forces acting on the particle are analyzed and a mathematical model of motion is formulated within the framework of the Euler-Euler approach. Particular attention is paid to flow regimes, the influence of turbulence and interphase interaction.

The relevance of the research topic lies in the fact that processes associated with the motion of particles underlie chemical reactors, heat exchangers, water and gas purification systems. Modeling the transport of suspended particles is necessary for predicting pollution of water bodies, assessing sediment accumulation, and analyzing the distribution of microplastics. The processes of transporting solid particles are important in the hydrotransport of coal and ore, drilling wells, and the operation of oil and gas systems. Thus, the problem under consideration has wide application in hydrodynamics, chemical technology, ecology, and energy.

Keywords: fluid flow, suspension, movement of solid particles, two-phase medium, mass transfer.

REFERENCES

1. Balachandar, S., & Eaton, J. K. (2010). Turbulent dispersed multiphase flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 42, 111–133.
<https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.010908.165243>
2. Crowe, C. T., Schwarzkopf, J. D., Sommerfeld, M., & Tsuji, Y. (2011). *Multiphase Flows with Droplets and Particles* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11103>
3. Fox, R. O. (2012). *Computational Models for Turbulent Reacting Flows*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139033898>
4. Tenneti, S., Garg, R., & Subramaniam, S. (2011). Drag law for monodisperse gas–solid systems using particle-resolved direct numerical simulation. *International Journal of Multiphase Flow*, 37(9), 1072–1092. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.05.010>
5. Guo, Y., & Curtis, J. S. (2015). Discrete element method simulations for complex granular flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 47, 21–46.
<https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010814-014644>
6. Ohurtsov A.P., Samokhvalov S.YE. Matematychnye modelyuvannya teplofizychnykh protse-siv u bahatofaznykh seredovyshchakh. – K.: Naukova dumka. – 2001. – 412 s. [in Ukrainian].
7. T. Nadryhailo, V. Vernyhora, A. Korobochka, A. Sasov. Modeling the trajectory of motion of metallic and abrasive particles in a washing gutter / *Eastern European Journal of Advanced Technologies*. VOL 1, NO 1 (103) (2020) ENGINEERING TECHNOLOGICAL SYSTEMS C. 21-31.

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ДЕМПФЕРА СУХОГО ТЕРТЯ В МЕТАЛОРІЗАЛЬНОМУ ІНСТРУМЕНТІ

Новіцький Ю.Я.¹ [ORCID], Новіцький М.Я.² [ORCID]

¹Національний університет «Львівська політехніка», к.т.н., доцент, Україна.

²Національний університет «Львівська політехніка», аспірант, Україна.

Анотація. Розроблено та досліджено математичну модель чотиримасової автоколивальної системи металорізного верстата. Модель враховує взаємодію основних елементів технологічної системи, зокрема супорта, різця, деталі та шпинделя, а також вплив сил різання на динаміку процесу обробки. Проаналізовано вплив сухого тертя у з'єднаннях конструктивних елементів різця на амплітуду коливань і стабільність роботи системи. Встановлено, що параметри фрикційного з'єднання суттєво впливають на рівень автоколивань та можуть бути ефективно використані для їх гасіння. Чисельне моделювання виконано методом Рунге–Кутта в середовищі Matlab. Показано, що оптимальний вибір сили тертя дозволяє істотно зменшити амплітуду коливань, підвищити якість обробки та довговічність інструмента. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні антивібраційних різальних інструментів.

Ключові слова: автоколивання, конструкційне демпфування, шорсткість поверхні деталі.

Вступ. В машино- та приладобудуванні підвищення продуктивності механічної обробки та якості оброблених поверхонь деталей здійснюється багатьма шляхами. Однак найбільш перспективним шляхом, на сьогоднішній день, є правильне використання динамічних процесів, що відбуваються в пружних замкнутих технологічних системах. Це перш за все відноситься до автоколивальних процесів в металообробних верстатах.

Постановка проблеми. Як відомо, коливання, що виникають в процесі різання, негативно впливають як на якість поверхні деталі, так і на стійкість інструмента та ресурс верстата. Ці коливання поділяють на вимушені коливання та автоколивання. Вимушені коливання збуджуються непостійним характером сил різання (розриви на поверхні оброблення), відцентровими силами (неврівноваженість деталей), періодичними силами, що передаються

як від приводу верстата, так і від інших верстатів. Амплітуду цих коливань легко зменшують відходом від резонансу (змінюючи частоту обертання шпинделя) та віброізоляцією верстатів. Значно гіршою є проблема зменшення амплітуди автоколивань, основною причиною виникнення яких є неоднозначність характеристики сил різання [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існуючі методи зменшення амплітуди автоколивань можна розбити на два класи – технологічні та конструкційні. До технологічних методів слід віднести такі як вибір відповідних режимів різання та кутів заточування інструмента [1;7]. До конструкційних – збільшення опору в коливальній системі та використання динамічних віброгасників [2;4;5], а враховуючи ту обставину, що автоколивання відбуваються в резонансі, де вплив згасання відіграє велике значення, збільшення опору в коливальній системі є не тільки вагомим фактором в зменшенні амплітуди автоколивань, але й фактором можливості їх виникнення взагалі, адже якщо енергія тертя буде більшою від енергії збудження, то автоколивання взагалі не виникатимуть [3].

На рис. 1 зображено конструкційну схему антивібраційного різця Silent Tools фірми Sandvik [5]. Всередині корпусу антивібраційного інструменту розташована демпфувальна система, що має інерційне тіло, виконане з матеріалу з високою щільною масою і закріплене на двох гумових втулках. Вільний внутрішній простір заповнено в'язкою рідиною (оливою) для підсилення ефекту демпфування.



Рис. 1. Антивібраційний різець Silent Tools

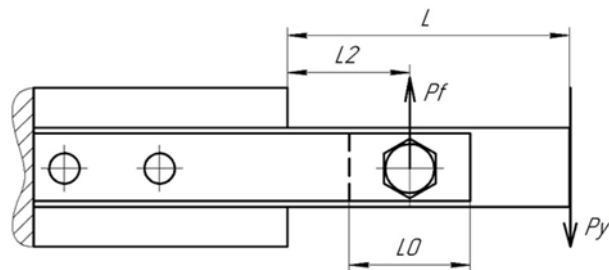


Рис. 2. Антивібраційний різець із силою сухого тертя

Враховуючи той факт, що сила в'язкого тертя пропорційна швидкості коливань, такі різці ефективні на високих значеннях амплітуд або частот.

В даній роботі розглядається демпфер, дія якого ґрунтується на використанні сухого тертя, значення сили тертя якого не залежить від швидкості коливань. Тому він може бути ефективний на малих значеннях амплітуд і частот.

Функціональна та конструкційна схема такого різця представлена на рис. 2 та рис.3.

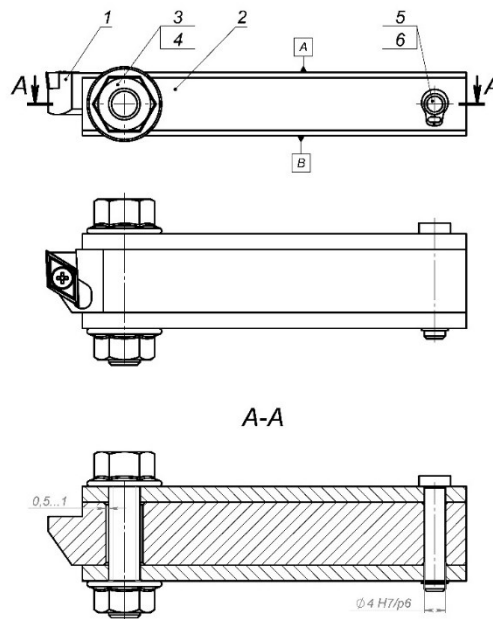


Рис. 3. Конструкція токарного різця із демпфером сухого тертя.

Демпфер складається із двох шліфованих пластин (2), які щільно закріплених в задній частині різця штифтом (5) та стопорним кільцем (6). Пластини (2) із різцем (1) закріплено болтовим з'єднанням (3,4). Між тілом різця і болтом виконано зазор, значенням 0,5 – 1 мм, внаслідок чого різець може переміщуватися у всіх трьох координатах без контакту з болтом. Сила тертя, яка виникає між різцем і пластинами регулюється затягуванням болта та гайки. Різець встановлюється в різцетримач супорта верстата площинами А та В. Висота різця дещо вища за висоту пластин (2 – 3 мм), що виключає контакт пластин із різцетримачем.

Формулювання мети дослідження. Мета досліджень полягає в оцінці можливості використання сил сухого тертя в з'єднаннях елементів системи ВПД для зменшення амплітуди автоколивань.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для дослідження автоколивань в системі ВПД складемо систему диференціальних рівнянь чотиримасової коливальної схеми, яка складається (рис. 4) із супорта, різця, деталі та шпинделя, які з'єднані між собою та станиною верстата пружними зв'язками із демпферами, що відповідає схемі класичного токарного верстата, маса станини якого є значно більшою за масу окремих його вузлів, тому їх коливання розглядатимемо відносно умовно нерухомої станини.

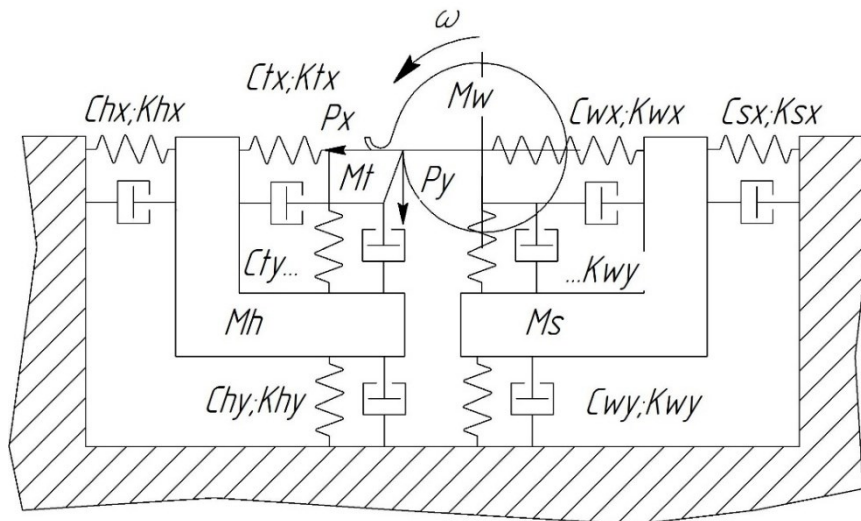


Рис. 4. Розрахункова схема коливальної системи верстата.

Чотиримасова коливальна схема характерна своєю універсальністю, оскільки якщо замінити масу шпинделя на масу стола, а масу супорта на масу шпинделя то це вже буде схема фрезерного верстата, аналогічно можна описати і коливальну схему оброблюваного центра.

Для спрощення, розглянемо коливальну схему тільки в одній координаті, а саме – координаті Y:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y_h}{dt^2} m_h - c_h y_h - k_h \frac{dy_h}{dt} - c_p (y_h - y_t) - k_t \left(\frac{dy_h}{dt} - \frac{dy_t}{dt} \right) - 0.22 P_f &= 0 \\ \frac{d^2 y_t}{dt^2} m_t + c_t (y_h - y_t) + k_t \left(\frac{dy_h}{dt} - \frac{dy_t}{dt} \right) + P_y + 0.22 P_f &= 0 \\ \frac{d^2 y_w}{dt^2} m_w - P_y - c_w (y_w - y_s) - k_w \left(\frac{dy_w}{dt} - \frac{dy_s}{dt} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{d^2 y_s}{dt^2} m_s + c_d (y_w - y_s) + k_w \left(\frac{dy_w}{dt} - \frac{dy_s}{dt} \right) - c_s y_s - k_s \frac{dy_s}{dt} = 0,$$

Вертикальна (тангенціальна) складова сили різання за теорією А. П. Соколов-ського представляється таким чином:

$$P_y = P_0 - r y + a_1 b \frac{\dot{y}}{V} + a_2 b \left(\frac{\dot{y}}{V} \right)^2 - a_3 b \left(\frac{\dot{y}}{V} \right)^3, \quad (2)$$

де P_0 – значення сили різання при відсутності вібрацій (рис. 1), y – відносне зміщення між різцем і деталлю, r – коефіцієнт жорсткості різання, $r = 0.75 \times \frac{P_0}{s}$, s – подача (товщина зрізу), V – швидкість різання. Постійні різання a_1 , a_2 , a_3 – визначаються методом найменших квадратів за експериментальною діаграмою (рис.1).

Знайдемо розв'язки системи диференціальних рівнянь (1) методом Рунге – Кутта в середовищі Matlab для таких значень: $m_t = 8.26 \times 10^{-3}$ кг; $m_w = 0.49$ кг; $m_h = 20$ кг; $m_s = 25$ кг; $c_t = 14.2 \times 10^6$ Н/м; $c_w = 40.8 \times 10^6$ Н/м; $c_s = c_h = 2 \times 10^7$ Н/м. Коеф. згасання визначимо із відомих значень логарифмічних декрементів коливань $\delta_\partial = \delta_p = 0,04$ (для сталі 45); $\delta_c = \delta_{ш} = 0,15$ (із врахуванням наявного конструкційного демпфування в з'єднаннях елементів токарного верстата).

Розв'язки системи диференціальних рівнянь (1) представлені на рис. 5. За браком місця тут представлено лише коливання сили різання

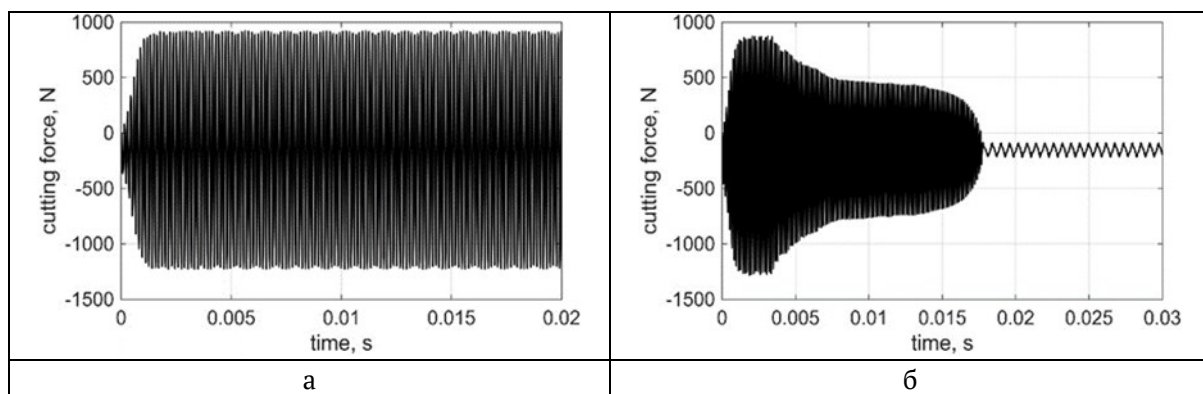


Рис. 5. Коливання сили різання в процесі оброблення деталі
(а – коливання сили різання звичайного різця;
б – коливання сили різання різця із сухим демпфером).

Як видно із рис. 5,а, в системі верстата генеруються коливання високої частоти (6650 Гц), а амплітудні значення сили становлять близько 1000 Н.

Проведені дослідження системи диференційних рівнянь із різними значеннями моменту затягування болта показали, що найменше значення амплітуди коливань (рис. 5,б) спостерігається при значенні моменту затягування болта близько 1,8 Nm, що породжує силу тертя в демпфері 225 N. Приведена до вершини різця сила тертя становить ≈ 50 N.

Висновки.

У роботі розроблено та досліджено математичну модель чотиримасової автоколивальної системи металорізального верстата, що дозволяє адекватно оцінювати динаміку процесу різання. Встановлено суттєвий вплив автоколивань на силові параметри процесу та якість обробки. Обґрунтовано ефективність застосування демпфера сухого тертя для зниження амплітуди коливань за рахунок раціонального вибору параметрів фрикційного з'єднання. Отримані результати можуть бути використані при розробці та вдосконаленні антивібраційних конструкцій різального інструменту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Altintas Y. Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. Second edition / Y. Altintas // Cambridge University Press. – 2012.
2. Altintas. Y. Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping / Y. Altintas, M. Eynian, H. Onozuka - CIRP Annals - Manufacturing Technology 57 (2008) / 371-374.
3. Новіцький Ю.Я., Дмитерко П.Р.. “ Оптимізація параметрів демпфування автоколивань багаточастотної коливальної системи” // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні та приладобудуванні– 2017. – № 867. – с. 51–55.
4. Novitskyi M., Novitskyi Y., Slipchuk A. The possibility of using structural damping in the design of a prefabricated turning cutter to reduce the amplitude of self-oscillations in the process of metal cutting // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. – 2024. – Vol. 9, № 4 (2023). – P. 44–50.
5. Виробничий антивібраційний інструмент. Sandvik Coromant, AB Sandvikens Tryckeri. – AB Sandvik Coromant, 2025.
6. Vnukov Y.M., Djadja S.I., Kuchuhurov M.V., Kondratyuk E.V. The device for self-excited vibrations researching in turning, Ukrainian Patent UA101906. (2015).
7. Stupnytskyy V., Novitskyi Ya., Novitskyi Yu., Xianning S. Comprehensive system for simulation of vibration processes during the titanium alloys machining // Archive of Mechanical Engineering. – 2023. – Vol. 70, iss. 1. – P. 85–105.

PROSPECTS FOR THE USE OF A DRY FRICTION DAMPER IN METAL-CUTTING TOOLS

Yurii Novitskyi, Maksym Novitskyi

Abstract. *This paper presents the development and investigation of a mathematical model of a four-mass self-oscillating system of a metal-cutting machine tool. The model considers the interaction of the main elements of the technological system, namely the carriage, cutting tool, workpiece, and spindle, as well as the influence of cutting forces on the process dynamics. The effect of dry friction in the joints of the tool structural elements on vibration amplitude and system stability is analyzed. It is established that the parameters of the frictional connection significantly affect the level of self-oscillations and can be effectively used for their suppression. Numerical simulation was performed using the Runge–Kutta method in Matlab. The results show that an optimal friction force reduces vibration amplitude, improves machining quality, and increases tool durability. The findings can be applied in the design of anti-vibration cutting tools.*

Keywords: *self-oscillation, structural damping, surface roughness details.*

REFERENCE

1. Altintas Y. Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. Second edition / Y. Altintas // Cambridge University Press. – 2012
2. Altintas. Y. Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping / Y. Altintas, M. Eynian, H. Onozuka - CIRP Annals - Manufacturing Technology 57 (2008) / 371-374
3. Novitskyi Yu. Ya., Dmyterko P. R. “Optymizatsiia parametriv demfuvannia avtokolyvan bahatochastotnoi kolyvalnoi systemy” [“Optimization of parameters of damping of self-oscillations of a multifrequency oscillatory system”] // Visnyk Natsionalnoho universytetu “Lvivska politehnika”. Seriia: Optymizatsiia vyrobnychkh protsesiv i tekhnichniy kontrol u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni.– 2017. – № 867. – pp. 51–55. [In Ukrainian]
4. Novitskyi M., Novitskyi Y., Slipchuk A. The possibility of using structural damping in the design of a prefabricated turning cutter to reduce the amplitude of self-oscillations in the process of metal cutting // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. – 2024. – Vol. 9, № 4 (2023). – P. 44–50.
5. Proyzvodstvennyi antyvibracionnyi instrument. Sandvik Coromant, AB Sandvikens Tryckeri. – AB Sandvik Coromant, 2025.
6. Vnukov Y.M., Djadja S.I., Kuchuhurov M.V., Kondratyuk E.V. The device for self-excited vibrations researching in turning, Ukrainian Patent UA101906. (2015).
7. Stupnytsky V., Novitskyi Ya., Novitskyi Yu., Xianning S. Comprehensive system for simulation of vibration processes during the titanium alloys machining // Archive of Mechanical Engineering. – 2023. – Vol. 70, iss. 1. – P. 85–105.

**ОБРОБКА СИГНАЛІВ ЕЛЕКТРОЕНЦЕФАЛОГРАМ З УРАХУВАННЯМ
ДИПОЛЬНОЇ ПРИРОДИ СИГНАЛІВ МОЗКУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ
МОДЕЛЮВАННЯ NEURAL ODE**

Панасенко Є. С. [ORCID]

Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара, аспірант, Україна

Анотація. Запропоновано підхід до класифікації стану очей (відкриті/закриті) за 64-канальними ЕЕГ-даними на основі декомпозиції незалежних компонент (ICA) з валідацією компонент підбором еквівалентних диполів. Для підбору диполя розроблено оригінальну функцію втрат із $L2$ -регуляризацією та еліпсоїдним анатомічним обмеженням на основі тривимірної моделі мозку. Серед ICA-компонент ідентифіковано джерела з характерними альфа-, мю-, бета- та гамма-ритмами, що підтверджує фізіологічну інтерпретованість методу. Класифікація нейронною мережею досягла точності 97% на навчальній та 90% на тестовій вибірці. Обговорюються перспективи застосування нейронних звичайних диференціальних рівнянь (Neural ODE) для моделювання очищених ICA-сигналів як перспективного напрямку подальших досліджень.

Ключові слова: ЕЕГ, ICA, підбір диполя, класифікація станів мозку, нейронна мережа, Neural ODE, сліпе розділення сигналів, локалізація джерел, NeuroAnalyzer, Julia.

Вступ. Класифікація станів мозкової активності за данх`ими електроенцефалографії (ЕЕГ) є фундаментальною задачею нейронаук та інтерфейсів мозок-комп'ютер. У попередніх роботах [1,2] спектральний аналіз сигналів електродів забезпечив точність класифікації стану очей на рівні 70–80%, а кількісний рекурентний аналіз із класифікатором SVM — до 95% для потиличних електродів. Проте обидва підходи працювали з необробленими сигналами електродів, які є сумішшю багатьох джерел мозку та артефактів, що обмежує точність і фізіологічну інтерпретованість. Це мотивує застосування ICA-декомпозиції у поєднанні з підбором еквівалентних диполів для аналізу на рівні джерел, а також дослідження Neural ODE для моделювання динаміки розділених сигналів мозку.

Методи дослідження. Використано датасет EEG Motor Movement/Imagery Dataset, що містить записи 109 учасників. Послідовний алгоритм обробки реалізовано мовою Julia з використанням бібліотеки NeuroAnalyzer.jl: виявлення поганих каналів (методи flat, amp, var), частотна фільтрація (фільтр верхніх частот 2 Гц, фільтр 50 Гц) та ICA-декомпозиція [3]. Модель ICA подає спостережувані сигнали як лінійну суміш незалежних джерел: $x(t)=A \cdot s(t)$, де матриця розділення W відновлює джерела як $s(t)=W \cdot x(t)$. Для валідації компонент виконано підбір еквівалентних диполів за формулою потенціалу [4]:

$$V_i = \frac{p \cdot (r_{e_i} - r_d)}{4\pi\sigma|r_{e_i} - r_d|^3} \quad (1)$$

Розроблено оригінальну функцію втрат, що поєднує залишкову дисперсію, L2-регуляризацию, сферичне обмеження та еліпсоїдне анатомічне обмеження на основі тривимірної сітки мозку.

Експериментальні результати. Аналіз якості датасету показав, що лише 79 з 109 учасників (72%) мали достатню кількість надійних каналів та ICA-компонент з оцінкою диполя вище порогу 85%. Серед відібраних ICA-компонент ідентифіковано джерела з характерними альфа- (≈ 10 Гц, потиличні), му- (сенсомоторні), бета- (13–30 Гц) та гамма-ритмами (>30 Гц), що підтверджує фізіологічну інтерпретованість декомпозиції. Артефактні компоненти, зокрема морганія з фронтально-полярною топографією та оцінкою диполя нижче 85%, було успішно відокремлено та виключено. Нейронна мережа прямого поширення досягла точності 97% на навчальній та 90% на тестовій вибірці. Точність 90% на тестовій вибірці є порівнянною з 95%, досягнутими SVM-класифікатором на основі рекурентного аналізу для електрода O1, при цьому ICA-підхід працює з розділеними джерелами мозку, а не зі змішаними сигналами електродів, забезпечуючи більшу фізіологічну інтерпретованість.

Перспективи Neural ODE для моделювання ICA-сигналів. Перспективним напрямком подальших досліджень є застосування нейронних звичайних диференціальних рівнянь (Neural ODE) для моделювання часової динаміки очищених ICA-сигналів. У нещодавніх роботах Білозьорова та ін. [5] показано,

що сингулярні диференціальні рівняння здатні моделювати коливальні кортикальні процеси, відрізняючи здорову ЕЕГ від епілептичних патернів за фрактальною розмірністю атрактора. Інкін та Білозьоров [6] запропонували гібридну модель Фіцх'ю-Нагумо-Лоренца для моделювання ЕЕГ з оптимізацією параметрів на основі нейронних мереж. Ці підходи, у поєднанні з фреймворком Neural ODE, потенційно можуть бути застосовані до очищених ІСА-компонент, де кожне незалежне джерело представляє фізіологічно інтерпретований сигнал мозку з чітко визначеними спектральними характеристиками. Моделювання таких сигналів за допомогою Neural ODE дозволить описати їхню нелінійну динаміку в рамках безперервного часу, забезпечуючи прогнозування, інтерполяцію та глибше розуміння генеративних процесів, що лежать в основі мозкових ритмів.

Висновки

Дослідження демонструє, що ІСА-декомпозиція з валідацією диполів забезпечує фізіологічно інтерпретований підхід до класифікації стану очей за ЕЕГ, досягаючи точності 90% на тестовій вибірці та 97% на навчальній вибірці з трьох незалежних компонент. Розроблена оригінальна функція втрат з еліпсоїдним анатомічним обмеженням забезпечує надійний підбір диполів у межах об'єму мозку. Подальші дослідження будуть спрямовані на застосування Neural ODE для моделювання часової динаміки очищених ІСА-сигналів, використовуючи встановлений зв'язок між моделями диференціальних рівнянь та осцилюючими процесами ЕЕГ, що може покращити як точність класифікації, так і розуміння динаміки мозкової активності.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Panasenko Ye. S., Belozyorov V. Ye.. THE APPLICATION OF SPECTRAL ANALYSIS OF EEG DATA FOR THE IDENTIFICATION OF OPEN AND CLOSED EYE STATES. System technologies. 2024. Т. 6, № 155, 155. С. 101–115. DOI: 10.34185/1562-9945-6-155-2024-11.
2. Panasenko Ye. S., Belozyorov V.Y. CLASSIFICATION OF EYE STATE BASED ON EEG DATA USING RECURRENCE ANALYSIS. Системні технології. 2025. Т. 3, № 158, 158. С. 58–73. DOI: 10.34185/1562-9945-3-158-2025-07.
3. Hyvärinen A., Oja E. Independent Component Analysis: Algorithms and Applications. Neural Networks. 2000. Т. 13, № 4. С. 411–430. DOI: 10.1016/S0893-6080(00)00026-5.

4. Malmivuo J., Plonsey R. Bioelectromagnetism: Principles and Applications of Bioelectric and Biomagnetic Fields. New York: Oxford University Press, 1995. 512 c. DOI: 10.1093/acprof:oso/9780195058239.001.0001.
5. Belozyorov V.Y., Volkova S.A., Zaytsev V.G. Singular Differential Equations and Their Applications for Modeling Strongly Oscillating Processes. Journal of Optimization, Differential Equations and Their Applications. 2023. T. 31, № 1, 1. C. 22–52. DOI: 10.15421/142302.
6. Inkin O.A., Belozyorov V.E. Hybrid Modeling of Eeg: The Fitzhugh-Nagumo-Lorenz Model. System technologies. 2025. T. 3, № 158. C. 87–95. DOI: 10.34185/1562-9945-3-158-2025-09.

PROCESSING OF ELECTROENCEPHALOGRAM SIGNALS CONSIDERING THE DIPOLE NATURE OF BRAIN SIGNALS AND PROSPECTS OF NEURAL ODE MODELING

Ye. S. Panasenko

Abstract. *This study proposes an approach to eye state classification (open/closed) based on 64-channel EEG data using independent component analysis (ICA) decomposition with component validation through equivalent dipole fitting. An original loss function with L2 regularization and ellipsoidal anatomical constraint based on a three-dimensional brain model was developed for dipole fitting. Among the ICA components, sources with characteristic alpha, mu, beta, and gamma rhythms were identified, confirming the physiological interpretability of the method. Neural network classification achieved 97% accuracy on the training set and 90% on the test set. Additionally, the perspectives of applying Neural Ordinary Differential Equations (Neural ODE) for modeling cleaned ICA signals are discussed as a promising direction for future research.*

Keywords: *EEG, ICA, dipole fitting, brain state classification, neural network, Neural ODE, blind source separation, source localization, NeuroAnalyzer, Julia.*

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КІНЕТИКИ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ЧАВУНУ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ЗАЛІЗА З ГЕМАТИТУ ТВЕРДИМ ВУГЛЕЦЕМ

Пантейков С.П. [ORCID]

Дніпровський державний технічний університет к.т.н., доцент, Україна

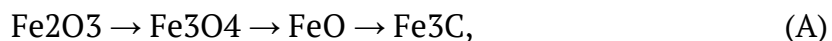
Анотація. У роботі представлено математичну модель кінетики процесу ступінчастого відновлення заліза з поодинокого шматка залізної руди твердим вуглецем. Модель дозволяє досліджувати кінетику як окремих етапів відновлення оксидів і карбїду заліза, так і всього процесу відновлення рідкого чавуну з гематиту з використанням як відновників газу CO та твердого вуглецю C. Передбачена можливість моделювання розмірів шматків гематитової руди і температур процесу, що складається з послідовних етапів непрямого відновлення з гематиту нижчих оксидів заліза (магнетиту і вюститу) та прямого відновлення з вюститу заліза, науглецюваного до стану чавуну.

Ключові слова: магнетит, вюстит, монооксид вуглецю, науглецювання, карбїд заліза, задача Стефана, метод Дюзінбера.

Вступ

За останні роки значно зріс інтерес до технологій одержання заліза безпосередньо з різних залізорудних матеріалів у агрегатах прямого відновлення.

З урахуванням раніше отриманих результатів [1–5] високотемпературна схема процесу ступінчастого відновлення заліза з гематиту при застосуванні у відновній печі як відновників газу CO і твердого вуглецю C набуває вигляду:



при цьому дві перші стадії даного процесу ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ і $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO}$) відбуваються за рахунок газу CO, а остання стадія ($\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$) – за рахунок твердого вуглецю C.

Постановка проблеми

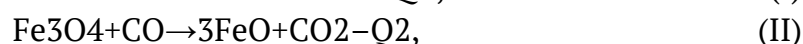
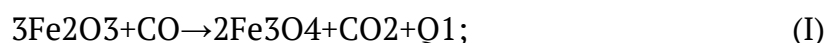
Результати проведених власних термодинамічних досліджень [1–5] свідчать, що всі існуючі математичні моделі, які описують кінетику процесу ізотермічного відновлення заліза (Fe) з гематиту (або магнетиту) газом CO, у тому числі з наступним науглецюванням відновленого заліза, є не зовсім

коректними в силу встановлених наукових фактів [1–5]. Це робить актуальним розробку даної математичної моделі процесу ступінчастого відновлення науглецьованого заліза (Fe_3C) з гематиту (Fe_2O_3), яка передбачає моделювання двох послідовних етапів відновлення магнетиту (Fe_3O_4) з гематиту і вюститу (FeO) з магнетиту газом CO та заключного етапу відновлення з вюститу заліза, науглецьованого до стану чавуну, твердим вуглецем (C).

Основний матеріал

Для математичного опису етапів відновлення вюститу газом CO була вибрана зональна модель відновлення шару FeO на поверхні шматка гематитової руди [6].

На рис. 1 наведено схему ступінчастого процесу ізотермічного відновлення вюститу на поверхні шматка гематиту відновним газом CO за хімічними реакціями:



що є першими двома етапами ступінчастого відновлення карбїду заліза за схемою (А).

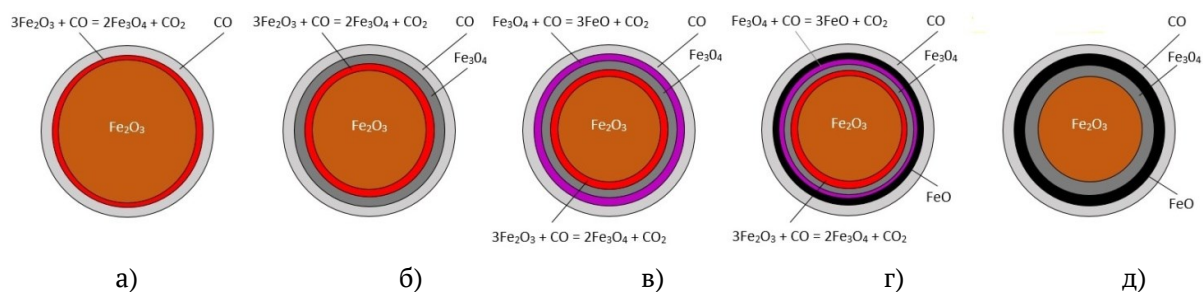


Рисунок 1 – Кінетика ізотермічного відновлення вюститу з гематиту при контакті шматка залізної руди з монооксидом вуглецю

Механізм ступінчастого відновлення вюститу з поодинокого шматка гематиту газом CO складається з наступних послідовно-поєднаних стадій зовнішнього та внутрішнього масопереносу і хімічної взаємодії при перебігу кожної з реакцій (1) і (2):

1. Дифузії газоподібного реагенту–відновника (CO), що надходить з основного газового потоку через газовий дифузійний шар до поверхні шматка руди:

$$J_{\text{газ}} = k_{\text{газ}} \cdot \Delta C_1. \quad (1)$$

Для стаціонарного газового шару:

$$k_{\text{газ}} = \frac{D_{\text{газ}}}{\delta}. \quad (2)$$

2. Дифузії газу–відновника вглиб реакційного шару руди через пори і тріщини у ньому, при цьому на початку першого етапу – це однорідний шматок гематиту, наприкінці першого етапу – шматок гематиту з шаром відновленого магнетиту, ще пізніше – той самий шматок руди з шаром відновленого вюстититу:

$$J_{\text{пор}} = D_{\text{еф}} \cdot \frac{\Delta C_2}{S}. \quad (3)$$

$D_{\text{еф}}$ враховує пористість ε і тортуюзність ξ шматка руди:

$$D_{\text{еф}} = \frac{\varepsilon}{\xi} \cdot D_{\text{чист}}. \quad (4)$$

3. Реакції хімічної взаємодії відновного газу CO з початковим оксидом заліза та адсорбції ним молекул газу–відновника, зародження та зростання твердих фаз оксиду заліза, що відновлюється, утворення оксиду відновника і десорбції його молекул:

$$r = K \cdot (C_{\text{пор}})^n. \quad (5)$$

4. Дифузії газоподібного продукту реакції (CO₂) у зворотному напрямку через пори та тріщини шматка руди до його поверхні (аналогічно формулам (3) і (4)).

5. Дифузії (винос) газу CO₂ через газовий дифузійний шар назад до основного газового потоку (аналогічно формулам (1) і (2)).

Загальний час процесу відновлення визначається сумою тривалостей перебігу окремих послідовних етапів відновлення ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ і $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO}$), тоді як швидкість кожного з них визначається сумарним опором зовнішньої дифузії, внутрішньопористого масопереносу та реакції хімічної взаємодії. Загальна швидкість процесу відновлення вюститу газом CO лімітується найбільш повільним етапом.

У формулах (1)–(5): $J_{\text{газ}}$ і $J_{\text{пор}}$ – потоки молекул CO через газовий шар і у порах шматка руди; $k_{\text{газ}}$ – коефіцієнт масопереносу CO у газовому шарі; ΔC_1 і ΔC_2 – різниці між концентраціями CO: у газовому потоці та на поверхні шматка руди і на поверхні та у порах шматка руди відповідно; $C_{\text{пор}}$ – концентрація CO у порах шматка руди; $D_{\text{газ}}$ – коефіцієнт дифузії CO в газовій суміші; $D_{\text{еф}}$ і $D_{\text{чист}}$ –

ефективний і «чистий» коефіцієнти дифузії CO відповідно в пористому тілі та у газовій суміші; δ і S – товщини газового шару і реакційного шару шматка руди в момент часу τ ; r – швидкість аналізованої хімічної реакції; K – константа швидкості при даній температурі; n – порядок реакції.

Для математичного опису останнього етапу відновлення карбїду заліза з вюстити твердим вуглецем C загального процесу ступінчастого відновлення науглецьованого заліза обрана зональна модель нагрівання шматка гематитової руди у формі кулі і плавлення на його поверхні шару відновленого вюстити [7].

Механізм відновлення Fe_3C з FeO складається з наступних послідовних стадій:

1. Нагрівання і плавлення шару FeO на поверхні шматка залізної руди (рис. 2).

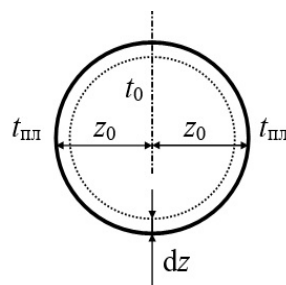
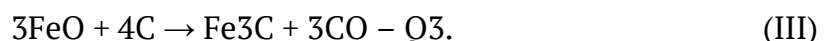


Рисунок 2 – Розрахункова область розподілу температур за радіусом шматка руди

2. Відновлення і науглецьовання заліза з отриманням Fe_3C з розплавленого FeO :



Математичний опис процесу розплавлення шару FeO має наступний вигляд.

Розподіл температур у шматку руди описується рівнянням теплопровідності у сферичних координатах:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right), \quad 0 < x < z(\tau), \quad \tau > 0. \quad (6)$$

$$\text{Початкові умови: } t(x, 0) = t_0, \quad 0 < x < z(0), \quad z(0) = z_0. \quad (7)$$

Граничні умови:

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = 0, \quad \tau > 0; \quad (8)$$

– у період нагрівання зовнішнього шару FeO

$$-\lambda \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=z(\tau)} = \alpha \cdot (t_c - t(z(\tau), \tau)), \quad t(z(\tau), \tau) < t_{пл}; \quad (9)$$

– у період розплавлення шару FeO на поверхні (рухома межа фазового переходу)

$$-\rho \cdot L \cdot \frac{dz(\tau)}{d\tau} = \alpha \cdot (t_c - t(x, \tau)) - \lambda \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=z(\tau)}, \quad t(z(\tau), \tau) = t_{пл}, \quad (10)$$

де c, ρ, λ – теплоємність, щільність і теплопровідність матеріалів шматка руди; t_0, z_0 – початкові температура і радіус шматка руди; $t_c, t_{пл}$ – температури навколишнього середовища і плавлення вюститу; x – координата за радіусом шматка руди; α – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від навколишнього середовища; L – теплота фазового переходу вюститу; τ – час процесу; $dz(\tau)$ – рухома межа фазового переходу.

Умова (10) відображає баланс енергії на межі між твердою рудою та розплавленим шаром FeO.

Після повного розплавлення шару вюститу на поверхні шматка руди модель розпочинає новий цикл розрахунків відновлення FeO з Fe₂O₃ газом CO і Fe₃C з FeO твердим вуглецем C, тобто усі три описані етапи. Цикли повторюються до повного перетворення шматка залізної руди на вюстит з утворенням з нього карбіду заліза.

Математична модель враховує:

– дифузійний, кінетичний та змішаний режими перебігу реакцій (I) і (II), при яких у порах і тріщинах шматка руди швидкості дифузії різні як для CO, так і для CO₂;

– пористості гематиту, магнетиту і вюститу залежно від температури.

Температура плавлення вюститу приймалася за даними діаграми двокомпонентної системи FeO–SiO₂. Ступінь відновлення заліза з FeO залежно від температури процесу бралася за літературними даними. Ступінь науглецювання відновленого заліза визначалася за даними діаграми стану системи Fe–C. Задача Стефана розв’язувалася явною різницевою схемою з використанням методу Duzinberre (Дюзінбера).

Висновки

Розроблена математична модель кінетики процесу ступінчастого відновлення науглецьованого заліза з поодиноким шматком залізної руди

дозволяє досліджувати кінетику як окремих етапів відновлення оксидів і карбиду заліза, так і всього процесу відновлення рідкого чавуну з гематиту з використанням як відновників газу CO та твердого вуглецю C. Передбачена можливість моделювання розмірів шматків гематиту і температур процесу відновлення, який складається з послідовних етапів непрямого відновлення з гематиту нижчих оксидів заліза і прямого відновлення з вюститу науглецьованого до стану чавуну заліза за схемою (А).

ЛІТЕРАТУРА

1. Пантейков С.П. Розрахунок температур перебігу хімічних реакцій процесу ступінчастого відновлення заліза з гематиту газом CO і газифікації твердого вуглецю за існуючими формулами і за стандартними значеннями ентальпії та ентропії речовин. Збірник наукових праць ДДТУ: технічні науки. Кам'янське: ДДТУ. – 2021. Вип. 2(39). С. 16–26. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.39.2021.2>.
2. Пантейков С. П. Розрахунок температур перебігу хімічних реакцій процесу ступінчастого відновлення заліза з гематиту газом CO і газифікації твердого вуглецю за мірами хімічної спорідненості речовин до кисню. International Science Journal of Engineering & Agriculture. – 2022. Vol. 1, No. 2. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20220102.1>.
3. Пантейков С.П. Термодинамічний аналіз процесів відновлення заліза з вюститу твердим вуглецем. Proc. of VII-th International Scientific and Practical Conference “Science, Technology and Global Challenges” (Tokyo, Japan, March 05–07, 2026). Tokyo: CPN Publishing Group. – 2026. P. 203–212. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2026/03/SCIENCE-TECHNOLOGY-AND-GLOBAL-CHALLENGES-5-7.03.26.pdf>.
4. Пантейков С. П. Термодинамічний аналіз умов перебігу хімічних реакцій науглецьовання заліза газом CO при відновленні з вюститу. Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки. Дніпро: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т». – 2024. Вип. 49. Т. 1. С. 175–183. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.1.2024.321243>.
5. Пантейков С.П. Термодинамічний аналіз процесів науглецьовання заліза при його відновленні з вюститу твердим вуглецем. Abstracts of the X-th International Scientific and Practical Conference “Current trends in the development of science and society” (Oslo, Norway, March 10–13, 2026). Oslo: International Science Group. – 2026. P. 184–192. DOI: <https://doi.org/10.46299/ISG.2026.1.10>.
6. Пантейков С. П. Математичне моделювання кінетики ступінчастого процесу непрямого відновлення вюститу з гематиту газом CO. Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології і автоматизація – 2024» (м. Одеса, Україна, 31 жовтня – 1 листопада 2024 р.). Одеса. – 2024. С. 86–88. URL: <https://ontu.edu.ua/itia>.

7. Пантейков С. П. Математичне моделювання кінетики процесів відновлення і науглецювання заліза з вюститу твердим вуглецем. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні – ITMM 2025» (м. Дніпро, Україна, 23, 24 квітня 2025 р.). Дніпро: НметАУ. – 2025. С. 347–354. DOI: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2025.01.061>.

MATHEMATICAL MODEL OF PIG IRON FORMATION KINETICS IN REDUCING IRON FROM HEMATITE USING SOLID CARBON

Sergei Panteikov

Abstract. *This work presents a mathematical model for the stepwise reduction kinetics of iron from a single piece of iron ore with solid carbon. The model makes it possible to investigate the kinetics of both individual stages of iron oxides and iron carbide reduction, as well as the overall process of liquid pig iron production from hematite using carbon monoxide gas and solid carbon as reducing agents. The possibility is provided to simulate the size of hematite ore pieces and the process temperatures, which consist of sequential stages of indirect reduction from hematite to lower iron oxides (magnetite and wüstite) and direct reduction from wüstite to iron carburized to the state of pig iron.*

Keywords: *magnetite, wüstite, carbon monoxide, carburization, iron carbide, Stefan problem, Duzinberre method.*

REFERENCE

1. Panteikov S. P. Rozrakhunok temperatur perebiu khimichnykh reaktsii protsesu stupinchastoho vidnovlennia zaliza z hematytu hazom CO i hazyfikatsii tverdoho vuhletsu za isnuiuchymy formulamy i za standartnymy znachenniamy entalpii ta entropii rehovyn. Zbirnyk naukovykh prats DDTU: tekhnichni nauky, Kamianske, Ukraine: DDTU. – 2021. Vyp. 2(39). S. 16–26. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.39.2021.2> (Ukr.).
2. Panteikov S. P. Rozrakhunok temperatur perebiu khimichnykh reaktsii protsesu stupinchastoho vidnovlennia zaliza z hematytu hazom CO i hazyfikatsii tverdoho vuhletsu za miramy khimichnoi sporidnenosti rehovyn do kysniu. International Science Journal of Engineering & Agriculture. – 2022. Vol. 1. No. 2. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20220102.1> (Ukr.).
3. Panteikov S. P. Termodynamichniy analiz protsesiv vidnovlennia zaliza z viustytu tverdym vuhletsem. Proc. of the VII-th International Scientific and Practical Conference “Science, Technology and Global Challenges” (Tokyo, Japan, March 05–07, 2026). Tokyo: CPN Publishing Group. – 2026. P. 203–212. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2026/03/SCIENCE-TECHNOLOGY-AND-GLOBAL-CHALLENGES-5-7.03.26.pdf> (Ukr.).
4. Panteikov S. P. Termodynamichniy analiz umov perebiu khimichnykh reaktsii navuhletsivannia zaliza hazom CO pry vidnovlenni z viustytu. Visnyk Pryazovskoho

derzhavnoho tekhnichnoho universytetu: zb. nauk. prats. Serii: Tekhnichni nauky, Dnipro, Ukraine: DVNZ «Pryazov. derzh. tekhn. un-t». – 2024. Vyp. 49. T. 1. S. 175–183. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.1.2024.321243> (Ukr.).

5. Panteikov S. P. Termodynamichniy analiz protsesiv navuhletsuvannia zaliza pry yoho vidnovlenni z viustytu tverdyim vuhletsem. Abstracts of the X-th International Scientific and Practical Conference “Current trends in the development of science and society” (Oslo, Norway, March 10–13, 2026). Oslo: International Science Group. – 2026. P. 184–192. DOI: <https://doi.org/10.46299/ISG.2026.1.10> (Ukr.).

6. Panteikov S. P. Matematychni modeliuvannia kinetyky stupinchastoho protsesu nepriamoho vidnovlennia viustytu z hematytu hazom CO. Materialy XVII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Informatsiini tekhnolohii i avtomatyzatsiia – 2024» (m. Odesa, Ukraina, 31 zhovtnia – 1 lystopada 2024 r.). Odesa. – 2024. S. 86–88. URL: <https://ontu.edu.ua/itia> (Ukr.).

7. Panteikov S. P. Matematychni modeliuvannia kinetyky protsesiv vidnovlennia i navuhletsuvannia zaliza z vyustytu tverdyim vuhletsom. Materialy mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi “Informatsiyni tekhnolohiyi v metalurhiyi ta mashynobuduvanni – ITMM 2025” (m. Dnipro, Ukraina, 23–24 kvitnya 2025 r.), Dnipro: NmetAU. – 2025. S. 347–354. DOI: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2025.01.061> (Ukr.).

РОЛЬ JAVASCRIPT INTERFACE У МОДУЛЬНІЙ ОРГАНІЗАЦІЇ ТА РЕНДЕРИНГУ REACT NATIVE

Перемітько М.В.¹ [ORCID], Надригайло Т.Ж.² [ORCID]

¹Дніпровський державний технічний університет, PhD, Україна

²Дніпровський державний технічний університет, к.т.н., доцент, Україна

Анотація. У роботі розглянуто JavaScript Interface (JSI) як базовий механізм нової архітектури React Native та проаналізовано його роль у функціонуванні Turbo Modules і рендерингової підсистеми. Основну увагу зосереджено на принципі роботи JSI як інтерфейсного шару між JavaScript runtime і нативним середовищем, що забезпечує більш цілісну модель виконання та зменшує накладні витрати під час міжрівневої взаємодії. Показано, що Turbo Modules у цій архітектурі реалізують типізовану та відкладену модель підключення нативної функціональності, яка може спиратися як на спільний C++ рівень, так і на платформозалежний код Android та iOS. Також окреслено інфраструктурний вплив JSI на рендеринг у React Native через підвищення узгодженості обміну даними між JavaScript, C++-ядром і нативним представленням інтерфейсу.

Ключові слова. React Native, JavaScript Interface, JSI, Turbo Modules, Fabric, рендеринг, нативні модулі, C++.

У сучасній архітектурі React Native підсистеми JSI, Turbo Modules і Fabric утворюють єдину модель виконання, у якій взаємодія JavaScript коду з платформеним середовищем, життєвий цикл модулів і побудова інтерфейсу розглядаються як взаємопов'язані процеси. У цій моделі JSI виконує роль інтерфейсного шару між JavaScript runtime та нативними абстракціями, Turbo Modules задають структуру й спосіб експонування прикладної функціональності, а Fabric забезпечує нову схему рендерингу. Такий підхід відображає еволюцію React Native у напрямі більш інтегрованої та продуктивної архітектури мобільних застосунків.

З функціонального погляду JSI є C++ орієнтованим інтерфейсом, який забезпечує уніфіковану модель взаємодії між JavaScript середовищем і нативним кодом незалежно від конкретного рушія. Його сутність полягає в інтеграції нативних функцій і об'єктів у єдиний контекст без використання

проміжних механізмів передачі повідомлень. Це дозволяє суттєво зменшити накладні витрати на перетворення даних і скоротити затримки при виконанні операцій. Усунення серіалізації та пряме зв'язування між JavaScript і нативним рівнем є ключовими чинниками зниження затримки та підвищення ефективності виконання [1].

У межах фреймворку JSI функціонує у зв'язці з типізованою моделлю опису нативної функціональності. Turbo Modules базуються на формалізованих специфікаціях, які визначають доступні операції та структури даних, після чого генеруються узгоджені інтерфейси для різних платформ. Такий підхід дозволяє уникнути неузгодженостей між JavaScript і нативною частиною та підвищує надійність взаємодії між шарами системи. Крім того, це відповідає загальній тенденції розвитку React Native, де значна увага приділяється не лише продуктивності, а й формалізації архітектури та зменшенню кількості ручного проміжного коду [2].

Turbo Modules визначають нову модель життєвого циклу нативних модулів, яка базується на принципі відкладеної ініціалізації. Модулі створюються лише в момент їх фактичного використання, що дозволяє зменшити початкове навантаження на систему та оптимізувати використання ресурсів. Така стратегія особливо важлива для великих застосунків, де значна частина функціональності використовується нерівномірно. Подібна організація сприяє зменшенню часу запуску та обсягу використаної пам'яті, що підтверджує ефективність даного підходу [2].

З погляду реалізації Turbo Modules підтримують різні рівні нативної інтеграції. Платформонезалежна логіка може бути реалізована у вигляді спільного C++ ядра, що дозволяє уникнути дублювання коду для різних операційних систем. Водночас функціональність, яка потребує доступу до специфічних можливостей платформи, реалізується на рівні нативного коду Android або iOS. Така багаторівнева модель забезпечує баланс між кросплатформністю та ефективною інтеграцією з платформеними API.

Вплив JSI на рендеринг має інфраструктурний характер і проявляється через взаємодію з новою системою рендерингу Fabric. У цій системі побудова

інтерфейсу здійснюється у вигляді багатofазного процесу, що включає формування структури компонентів, обчислення їхнього стану та застосування змін до нативного представлення. Використання спільного C++ ядра та потокобезпечних структур даних дозволяє виконувати частину цих операцій паралельно, що підвищує ефективність рендерингового конвеєра. У цьому контексті JSI зменшує витрати на взаємодію між JavaScript і C++ рівнем, що опосередковано впливає на швидкість обробки оновлень інтерфейсу та стабільність відображення.

Важливим аспектом є підтримка більш синхронної взаємодії між логікою застосунку та рендерингом, що дозволяє уникати проміжних неконсистентних станів інтерфейсу. Це особливо актуально для складних UI сценаріїв, де зміни в одному компоненті впливають на інші. Завдяки JSI забезпечується швидший обмін даними між рівнями системи, що сприяє більш передбачуваному та стабільному оновленню інтерфейсу.

Емпіричні результати підтверджують ефективність описаної архітектури. Досліджено, що використання нової архітектури React Native призводить до зменшення часу запуску застосунку, зниження використання оперативної пам'яті та скорочення затримки взаємодії між JavaScript і нативним рівнем. Також спостерігається підвищення плавності інтерфейсу, що проявляється у збільшенні частоти кадрів під час взаємодії з UI [3].

Разом із тим, продуктивність React Native застосунків залежить не лише від архітектури взаємодії, а й від вибору JavaScript рушія. Результати порівняння різних рушіїв за такими показниками, як час взаємодії, використання пам'яті, швидкість виконання та продуктивність рендерингу, свідчать, що найбільш ефективні конфігурації досягаються при поєднанні оптимізованого рушія з сучасною архітектурою, заснованою на JSI.

Висновки

Отже, впровадження JavaScript Interface у React Native забезпечило суттєві переваги на рівні архітектури та виконання, зокрема зменшення накладних витрат на взаємодію між JavaScript і нативним кодом, підвищення ефективності модульної системи, оптимізацію використання ресурсів і

створення передумов для більш стабільного рендерингу інтерфейсу. У поєднанні з Turbo Modules і Fabric JSI формує більш цілісну та продуктивну модель роботи фреймворку, тому важливим завданням залишається міграція на нову архітектуру вже існуючих застосунків і бібліотек, оскільки саме вона забезпечує повноцінне використання сучасних можливостей React Native та визначає подальшу технічну актуальність і ефективність екосистеми.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Sayed S. A. N. A. Performance Optimization and Architectural Evolution in React Native Mobile Applications. – 2025. DOI: 10.5281/zenodo.17519381.
2. Garg P., Yadav B., Gupta S., Gupta B. Performance Analysis and Optimization of Cross Platform Application Development Using React Native. – 2023. P. 559–567. DOI: 10.1007/978-981-19-9304-6_51.
3. Kurant L., Bylina J. Impact of Selected JavaScript Engines on the Performance of Mobile Hybrid Applications. Journal of Software: Evolution and Process. – 2026. Vol. 38. DOI: 10.1002/smr.70086.

THE ROLE OF JAVASCRIPT INTERFACE IN THE MODULAR ORGANIZATION AND RENDERING OF REACT NATIVE

Mykhailo Peremitko, Tetiana Nadryhailo

Abstract. *The paper examines the JavaScript Interface (JSI) as a core mechanism of the new React Native architecture and analyzes its role in the operation of Turbo Modules and the rendering subsystem. The main focus is placed on the working principle of JSI as an interface layer between the JavaScript runtime and the native environment, providing a more coherent execution model and reducing overhead in cross-layer interaction. It is shown that Turbo Modules implement a typed and lazily initialized model of native functionality exposure, which may rely on a shared C++ layer as well as platform-specific Android and iOS code. The paper also outlines the infrastructural impact of JSI on rendering in React Native through improved consistency of data exchange between JavaScript, the C++ core, and the native UI representation. The role of JSI is generalized as a key instrument of contemporary architectural organization in React Native.*

Keywords. *React Native, JavaScript Interface, JSI, Turbo Modules, Fabric, rendering, native modules, C++.*

**ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ ДЛЯ
МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ
ВІДНОВЛЕННЯ ТА ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ**

Рудик О.Ю.¹ [ORCID], Харжевський В.О.² [ORCID]

¹Хмельницький національний університет, к.т.н., доцент, Україна

²Хмельницький національний університет, д.т.н., професор, Україна

Анотація. Розглядаються питання підготовки інженерів-механіків в контексті використання у навчальному процесі сучасних систем автоматизованого проєктування та інженерного аналізу, зокрема таких дисциплін, які є базовими для вивчення студентами САПР технологічних процесів відновлення та зміцнення. Зазначено, якщо на бакалавраті спостерігається наступність викладання, то на 1-му курсі магістратури виникають проблеми у зв'язку з відсутністю стандартної САПР ТП зміцнення та відновлення, яку можна було б використовувати у навчальному процесу і яка б використовувалась на підприємствах відновлення та технічного сервісу автомобілів. Тому виникла задача проводити підготовку фахівців, здатних самостійно розробити базу даних для інформаційно-закінченого програмного комплексу з метою вирішення задачі зміцнення та відновлення деталей автомобільного транспорту.

Ключові слова: автоматизоване проєктування, САПР технологічних процесів, MS Access, SQL, SOLIDWORKS, відновлення та зміцнення, інженерний аналіз.

Вступ. Підготовка студентів на факультеті інженерії, транспорту та архітектури Хмельницького національного університету включає використання ряду дисциплін, в рамках яких студенти використовують комп'ютерну техніку та відповідне інженерне програмне забезпечення для розв'язання задач у машинобудуванні. Але якщо на бакалавраті спостерігається наступність викладання дисциплін інженерного циклу з використанням комп'ютерних технологій, то найбільші проблеми виникають на 1-му курсі магістратури у зв'язку з відсутністю офіційної САПР ТП зміцнення та відновлення, яку можна було б придбати для вивчення і яка б використовувалась на підприємствах відновлення та технічного сервісу автомобілів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час всі технологічні САПР, якщо не враховувати програмування для верстатів з числовим

програмним керуванням [1], зводяться до автоматизації оформлення технологічної документації – для прискорення вибору використовуються БД з устаткування, оснастки тощо, застосовуються типові ТП. До числа найефективніших технологій, які дозволяють виконати ці вимоги, належать САПР технологічної підготовки виробництва та інженерного аналізу.

За останні роки CAD/CAM/CAE/PDM-системи пройшли шлях від порівняно простих креслярських додатків до інтегрованих програмних комплексів [2-5], які забезпечують єдину підтримку всього циклу розробки, починаючи від ескізного проєктування і закінчуючи технологічною підготовкою виробництва, іспитами та супроводом. Відповідно, на ринку України є декілька найвідоміших систем, які реалізують цю задачу і забезпечують: ТП обробки деталей, зв'язок з AutoCAD чи іншими CAD-системами, створення архіву конструкторської, технологічної документації, БД ТП тощо.

Автоматичний режим проєктування ТП – кінцева мета в області САПР технологій [6]. Але основною перешкодою до його реалізації є відсутність формалізованого представлення про просторове розташування поверхонь деталі. З плоского креслення, виконаного в конструкторській САПР, у технологію можна передати лише окремі параметри: розміри, допуски, шорсткість, квалітети, але тільки у тому випадку, якщо креслення деталі параметризоване. Тому в автоматичному режимі можна тільки допрацьовувати заздалегідь розроблені типові ТП. Область застосування даного режиму – найпростіші деталі. Крім цього, як правило, такі розробки використовуються тільки на тому підприємстві, для якого вони розроблені, а спроба перенести їх на інші підприємства вимагає великих витрат при адаптації (у кращому випадку буде потрібна зміна інформаційного наповнення системи – таблиць БД, текстових і файлів налаштувань тощо; у гіршому – може виникнути необхідність зміни вихідного коду додатка). Тому вони не дуже широко застосовуються на машинобудівних підприємствах і зовсім не знаходять використання в авторемонтних та підприємствах автосервісу України.

Мета дослідження. При організації навчального процесу поставлена задача підготовки фахівців, здатних самостійно розробити БД для інформаційно-закінченого програмного комплексу з метою вирішення завдання зміцнення та відновлення деталей АТ. Основні функціональні режими такої системи мають відповідати наступним вимогам:

- можливість вибору оптимального методу зміцнення чи відновлення деталі з подальшим вибором оптимального режиму;
- проектування на основі техпроцесу-аналогу;
- формування ТП з окремих блоків;
- об'єднання окремих операцій архівних технологій;
- автоматична доробка типової технології на основі даних, переданих з параметризованого креслення, наприклад, AutoCAD чи іншої САПР;
- введення інформації про ТП у діалоговому режимі.

З цього погляду САПР ТП – це, насамперед, система управління базами даних (СУБД), оскільки основна частина роботи з проектування ТП припадає на роботу з даними та при цьому обробляється дуже велика кількість інформації. Від того, як реалізовані функції обробки даних та їхніх логічних взаємозв'язків залежать інші показники системи.

Виклад основного матеріалу дослідження. СУБД є програмним продуктом, що постачається як прикладна програма, яку потрібно встановити на комп'ютер з урахуванням його конфігурації, ресурсів та операційної системи, а також вимог до набору функцій. СУБД є основою створення програм користувача для різних предметних областей, кожна з яких (у даному випадку – ТП зміцнення та відновлення деталей АТ), має свою специфіку організації БД.

Найбільшу популярність серед настільних систем завоювали реляційні СУБД, такі як MySQL, PostgreSQL, Oracle Database, Microsoft SQL Server. MySQL забезпечує зберігання, обробку та керування реляційними даними з використанням SQL (Structured Query Language – мова структурованих запитів), підтримуючи базові транзакції та індексацію. Вона орієнтована на швидку роботу веб-додатків і простоту розгортання. PostgreSQL надає розширені можливості роботи з даними, включаючи складні запити, транзакції та

підтримку різних типів даних (зокрема, JSON). Вона дозволяє розширення функціональності через користувацькі функції, типи та модулі. Oracle Database реалізує високопродуктивне керування великими обсягами даних із підтримкою складних транзакцій і розподілених обчислень. Вона забезпечує розширені механізми безпеки, резервування та масштабування для критично важливих систем. Microsoft SQL Server надає повноцінне середовище для зберігання, обробки та аналізу реляційних даних із використанням SQL і вбудованих інструментів. Вона підтримує інтеграцію даних і розробку звітів у межах платформи Microsoft.

Для забезпечення одночасного доступу до даних багатьох користувачів, які розташованих далеко один від одного і від місця збереження БД, використовуються мережні мультикористувацькі версії СУБД. Спільна робота користувачів у мережах можлива тільки при наявності стандартної мови обробки даних, якою стала SQL – інтерпретована мова, що описує операції (створення, обробка і витяг) над реляційними БД. Вона є найуживанішою мовою управління БД у системах клієнт/сервер. Основна її перевага – розробка запитів у будь-якій системі управління даними, сумісною з SQL. На сьогоднішній день SQL підтримують більше ста СУБД, які працюють як на персональних комп'ютерах (ПК), так і на великих електронно-обчислювальних машинах. SQL – це легка для розуміння мова й, у той же час, універсальний програмний засіб управління даними. Використання конкретного SQL-сервера залежить від постановки задачі, кількості користувачів і вимог замовника.

Настільна реляційна СУБД MS Access входить до складу пакету Microsoft Office та орієнтована на невеликі БД. Вона поєднує засоби створення таблиць, форм, запитів і звітів із простим графічним інтерфейсом, що не потребує глибоких знань програмування. У системі MS Access передбачена автоматична генерація коду SQL при створенні запиту користувачем, інтегрованість з іншими програмами пакета MS Office тощо. Тому саме систему MS Access вибрано для початкового створення БД зміцнення та відновлення деталей АТ.

Таким чином, ми готуємо студентів не тільки як користувачів уже готових САПР, а даємо їм можливість самим розробляти, нехай і нескладні, але

закінчені БД. Ті ж студенти, хто захоплюється програмуванням, у додатковий час в рамках самостійної роботи вирішують більш серйозні задачі автоматизації конструкторського і технологічного проектування.

Результати. Усі студенти виконують самостійну роботу зі створення інформаційно-програмних продуктів для розв'язання нескладних технологічних задач. Обов'язковою вимогою до цих розробок є їх ретельна алгоритмічна проробка, створення інфологічної й даталогічної моделей БД, супровід довідковими матеріалами і докладне документування. Весь процес освоєння інструментальних засобів займає дев'ять двогодинних занять у лабораторії під керівництвом викладача. Далі робота виконується студентами самостійно, відповідно до індивідуальних завдань. Розглянемо самостійну роботу студента на прикладі розподільного валу, яка полягає у наступному:

- конструювання та розробка геометричної моделі розподільного валу у САПР SOLIDWORKS для автомобіля Toyota Corolla 12 з метою визначення характерних параметрів відновлення;

- вибір способу зміцнення розподільного валу (розробка БД з використанням СУБД Access і мови SQL – створення таблиць, форм, запитів);

- проведення лінійної та поліноміальної регресії (апроксимація даних) методом найменших квадратів даних зносостійкості розподільного валу (MathCAD).

- визначення оптимального режиму зміцнення розподільного валу;

- аналіз розрахунків напруженого стану розподільного валу.

Робота над подібною самостійною роботою знайомить студентів не лише з рішенням локальних задач автоматизованого проектування, але й дозволяє познайомитись з питаннями комплексної автоматизації виробництва.

Висновки. В роботі розглянуто питання використання у навчальному процесі сучасних систем автоматизованого проектування та інженерного аналізу, які є базовими для вивчення студентами САПР технологічних процесів відновлення та зміцнення. Наведена методика підготовки фахівців, здатних самостійно розробити бази даних для інформаційно-закінченого програмного комплексу з метою вирішення задачі зміцнення та відновлення деталей автомобільного транспорту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Литвиненко, О. А., Бойко, Ю. І., Яновський, В. А. (2020) CAD-CAM технології проектування та виготовлення деталей на верстатах з ЧПК, Технічна інженерія, 1 (85), с. 15–22.
2. Варшав'як, Г.Б., Гребеніков, О.Г., Гуменний, А.М., Гребеніков, В.А. (2023). Досвід впровадження систем CAD/CAM/CAE/PLM в навчально-науково-виробничому центрі Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – Вип. 97, Харків: ХАІ, с. 164–194. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2023.97.11>
3. Піонткевич, О.В., Лозінський, Д.О., Сердюк, О.В., Савуляк, В.В. (2024). Забезпечення результатів вивчення CAD/CAE/CAM систем для підготовки фахівців із спеціальності «Прикладна механіка». Сучасна освіта – доступність, якість, визнання, ДДМА, с. 247–252.
4. Артюх, О.М., Дударенко, О.В., Кузьмін, В.В. та ін. (2021). Основи САПР в автомобілебудуванні: навч. посіб. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка». 168 с.
5. Гречаний О.М., Васильченко Т.О., Власов А.О., Івахненко О.П., Вернидуб М.В. (2025). Роль САПР у розробці інженерних рішень для металургійної галузі: досвід застосування ANSYS, AutoCAD, SOLIDWORKS та MATLAB. Системні технології, 3 (158), с. 10–20.
6. Третяк В.В., Сотников В.Д., Худяков С.В., Скорченко І.В. (2020). Проектування технологічних процесів у САПР ТП: навч. посібник до дипломного проектування, Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 80 с.

THE USAGE OF COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS FOR MODELING COMPLEX SYSTEMS AND TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR THE RESTORATION AND REINFORCEMENT OF PARTS

Oleksandr Rudyk, Viacheslav Kharzhevskiy

Abstract. *The article considers questions of preparation of mechanical engineers in the context of using modern Computer-Aided Design and engineering analysis systems in the academic process, particularly in disciplines that are fundamental for students studying automated systems for restoration and strengthening processes. It is noted that while there is continuity in teaching at the bachelor's degree level, problems arise in the first year of the master's program due to the lack of a standard automated computer system for strengthening and restoration processes that could be used in the academic process and applied at automotive restoration and technical service enterprises. Therefore, the problem has arisen to train specialists capable of independently developing a database for a fully-featured software package aimed at solving the problem of strengthening and restoring of automotive parts.*

Keywords: *computer-aided design, SOLIDWORKS, automated design of technological processes, MS Access, SQL, SOLIDWORKS, repair and reinforcement, engineering analysis.*

REFERENCE

1. Lytvynenko, O.A., Boiko, Yu I., Yanovskyi, V.A. (2020). CAD-CAM tekhnolohii proektuvannia ta vyhotovlennia detalei na verstatax z ChPK, Tekhnichna inzheneriia, 1 (85), c. 15–22.
2. Varshaviak, H. B., Hrebenikov, O. H., Humennyi, A. M., & Hrebenikov, V. A. (2023). Dosvid vprovadzhennia system CAD/CAM/CAE/PLM v navchalno-naukovo-vyrobnychomu tsentri Natsionalnoho aerokosmichnoho universytetu im. M. Ye. Zhukovskoho “Kharkivskiy aviatsiinyi instytut”. Vidkryti informatsiini ta kompiuterni intehrovani tekhnolohii, (97), c. 164–194.
3. Piontkevych, O.V., Lozinskyi, D.O., Serdiuk, O V., Savuliak, V. V. (2024). Zabezpechennia rezultativ vyvchennia CAD/CAE/CAM system dlia pidhotovky fakhivtsiv iz spetsialnosti “Prykladna mekhanika”. In Suchasna osvita – dostupnist, yakist, vyznannia, DDMA, c. 247–252.
4. Artiukh, O. M., Dudarenko, O. V., Kuzmin, V. V., et al. (2021). Osnovy SAPR v avtomobilebuduvanni: navch. posib. Zaporizhzhia: NU “Zaporizka politekhnika”. 168 c.
5. Hrechanyi, O.M., Vasylenko, T O., Vlasov, A.O., Ivakhnenko, O.P., Vernydub, M.V. (2025). Rol SAPR u rozrobtsi inzhenernykh rishen dlia metalurhiinoi haluzi: dosvid zastosuvannia ANSYS, AutoCAD, SolidWorks ta MATLAB. Systemni tekhnolohii, 3(158), c. 10–20.
6. Tretiak, V.V., Sotnykov, V.D., Khudiakov, S.V., Skorchenko, I.V. (2020). Proektuvannia tekhnolohichnykh protsesiv u SAPR TP: navch. posibnyk do dyplomnoho proektuvannia, Kharkiv: Natsionalnyi aerokosmichnyi universytet im. M.Ye. Zhukovskoho “Kharkivskiy aviatsiinyi instytut”, 80 p.

АНАЛІЗ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ПИЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ВІД КАР'ЄРНИХ РОЗРОБОК

Русакова Т.І. [ORCID]

Дніпровський національний університет імені О. Гончара, д.т.н.,
професор. Україна

Анотація. У роботі проаналізовано динаміку викидів суспендованих твердих частинок $PM_{2.5}$ та PM_{10} , що утворюються внаслідок кар'єрних розробок. На основі статистичних даних досліджено структуру та зміну обсягів пилового забруднення атмосферного повітря у 2020–2023 роках. Встановлено, що пилові частинки є домінуючим компонентом викидів, причому найбільшу частку становлять частинки PM_{10} . Виявлено нерівномірний характер динаміки викидів із піковими значеннями у 2021 році та подальшим зниженням у 2022–2023 роках. Обґрунтовано вплив технологічних процесів, метеорологічних умов та організації виробництва на формування пилового навантаження. Показано, що дрібнодисперсні частинки $PM_{2.5}$ становлять підвищену небезпеку для здоров'я людини через здатність до тривалого перебування в атмосфері та переносу на значні відстані. Отримані результати можуть бути використані для прогнозування рівнів забруднення та розробки ефективних природоохоронних заходів.

Ключові слова: пилове забруднення, кар'єрні розробки, $PM_{2.5}$, PM_{10} , атмосферне повітря, викиди, динаміка, прогнозування

Вступ. Гранітна промисловість належить до відносно стабільних галузей, що обумовлено стійким зростанням попиту з боку будівельного сектору на гірські матеріали, зокрема щебінь, облицювальний камінь і будівельні блоки. Активізація інфраструктурного будівництва та урбанізаційні процеси сприяють подальшому розвитку видобувної діяльності. Водночас технологічні процеси видобутку граніту супроводжуються значними викидами твердих частинок, газоподібних домішок та забруднюючих речовин у атмосферне повітря і водні об'єкти, що формує суттєве антропогенне навантаження на довкілля та створює екологічні ризики [1].

Матеріали дослідження. Основними джерелами пиловиділення в кар'єрах є буріння свердловин, проведення підривних робіт, дроблення та

сортування гірської маси, а також транспортування матеріалу внутрішньокар'єрними дорогами. Утворений пил характеризується значною часткою дрібнодисперсних фракцій, зокрема PM2.5 та PM10, які здатні тривалий час перебувати у зваженому стані та переноситися на значні відстані. Це призводить до погіршення якості атмосферного повітря та підвищує ризики для здоров'я як працівників кар'єрів, так і населення прилеглих територій. За результатами досліджень, у зонах впливу гранітних кар'єрів спостерігається перевищення нормативних концентрацій PM2.5 та PM10, що підтверджує їх негативний вплив на навколишнє середовище [2].

Додатковим фактором екологічного навантаження є використання хімічних речовин у процесах видобутку та обробки гірських порід, що може призводити до забруднення поверхневих і підземних вод. Потрапляння забруднюючих речовин у водні об'єкти викликає деградацію екосистем, зміну гідрохімічних показників та зниження якості води, що безпосередньо впливає на стан здоров'я населення [3].

Вплив дрібнодисперсного пилу є особливо небезпечним через його здатність проникати в глибокі відділи дихальної системи. Наукові дослідження свідчать про зв'язок між тривалим впливом пилових частинок та розвитком захворювань дихальної і серцево-судинної систем, хронічних запальних процесів, а також неврологічних порушень [3]. За даними епідеміологічних досліджень, у працівників кар'єрів і мешканців прилеглих територій спостерігається підвищений рівень захворюваності на респіраторні хвороби, алергічні реакції та інші патологічні стани [2]. Особливо високий рівень ризику характерний для населення, що проживає на відстані до 500 м від кар'єрів, де концентрації пилу є максимальними [4].

Попри значну кількість наукових досліджень, присвячених як технологічним аспектам видобутку, так і оцінюванню екологічного впливу, низка питань залишається недостатньо вивченою. Зокрема, потребують подальшого дослідження закономірності просторового розповсюдження пилових викидів, їх залежність від метеорологічних умов, технологічних параметрів видобутку та характеристик джерел утворення пилу. Крім того,

обмеженою є інтеграція сучасних інформаційних технологій, зокрема методів математичного моделювання, геоінформаційних систем та цифрових інструментів аналізу даних, для комплексного оцінювання та прогнозування впливу забруднення на довкілля і здоров'я населення [5].

Забруднення атмосферного повітря є однією з найбільш гострих екологічних проблем, характерних для кар'єрної промисловості з видобутку граніту та виробництва щебеню. На основі статистичних даних Державної служби статистики України на рисунку 1 наведено структуру викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від діяльності, пов'язаної з кар'єрними розробками та видобуванням корисних копалин (за винятком вугілля) за 2023 рік.

Аналіз представлених даних свідчить, що найбільшу частку у структурі викидів становлять тверді частинки PM10 – 56% (2474,3 т). Значну частку також займають викиди оксиду вуглецю – 21% (937,5 т) та тверді частинки PM2.5 – 11% (501,3 т). Менші обсяги припадають на діоксид азоту – 7% (291,2 т), діоксид сірки – 4% (170,1 т) та неметанові леткі органічні сполуки – 1% (62,9 т).

Аналіз розподілу викидів (рис. 1) підтверджує, що пилові частинки є домінуючим фактором забруднення атмосферного повітря в кар'єрній промисловості. Водночас рівень і характер забруднення залежать від комплексу чинників, серед яких: кліматичні умови регіону, концентрація пилу в повітрі, гранулометричний склад частинок, їх хімічний склад, а також кислотність пилу.

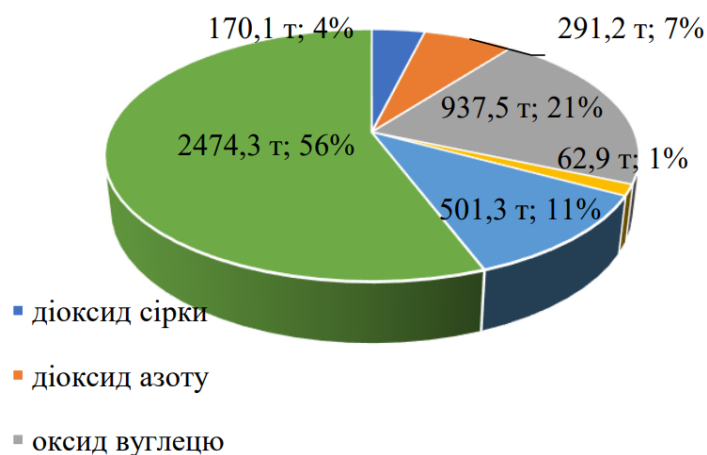


Рисунок 1 – Розподіл викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від кар'єрних розробок у 2023 році

Пилоутворення в кар'єрах відбувається внаслідок вибухових робіт, транспортування матеріалів, вітрової ерозії, руйнування ґрунтового покриву та руху вантажного транспорту. Забруднене повітря не лише створює дискомфорт, але й чинить суттєвий негативний вплив на здоров'я людини, особливо осіб із захворюваннями органів дихання.

У процесах видобутку граніту та виробництва щебеню можна виділити два основні механізми утворення пилу. По-перше, пил генерується безпосередньо під час вибухових і технологічних процесів – дроблення, сортування та обробки гірської маси. Такий пил представлений переважно частинками фракції PM10, які швидко осідають і формують локальні зони забруднення поблизу джерел утворення.

По-друге, значні обсяги осілого пилу можуть повторно підніматися у повітря під дією руху транспорту та вітрових потоків. У цьому випадку пил поширюється на значні відстані, формуючи так звані розподілені джерела забруднення, зокрема вздовж транспортних шляхів. Такі викиди складніше піддаються контролю та мають більш широкий просторовий вплив.

Дрібнодисперсні частинки PM2.5 утворюються у менших обсягах, однак становлять підвищену небезпеку через здатність тривалий час перебувати у повітрі та переноситися на значні відстані повітряними потоками. Чим вища концентрація таких частинок у повітрі, тим більший ризик для здоров'я людини.

Особливу небезпеку становлять частинки PM2.5, які через малі розміри легко проникають у глибокі відділи дихальної системи, потрапляють у кровоносну систему та можуть поширюватися по всьому організму. Завдяки своїм фізичним властивостям вони ефективно долають природні бар'єри організму, що обумовлює їх високий патогенний потенціал. Крім того, ці частинки здатні тривалий час залишатися у повітрі та впливати навіть на населення, яке проживає на значній відстані від джерел викидів.

З огляду на зазначене, питання оцінювання впливу гранітної промисловості як потужного джерела пилового забруднення залишається

актуальним. Не менш важливим є розроблення та впровадження ефективних заходів щодо зниження пилового навантаження на прилеглі території.

На рисунку 2 представлено динаміку зміни обсягів викидів суспендованих твердих частинок розміром 2,5 мкм (PM_{2.5}), що утворюються внаслідок кар'єрних розробок, за період 2020–2023 років.

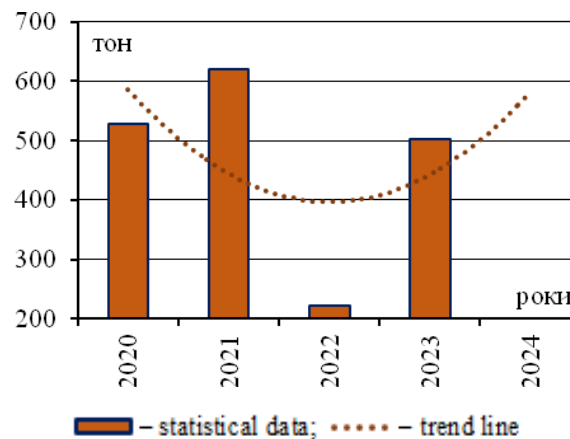


Рисунок 2 – Динаміка зміни обсягів викидів речовин у вигляді суспендованих твердих частинок розміром 2.5 мкм від кар'єрних розробок за період 2020-2023 років

Аналіз графічних даних свідчить про нерівномірний характер зміни обсягів викидів у досліджуваний період. У 2020 році обсяг викидів становив близько 530 т, після чого у 2021 році спостерігається його зростання до приблизно 620 т, що може бути пов'язано з інтенсифікацією видобувних робіт або збільшенням обсягів виробництва.

У 2022 році відбувається різке зниження обсягів викидів до рівня близько 220 т, що є мінімальним значенням за аналізований період. Таке зниження може бути зумовлене як скороченням виробничої діяльності, так і впровадженням пилопригнічувальних заходів або зміною технологічних процесів.

У 2023 році спостерігається повторне зростання викидів до рівня близько 500 т, що свідчить про відновлення виробничої активності або недостатню ефективність заходів зі зниження пилового навантаження.

Загалом динаміка характеризується значними коливаннями, що вказує на залежність обсягів викидів PM_{2.5} від виробничих, технологічних та, ймовірно, зовнішніх факторів (економічних, організаційних, метеорологічних).

Додатково варто зазначити, що трендова крива демонструє тенденцію до стабілізації показників після різкого спаду у 2022 році, однак рівень викидів у 2023 році залишається високим, що підтверджує актуальність проблеми пилового забруднення від кар'єрних розробок.

Тенденція зміни обсягів частинок PM_{2.5} від кар'єрних розробок описується наступним рівнянням:

$$y(x) = d_2 \cdot x^2 + d_1 \cdot x + d_0, \quad (1)$$

де x – роки, $d_2 = 46.98$, $d_1 = -282.7$, $d_0 = 821.9$, величина достовірності апроксимації складає $R^2 = 0.822$.

Висновки. Аналіз динаміки викидів суспендованих твердих частинок PM_{2.5} та PM₁₀ від кар'єрних розробок показав їх суттєву варіабельність, що свідчить про залежність обсягів викидів від виробничих, технологічних і зовнішніх факторів.

Встановлено, що тверді частинки є домінуючим компонентом забруднення атмосферного повітря від кар'єрних розробок, причому особливу небезпеку становлять частинки PM_{2.5} через їх здатність до тривалого перебування в атмосфері та проникнення в організм людини.

Отримані результати підтверджують необхідність удосконалення систем екологічного моніторингу та впровадження ефективних заходів зниження пилового навантаження, зокрема з урахуванням як локальних, так і розподілених джерел пиловиділення.

Перспективним напрямом подальших досліджень є застосування методів математичного моделювання та інформаційних технологій для прогнозування динаміки викидів і оцінювання зон їх поширення.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Sasikala, & Chandran, S. (2015). Impact of granite quarry on human life and environment a case study of vellarada panchayat of thiruvananthapuram district, Kerala. International conference on climate change and developing world, 1, 342-350. URL: <https://www.researchgate.net/publication/273694964>
2. Okafor, O. C., Njoku, C., & Akwuebu, A. N. (2023). Environmental impact of quarrying on air quality in Ebonyi state, Nigeria. Environmental Sciences Europe, 35, 98. URL: <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00793-6>

3. Lucas, L. S. R., Augusto L. A., & Gasparotto, J. (2022). Toxicological effects of mining hazard elements. *Energy Geoscience*, 3, 255-256. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2022.03.003>
4. Nemer, M., Giacaman, R., & Hussein, A. (2020). Lung function and respiratory health of populations living close to quarry sites in palestine: a cross-sectional study. *International journal of environmental research and public health*, 17(17):6068. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph17176068>
5. Wajs, J., Trybała, P., Górniak-Zimroz, J., Krupa-Kurzynowska, J., & Kasza, D. (2021). Modern solution for fast and accurate inventorization of open-pit mines by the active remote sensing technique-case study of Mikoszków granite mine (Lower Silesia, SW Poland). *Energies*, 14(20), 6853. URL: <https://doi.org/10.3390/en14206853>

ANALYSIS AND PREDICTION OF DUST POLLUTION IN ATMOSPHERIC AIR FROM QUARRY MINING

Tetiana Rusakova

Abstract. *The paper analyzes the dynamics of emissions of suspended particulate matter PM_{2.5} and PM₁₀ generated by quarry operations. Based on statistical data, the structure and temporal variation of air pollution in 2020–2023 are investigated. It is established that particulate matter is the dominant component of emissions, with PM₁₀ accounting for the largest share. The results reveal a non-uniform trend with peak emission levels in 2021 followed by a significant decrease in 2022–2023. The influence of technological processes, meteorological conditions, and production organization on dust formation is substantiated. Particular attention is given to fine particles PM_{2.5}, which pose increased health risks due to their ability to remain in the atmosphere for long periods and to be transported over considerable distances. The obtained results can be applied for pollution forecasting and for the development of effective environmental protection measures.*

Keywords: *dust pollution, quarry operations, PM_{2.5}, PM₁₀, air pollution, emissions, dynamics, prediction*

ПРОГНОЗУВАННЯ В'ЯЗКОСТІ ХРОМОВМІСНИХ ШЛАКІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАРАМЕТРІВ МІЖАТОМНОЇ ВЗАЄМОДІЇ В РОЗПЛАВАХ

Степаненко Д.О.¹ [ORCID], Белькова А.І.² [ORCID],

Тогобицька Д.М.³ [ORCID], Бочаров А.В.⁴ [ORCID]

¹Інститут чорної металургії Національної академії наук України, к.т.н., Україна

²Інститут чорної металургії Національної академії наук України, к.т.н., Україна

³Інститут чорної металургії Національної академії наук України,

д.т.н., професор., Україна

⁴Інститут чорної металургії Національної академії наук України,

провідний інженер., Україна

Анотація. Метою роботи є розробка прогнозних моделей в'язкості багатокомпонентних шлакових систем $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-FeO/Fe}_2\text{O}_3\text{-MnO-Cr}_2\text{O}_3$ з використанням параметрів міжатомної взаємодії CHIP (Системи неполяризованих іонних радіусів). В ході дослідження проведено експертну фільтрацію та систематизацію експериментального масиву даних (понад 490 значень), що дозволило ідентифікувати область стабільних гомогенних розплавів. Виконано кластеризацію даних за методами K-Means та DP-GMM. Встановлено, що структурний дескриптор NBO/T забезпечує найбільш фізично обґрунтований поділ шлаків на три групи залежно від ступеня їх полімеризації. Для кожного кластера побудована математична модель в'язкості з використанням інтегральних параметрів міжатомної взаємодії - електронного хімічного еквівалента Δe і параметра стехіометрії ρ . Доведено, що локальні моделі краще враховують специфічний вплив амфотерного оксиду хрому, який нівелюється у загальному масиві через домінуючий вплив основних компонентів. Отримані результати є підґрунтям для оптимізації складів шлакоутворювальних сумішей при виплавці ферохромистих сталей, що сприяє зниженню витрат легуючих елементів та підвищенню енергоефективності процесу.

Ключові слова: оксид хрому, в'язкість шлаку, система CHIP, методи кластеризації, параметри міжатомної взаємодії в розплавах, показник NBO/T, прогнозна модель.

Вступ. Ефективність виробництва ферохромистих сталей безпосередньо залежить від рафінуючої здатності шлакових систем $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-MnO-Cr}_2\text{O}_3$, де вміст оксиду хрому визначає їхній структурно-енергетичний

стан та в'язкість. Створення фундаментальних основ прогнозування реологічних властивостей таких розплавів є необхідною умовою для оптимізації складу шлаків та мінімізації втрат дорогих легуючих елементів. Це дозволяє забезпечити високу якість металу при одночасному підвищенні енергоефективності та екологічності металургійного процесу.

Основний матеріал. Аналіз публікацій досліджень впливу оксиду хрому на властивості шлакових розплавів системи $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-FeO/Fe}_2\text{O}_3\text{-MnO}$, показав, що Cr_2O_3 має амфотерний характер і суттєво змінює реологічні властивості розплавів навіть при незначних концентраціях. З метою вивчення взаємозв'язків в'язкості вказаної системи з хімічним складом шлаків та температурою сформовано представницький масив даних з вмістом оксидів хрому.

Основними факторами впливу на в'язкість є компонентний хімічний склад шлаків (титановмісні, вміст алюмінію, магнію і т.д.) та температура виміру. Для врахування впливу повного компонентного складу шлакової системи на її властивості використано інтегральні параметри міжатомної взаємодії в розплавах: хімічний еквівалент складу Δe і показник стехіометрії ρ [1] та структурні дескриптори: оптична основність шлаку Λ та показник NBO/T [2]. Параметр Δe характеризує зарядовий стан системи та взаємодію у зв'язку катіон-аніон; показник стехіометрії шлакової системи визначається відношенням числа катіонів до числа аніонів Оптична основність характеризує хімічну активність і реакційну здатність шлаку до десульфурації і дефосфорації. Показник NBO/T характеризує структурний стан, зокрема, ступінь полімеризації структури шлаку/розплаву: низький $\text{NBO/T} \rightarrow$ структура більш «зв'язана» (полімеризована), високий $\text{NBO/T} \rightarrow$ структура більш «розірвана» (деполімеризована).

Аналіз сформованого масиву даних (понад 490 значень показав значну неоднорідність вибірки, зумовлену різним технологічним призначенням шлаків та суттєвими відмінностями в їхньому хімічному складі (наявність інших оксидів – міді, титану та інш.). Для подолання неоднозначності впливу Cr_2O_3 на в'язкість шлаків реалізовано процедуру авторизованої експертної

систематизації вихідного масиву даних. В результаті було ідентифіковано групу даних, що відповідає термічній стабільності в'язкості шлаків (в'язкість $\eta < 3 \text{ Па}\cdot\text{с}$) з вилученням специфічних даних з вмістом оксиду титану.

Враховуючи значну варіацію хімічного складу, виконано процедуру кластеризації даних для виділення фізико-хімічно однорідних груп, у межах яких залежність «склад – в'язкість» відображає специфіку конкретного структурного стану розплаву. Аналіз використання групи методів кластеризації та критеріїв для визначення оптимальної кількості кластерів показав найкращі результати для методів K-Means та DP-GMM. За допомогою цих методів проведено кластеризацію масиву за двома варіантами: інтегральними параметрами Δe і ρ та структурними дескрипторами Λ та показник NBO/T. Встановлено, що обидва методи корелюють між собою, проте кластеризація за параметром NBO/T забезпечила найбільш чіткий поділ масиву на три відокремлені групи з вираженими фізичними межами (низькотемпературні в'язкі полімеризовані, високоосновні гомогенні та особливі високотемпературні в'язкі шлаки з високим ступенем полімеризації), що підтверджено графічною інтерпретацією у координатах «в'язкість – параметри електронної структури» (рис. 1). При цьому неоднозначність впливу Cr_2O_3 на в'язкість шлаку також виразно розподілилася між кластерами.

З урахуванням виявленої неоднорідності вибірки та відмінностей у структурному стані шлаків, побудовано окремі моделі в'язкості для кожного з виділених кластерів. Оскільки характер впливу хімічного складу на в'язкість не є лінійним та враховуючи логарифмічну залежність в'язкості від оберненої температури, для кожної групи шлаків побудовано аналітичну залежність у вигляді:

$$\ln(\eta) = A + B \cdot \rho + C \cdot \rho^2 + D \cdot \Delta e + E \cdot 1000/T \quad (1)$$

Характеристики рівняння (1) для кожної групи шлаків та всьому масиві даних наведено в таблиці 1.

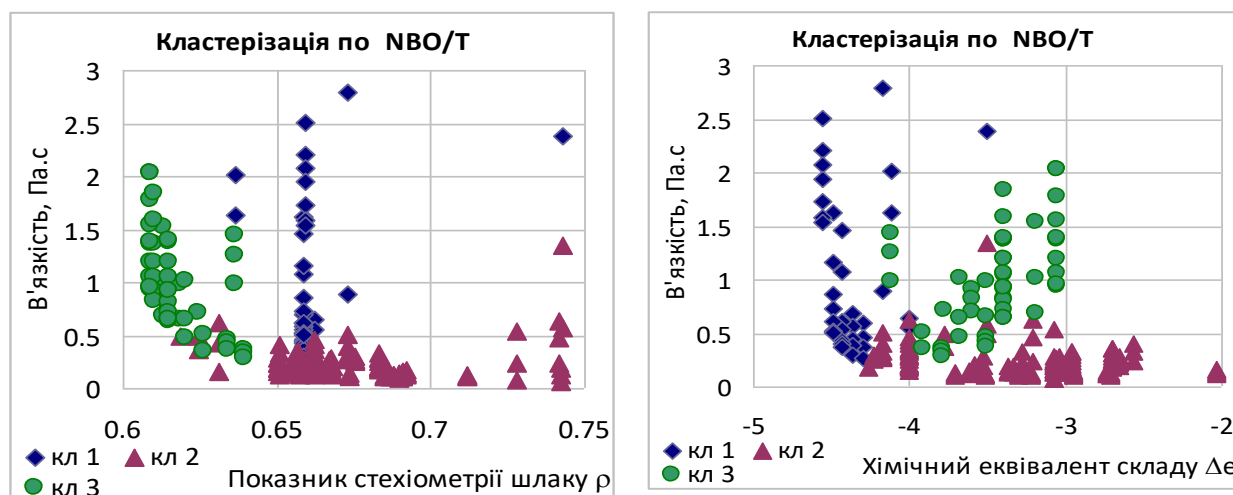


Рисунок 1 – Зв'язок в'язкості з температурою та інтегральними параметрами складу шлаку ρ та Δe по результатам кластеризації масиву даних хромовмісних шлаків

Таблиця
Значення коефіцієнтів регресійного рівняння для розрахунку в'язкості хромовмісних шлаків

Група шлаків (кластер)	Коефіцієнти рівняння $\ln(\eta) = A + B \cdot \rho + C \cdot \rho^2 + D \cdot \Delta e + E \cdot 1000/T$					R^2 (точність)
	A (const)	B (ρ)	C (ρ^2)	D (Δe)	E (1000/T)	
1	258.92	-757.86	548.24	0.3337	4.89	0.56
2	50.77	-161.66	116.65	0.0223	5.75	0.62
3	563.29	-1791.59	1392.50	-0.3252	17.16	0.87
Весь масив	138.76	-424.77	306.25	-0.0417	10.40	0.81

Найкращу точність прогнозу в'язкості отримано для третьої групи шлаків (з коефіцієнтом детермінації $R^2=0,87$). І хоча доволі точною є прогнозна модель на всьому масиві даних, для більш адекватного прогнозування доцільно використовувати модель тієї групи шлаків, до яких буде віднесено досліджуваній шлак. Зниження коефіцієнта детермінації в межах першої та другої групи шлаків порівняно із загальним масивом не свідчить про низьку якість моделей, а є наслідком гомогенізації вибірки. У вузькому діапазоні структурного стану за параметром NBO/T вплив основних факторів (параметрів Δe і ρ) є співмірним із випадковими похибками експерименту, що математично відображається у зменшенні частки загальної дисперсії. Проте, саме локальні моделі враховують специфічний вплив оксиду хрому, який у загальній моделі маскований домінуючим впливом основних компонентів (SiO_2 , CaO).

Висновки

З метою вивчення взаємозв'язків в'язкості шлакових розплавів системи $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-FeO/Fe}_2\text{O}_3\text{-MnO-Cr}_2\text{O}_3$ з хімічним складом хромовмісних шлаків та температурою виконано експертну систематизацію та кластеризацію даних для виділення фізико-хімічно однорідних груп, у межах яких залежність «склад – в'язкість» відображає специфіку конкретного структурного стану розплаву. Встановлено, що використання структурного дескриптора NBO/T дозволяє розділити масив хромовмісних шлаків на три фізико-хімічно однорідні групи з чіткими структурними межами. Розроблено диференційовані моделі на основі параметрів міжатомної взаємодії (Δe і ρ), які забезпечують адекватний прогноз в'язкості, враховуючи специфічний внесок оксиду хрому в кожному структурному стані. Незважаючи на математичну стабільність загальної моделі, саме локальні кластерні рівняння є доцільними для прецизійного керування процесами рафінування легованих розплавів.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Togobitska D. and Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the "Metal-Slag" system based on interatomic interaction parameters Lithuanian Journal of Physics. Vol. 64, No. 1, pp. 58-71 (2024). <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>
2. Mills, KC, Yuan, L, Li, Z, Zhang, GH and Chou, KC. A Review of the Factors Affecting the Thermophysical Properties of Silicate Slags. High Temperature Materials and Processes, vol. 31, no. 4-5, 2012, pp. 301-321. <https://doi.org/10.1515/htmp-2012-0097>.

PREDICTING THE VISCOSITY OF CHROMIUM-CONTAINING SLAGS USING PARAMETERS OF INTERATOMIC INTERACTIONS IN MELTS

D. Stepanenko, A. Bielkova, D. Togobitska, A. Bocharov

Abstract. *The aim of this work is to develop predictive models of the viscosity of multicomponent $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-FeO/Fe}_2\text{O}_3\text{-MnO-Cr}_2\text{O}_3$ slag systems using SNIR interatomic interaction parameters (System of nonpolar ionic radii). During the study, expert filtering and systematization of the experimental data set (over 490 values) were performed, which allowed the identification of the region of stable homogeneous melts. Data clustering was performed using the K-Means and DP-GMM methods. It was established that the NBO/T structural descriptor provides the most physically sound classification of slags into three groups depending on their degree of polymerization. For*

each cluster, a mathematical model of viscosity was constructed using integral parameters of interatomic interaction—the electronic chemical equivalent Δe and the stoichiometry parameter ρ . It has been proven that local models better account for the specific influence of amphoteric chromium oxide, which is negated in the overall array due to the dominant influence of the main components. The results obtained provide a basis for optimizing the compositions of slag-forming mixtures during the smelting of ferrochromium steels, which contributes to reducing the consumption of alloying elements and increasing the energy efficiency of the process.

Keywords: *chromium oxide, slag viscosity, SNIP system, clustering methods, interatomic interaction parameters in melts, NBO/T ratio, predictive model*

ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ НА МАТЕМАТИЧНІЙ МОДЕЛІ НАВЧАЛЬНОГО СТЕНДУ В ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ TIA PORTAL SIEMENS

Стьопкін В.В.¹ [ORCID], Іващенко М.А.² [ORCID], Шпачук П.Р.³ [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

²Український державний університет науки і технологій, студент, Україна

³Український державний університет науки і технологій, студент, Україна

Анотація. З метою дослідження способів керування асинхронним двигуном з перетворювачем частоти лінійки SINAMICS S120 фірми Siemens з реалізацією різного характеру навантажувальних діаграм був зібраний та зконфігурований навчальний стенд у програмному забезпеченні TIA Portal. Навантаження для асинхронного двигуна реалізовано за допомогою синхронного двигуна, який був механічно з'єднаний валом. До складу стенду входять наступні елементи: програмований логічний контролер CPU 1510SP-1 PN; комунікаційний процесор CP 1542SP-1 для підключення SIMATIC S7-ET200SP до мережі Industrial Ethernet; базовий електропривод змінного струму SINAMICS S120 CU320-2 PN; модулі керування інвертором асинхронного двигуна та синхронного DC 510-720 В, 2х4,8 кВт; 2х9 А у кількості 2 шт.; асинхронний двигун з короткозамкненим ротором 0,37 кВт, 1500 об/хв.; синхронний двигун з постійними магнітами 0,82 кВт, 3000 об/хв. В роботі вирішена задача з розробки математичної моделі зі скалярною та векторною системою керування з можливістю порівняльного аналізу перехідних процесів на реальному електроприводі.

Ключові слова: контролер, асинхронний двигун, синхронний двигун, перетворювач частоти, датчик струму, датчик швидкості

Вступ. В даній роботі розроблена математична модель частотно-керованого електропривода SINAMICS S120 у програмному забезпеченні TIA Portal [1] при відпрацюванні скалярного та векторного законів керування з різними варіантами навантажувальних діаграм.

Основний матеріал. До складу стенду входить програмований логічний контролер, модуль зв'язку з мережею, система керування випрямлячем (конвертором) та системи керування інверторами для асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором та синхронного двигуна з постійними магнітами.

Навчальний стенд з системою керування електроприводом змінного струму SINAMICS S120 має наступну комплектацію: SINAMICS керуючий модуль CU320-2 PN [6SL3040-1MA01-0AA0]; дводвигуновий модуль SINAMICS S120 вх. напр.: DC 600В вих. напр.: 3AC 400В, 9А/9А [6SL3120-2TE21-0AA4]; SIMATIC S синхронний серводвигун 1FK7 компактний 3,0 Нм, 1 00 К, 3000 об/хв, 0,82 кВт [1FK7042-5AF71-1DA0]; Siemens асинхронний двигун 220/380 V, 50 Hz, 1.86/1.07 А, 0.37 kW; SIMATIC DP, центральний процесор CPU 1512SP-1PN для ET 200SP [6ES7512-1DK01-0AB0]. Для навчального стенду виконано налагодження електроприводів, розроблена програма ПЛК для забезпечення їх спільної роботи та зняті навантажувальні діаграми роботи асинхронного двигуна.

Загальний вигляд та структурна схема стенду наведені на рисунку 1.

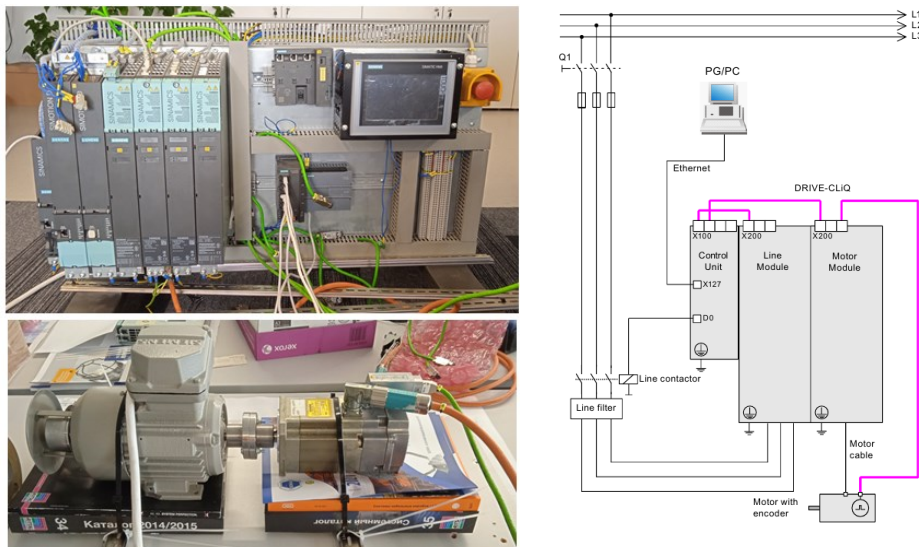


Рисунок 1 – Загальний вигляд та структурна схема стенду

Загальний вигляд обладнання та мережевий вигляд у середовищі TIA Portal наведений на рисунку 2.

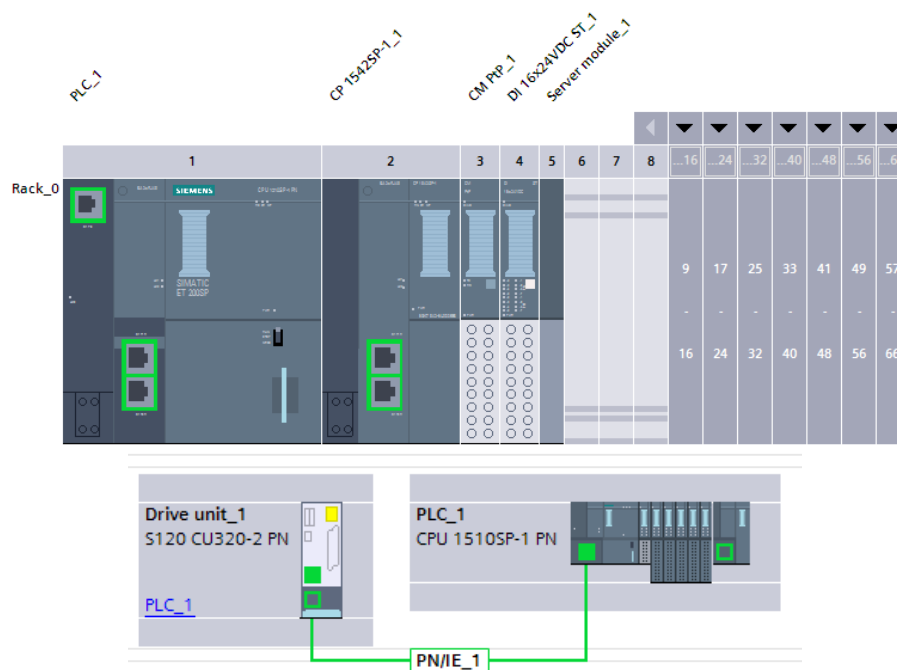
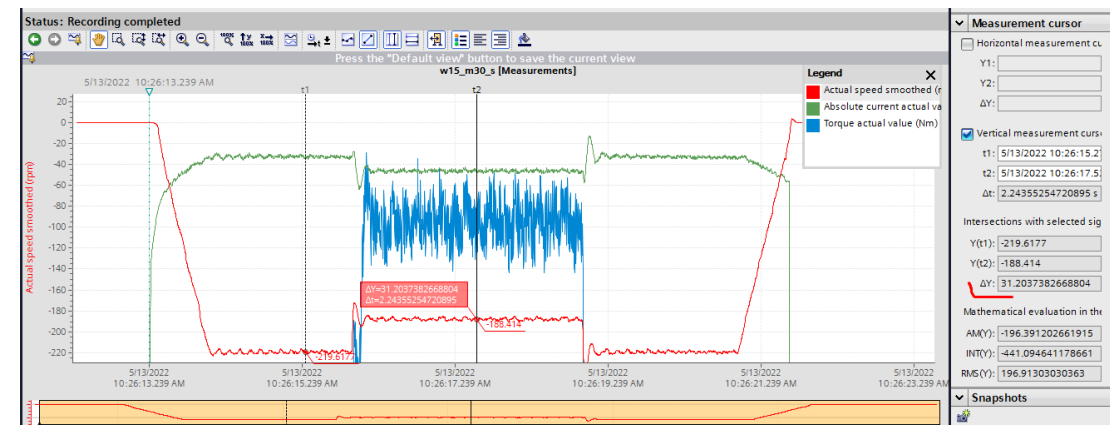
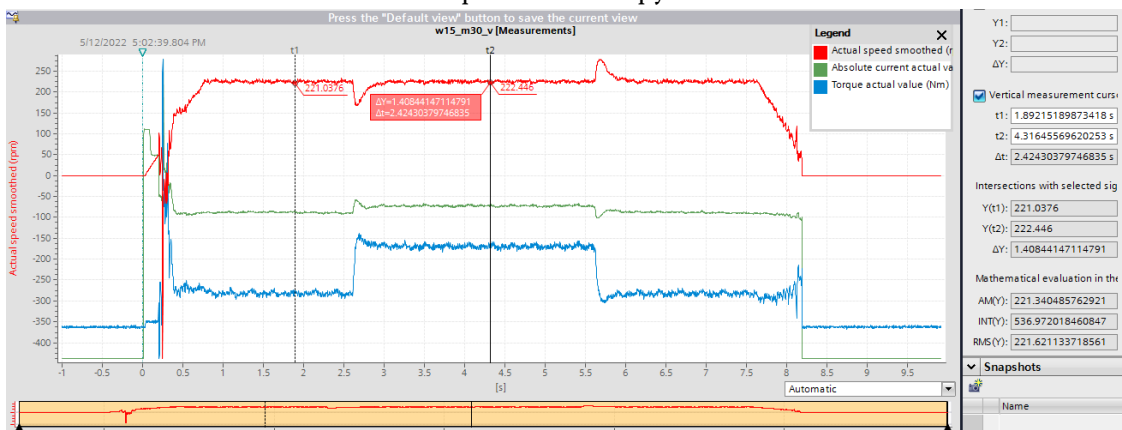


Рисунок 2 - Загальний вигляд обладнання та мережевий вигляд у середовищі TIA Portal

В результаті роботи частотного приводу були отримані різноманітні графіки перехідних процесів при скалярному та векторному способах керування. На рисунку 3 чітко видно статичну помилку за швидкістю при скалярному керуванні (15%) а при векторному вона відсутня. При скалярному керуванні коливальність моменту значна а при векторному вона практично відсутня. Значення різниці швидкостей наведено на рисунку 3 (у вікні праворуч з позначкою $\Delta Y = 31,2$ об / хв). На цьому графіку прийняті позначення w15 та m30 що означає значення швидкості 15% а моменту навантаження 30%. Далі на графіках ці значення відповідно змінювалися.



скалярний закон керування



векторний закон керування

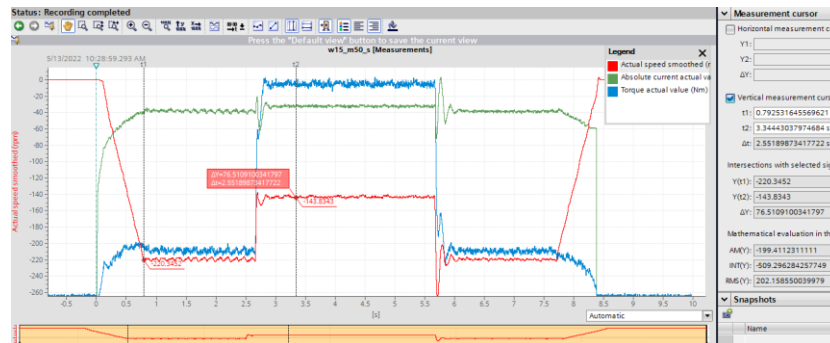
Рисунок 3 – Графіки перехідних процесів (варіант 1)

Від'ємні значення частоти обертів, струму та моменту пояснюється тим, що синхронний двигун був навантаженням для асинхронного і обертався у протилежному напрямку.

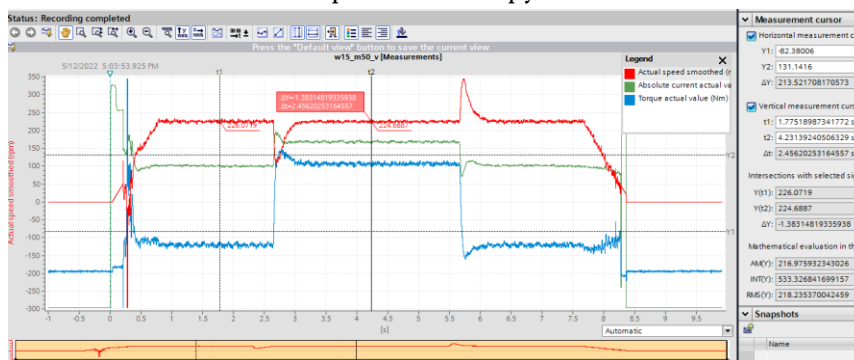
У порівнянні з рисунком 3 на рисунку 4 ми збільшили навантаження асинхронного двигуна з 30% до 50%. Статична помилка за швидкістю при скалярному керуванні збільшилася до 36%. Навантаження подається за часом 3с. Статична помилка за швидкістю при векторному керуванні практично відсутня. У порівнянні з рисунком 3 швидкість залишилася без змін. Коливальність за моментом у цьому випадку при скалярному та векторному керуванні практично відсутня.

На рисунку 5 у порівнянні з рисунком 4 та рисунком 3 збільшили швидкість асинхронного двигуна до 30%. Момент навантаження складав 30%, подавався за часом 3с. Неузгодження за швидкістю при скалярному керуванні складало $\Delta Y = 24,04$ об / хв, а статична помилка 5,4%. Таким чином, при

зростанні швидкості статична помилка значно скоротилася. При векторному законі керування статична помилка як і у попередніх випадках була відсутньою. Коливальність за моментом зросла.

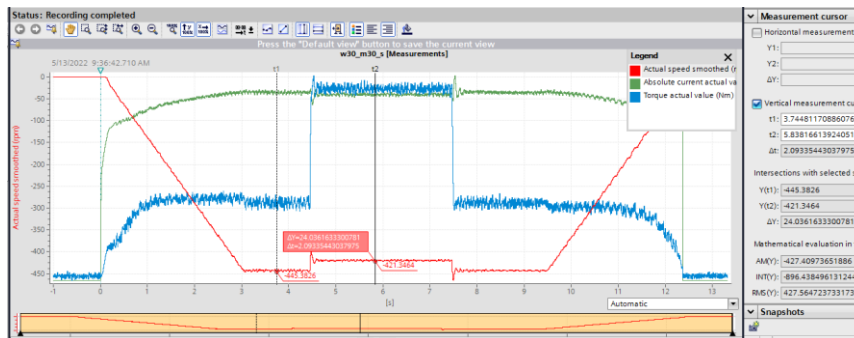


скалярний закон керування

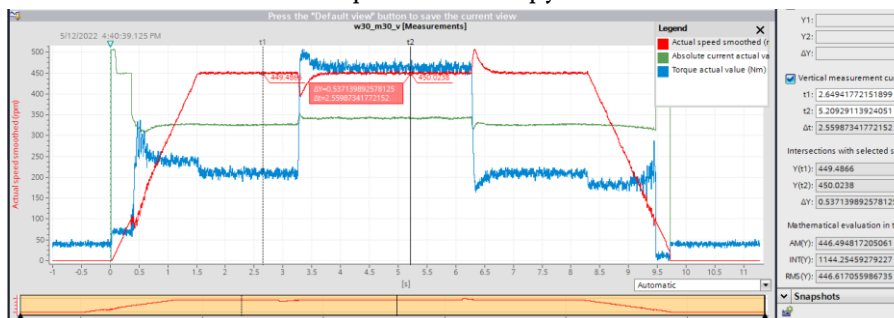


векторний закон керування

Рисунок 4 – Графіки перехідних процесів (варіант 2)



скалярний закон керування



векторний закон керування

Рисунок 5 – Графіки перехідних процесів (варіант 3)

Висновки. Отримані діаграми зміни зазначених координат електропривода відповідають реальним перехідним процесам які властиві векторним системам керування [2, 3]. На стенді, відповідно до одного із багатьох завдань, проводилися експерименти запуску асинхронного двигуна та подання різних варіантів навантаження за допомогою синхронного двигуна з постійними магнітами та його системою керування (варіанти 1, 2 та 3). Результати зняття графіків перехідних процесів за допомогою середовища TIA Portal за моментом та кутовою швидкістю при відпрацюванні скалярного закону керування та векторного наведені на рисунках 3, 4 та 5 відповідно. Результати даної роботи будуть використані при постановці лабораторних робіт з таких дисциплін як «Системи керування електротехнічними комплексами» та «Моделювання електромеханічних систем» в умовах кафедри електричної інженерії Українського державного університету науки і технологій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Siemens. Totally Integrated Automation Portal [Електронний ресурс] / Siemens // Siemens. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://cutt.ly/lGADvng>.
2. Модель прямого керування моментом асинхронного двигуна у MATLAB / В. В.Стьопкін, О. В. Юдін, М. В. Котляр, О. О. Паламарчук. // Гірнича електромеханіка та автоматика. – 2020. – №103. – С. 26–31.
3. Півняк Г.Г., Волков О.В. Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи з широтно-імпульсною модуляцією: Монографія. – Дніпропетровськ: НГУ, 2006. – 470с.

RESEARCH INTO METHODS OF CONTROLLING AN ASYNCHRONOUS MOTOR ON A MATHEMATICAL MODEL OF A TRAINING STAND IN THE TIA PORTAL SIEMENS SOFTWARE

Vasyl Stepkin, Mykola Ivashchenko, Pavlo Shpachuk

Abstract. *In order to study the methods of controlling an asynchronous motor with a frequency converter of the SINAMICS S120 line from Siemens with the implementation of various types of load diagrams, a training stand was assembled and configured in the TIA Portal software. The load for the asynchronous motor was implemented using a synchronous motor, which was mechanically connected by a shaft. The stand includes the following elements: programmable logic controller CPU 1510SP-1 PN; communication*

processor CP 1542SP-1 for connecting SIMATIC S7-ET200SP to the Industrial Ethernet network; basic AC drive SINAMICS S120 CU320-2 PN; inverter control modules for asynchronous motors and synchronous DC 510-720 V, 2x4.8 kW; 2x9 A in the amount of 2 pcs.; asynchronous motor with a squirrel-cage rotor 0.37 kW, 1500 rpm; synchronous motor with permanent magnets 0.82 kW, 3000 rpm. The work solves the problem of developing a mathematical model with a scalar and vector control system with the possibility of comparative analysis of transient processes on a real electric drive.

Keywords: *controller, asynchronous motor, synchronous motor, frequency converter, current sensor, speed sensor*

REFERENCE

1. Siemens. Totally Integrated Automation Portal [Elektronnyi resurs] / Siemens // Siemens. – 2021. – Rezhym dostupu do resursu: <https://cutt.ly/lGADvng>.
2. Model priamoho keruvannia momentom asynkhronnoho dvyhuna u MATLAB / V. V. Stopkin, O. V. Yudin, M. V. Kotliar, O. O. Palamarchuk. // Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka. – 2020. – №103. – S. 26–31.
3. Pivniak H.H., Volkov O.V. Suchasni chastotno-rehulovani asynkhronni elektropryvody z shyrotno-impulsnoi modulatsiiei: Monohrafiia. – Dnipropetrovsk: NHU, 2006. – 470s.

МОДЕЛЮВАННЯ DAG-СТРУКТУР РОБОЧИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Андрющенко В. О.¹ [ORCID], Танасієнко Д. О.² [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

²Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

Анотація. Запропоновано конструкційну модель породження DAG-структур робочих навантажень для тестування планувальників кластерів Kubernetes. Модель базується на апараті узагальненого конструктора та спеціалізує його компоненти для предметної області направлених ациклічних графів задач. Формалізовано механізм підстановки як частковий випадок контекстно-вільної графової граматики із заміною вузлів з чотирма типами правил: атрибутування, підстановка підграфа, реплікація та алгоритмічна генерація. Введено систему атрибутів, що розширює ідеї атрибутних граматик Кнута на графові структури. Доведено збереження ациклічності при кожній підстановці та завершеність процесу породження. Конструктор реалізовано мовою Python з декларативним YAML DSL. Експериментально підтверджено практичну придатність моделі на множині з 100 породжених DAG.

Ключові слова: інформаційні технології, програмне забезпечення, конструктивно-продукційне моделювання, направлений ациклічний граф, формальні граматики, графові граматики, планування задач, Kubernetes, оркестрація контейнерів, генерація робочих навантажень.

Вступ. Тестування планувальників кластерів Kubernetes потребує реалістичних структур робочих навантажень — направлених ациклічних графів (DAG), що моделюють залежності між задачами Apache Airflow. Ручне створення DAG не масштабується, а випадкова генерація не відображає структурних патернів реальних конвеєрів (послідовні ланцюги, паралельні гілки, діамантові з'єднання). Існуючі параметричні генератори task graphs (DAGGEN [6], GGen [7]) не надають формальних гарантій структурних інваріантів породжених графів. Мета роботи — формалізувати породження DAG-структур засобами конструктивно-продукційного моделювання (КПМ) [3, 4], що забезпечує єдиний формалізм для опису процесів конструювання об'єктів. Наукова новизна полягає у застосуванні апарату узагальненого конструктора

до породження DAG-структур для реальної прикладної області з формальними гарантіями коректності (ациклічність та завершимість by construction).

Узагальнений конструктор та спеціалізація. Відповідно до [3], узагальнений конструктор визначається як трійка $C = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle$, де M — поповнений носій, Σ — сигнатура операцій, Λ — інформаційне забезпечення. Носій $M = T \cup F \cup K$ розділяється на термінальні елементи T , проміжні форми F та конструкції K . Процес конструювання є послідовністю застосувань правил підстановки: $f_0 \Rightarrow_{\psi_1} f_1 \Rightarrow_{\psi_2} \dots \Rightarrow_{\psi_n} k \in K$.

Спеціалізація $\mapsto_s: C \rightarrow C_{\text{DAG}}$ конкретизує компоненти трійки для предметної області — породження DAG задач:

$T_{\text{DAG}} = \{\text{extract, transform, load, train, ...}\}$ — атомарні задачі;

$F_{\text{DAG}} = \{G = (V, E) | \exists v \in V: v \in N_{\text{DAG}}\}$ — графи з нетерміналами ($N_{\text{DAG}} = \{\text{Sequential, Parallel, Diamond, ...}\}$);

$K_{\text{DAG}} = \{G = (V, E) | V \subset T_{\text{DAG}}, G \text{ — ациклічний}\}$ — завершені DAG.

Сигнатура $\Sigma_{\text{DAG}} = \langle \Theta_{\text{DAG}}, \Phi_{\text{DAG}}, R_{\text{DAG}} \rangle$ включає операції підстановки Θ_{DAG} (заміна нетерміналів на підграфи), атрибутування Φ_{DAG} (обчислення параметрів вершин) та відношення R_{DAG} — множину орієнтованих ребер (u, v) між вершинами графа, що задають залежності між задачами; при кожному застосуванні правила підстановки відношення оновлюються: додаються ребра E_{in} від попередників до вхідних вершин підграфа та E_{out} від вихідних вершин підграфа до наступників.

Механізм підстановки. Механізм підстановки є частковим випадком node replacement graph grammar [5] зі спеціалізованим правилом вбудовування, що гарантує збереження ациклічності DAG. Правило підстановки $\psi \in \Psi_{\text{DAG}}$ визначається як кортеж $\psi = \langle N, R_\psi, \text{attach}, g, \text{guard} \rangle$, де $N \in N_{\text{DAG}}$ — нетермінал, $R_\psi = (V_R, E_R)$ — ациклічний підграф-заміна, $\text{attach} = (\text{sources}, \text{sinks})$ — вхідні та вихідні вершини підграфа, $g: V_R \rightarrow A_{\text{intrinsic}}$ — функція атрибутування, $\text{guard}: A \rightarrow \{\text{true}, \text{false}\}$ — предикат застосовності.

Операція $apply(G, m, \psi) = H$ буде результуючий граф: $V_H = (V_G \setminus \{v\}) \cup V_R$,
 $E_H = E_G^{-v} \cup E_R \cup E_{in} \cup E_{out}$, де $E_{in} = \{(u, s) | u \in pred_G(v), s \in sources(R_\psi)\}$,
 $E_{out} = \{(t, w) | t \in sinks(R_\psi), w \in succ_G(v)\}$.

Правила класифікуються на чотири типи: **I** (Attribute) — призначення атрибутів вершині без зміни структури графа; **II** (Substitute) — підстановка підграфа замість нетермінала; **III** (Replicate) — реплікація $v \rightarrow \{v_1, \dots, v_n\}$, де кількість реплік визначається атрибутом вершини; **IV** (Algorithm) — делегування спеціалізованому алгоритму генерації. Правило може містити предикат *guard*, що перевіряє наявність та значення атрибутів вершини; правило застосовується лише якщо *guard* виконується. Вибір правила здійснюється детерміновано за принципом *first-match*: вершини обходяться в топологічному порядку, для кожної перевіряються правила в порядку їх оголошення, і застосовується перше, *guard* якого виконується. Стохастичність структури породженого графа забезпечується каскадним механізмом: правила типу I призначають атрибути, значення яких семплюються з параметричних розподілів; *guards* правил типів II–IV залежать від цих атрибутів, тому варіативність значень атрибутів каскадно визначає структуру породженого графа.

Система атрибутів $A = A_{intrinsic} \cup A_{structural} \cup A_{scheduling}$ розширює ідеї атрибутних граматик Кнута [2] на графові структури: $A_{intrinsic}$ (cpu, memory, duration) призначаються при створенні; $A_{structural}$ (depth, width) обчислюються під час виведення та керують *guards*; $A_{scheduling}$ (earliest_start, slack, is_critical) обчислюються після повного породження.

Твердження 1 (Збереження ациклічності) Якщо G — ациклічний граф, правило ψ коректне (R_ψ ациклічний, $sources \neq \emptyset$, $sinks \neq \emptyset$) і вбудовування здійснюється виключно через ребра від $pred_G(v)$ до $sources(R_\psi)$ та від $sinks(R_\psi)$ до $succ_G(v)$, то $H = apply(G, m, \psi)$ також ациклічний.

Теорема 1 (Завершимість породження) Нехай на скінченній множині типів нетерміналів N_{DAG} визначено строгий частковий порядок $\succ$ такий, що для кожного структурного правила $\psi = \langle N, R_\psi, \dots \rangle$ (типи II–IV) усі нетермінали у R_ψ мають типи строго нижчі за N : $\forall v \in V_R \cap N_{DAG}: N \succ type(v)$. Нехай також кожне

правило атрибутування (тип I) має *guard*, що унеможливорює повторне застосування до тієї самої вершини за тим самим атрибутом. Тоді породження завершується за скінченну кількість кроків.

Ідея доведення. Кожне застосування структурного правила споживає один нетермінал типу N і може породжувати лише нетермінали типів $N' < N$. Хоча загальна кількість нетерміналів може тимчасово зростати (наприклад, при реплікації одного нетермінала на кілька), усі породжені нетермінали мають строго нижчий ранг. Оскільки $>$ — скінченний строгий порядок без нескінченних спадних ланцюгів, кількість застосувань структурних правил скінченна. Правила атрибутування (тип I) не змінюють множину нетерміналів; *guard* обмежує кількість їх застосувань до $|V| \times |A|$, де $|A|$ — кількість призначуваних атрибутів.

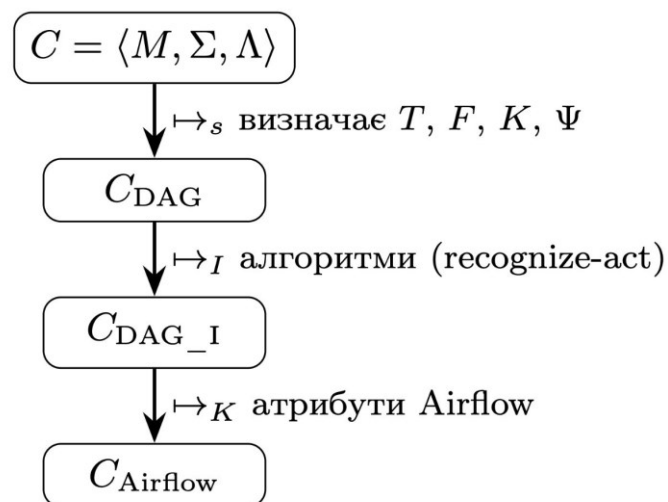


Рисунок 1 – Ланцюжок уточнень конструкційного компонента

Чисельний експеримент. Конструктор реалізовано мовою Python з декларативним YAML DSL для опису правил підстановки. Для підтвердження практичної придатності моделі породжено 100 DAG з 20–80 задачами, глибиною 3–7 та шириною до 12. Усі породжені графи задовольняють інваріанту ацикличності, а детермінованість забезпечується фіксацією *seed* генератора випадкових чисел.

Висновки. Запропоновано конструкційну модель породження DAG-структур на основі узагальненого конструктора [3]. Формалізовано механізм підстановки з чотирма типами правил, систему атрибутів та умовну стохастичку.

Доведено збереження ацикличності та завершимості породження. На відміну від існуючих параметричних генераторів [6, 7], модель забезпечує формальні гарантії коректності by construction, генерацію структурно реалістичних DAG з контрольованими характеристиками та декларативний опис правил. Відкритим залишається аналіз розподілу ймовірностей на множині породжених конструкцій K_{DAG} .

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Chomsky N. Three models for the description of language // IRE Trans. on Information Theory. — 1956. — Vol. 2, No. 3. — P. 113–124.
2. Knuth D. E. Semantics of context-free languages // Mathematical Systems Theory. — 1968. — Vol. 2, No. 2. — P. 127–145.
3. Shynkarenko V. I., Ilman V. M. Constructive-Synthesizing Structures and Their Grammatical Interpretations. I. Generalized Formal Constructive-Synthesizing Structure // Cybernetics and Systems Analysis. — 2014. — Vol. 50, No. 5. — P. 655–662. DOI: 10.1007/s10559-014-9655-z.
4. Skalozub V., Ilman V., Shynkarenko V. Ontological support formation for constructive-synthesizing modeling of information systems development processes // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2018. — Vol. 5, No. 4(95). — P. 55–63. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.143968.
5. Rozenberg G. (ed.) Handbook of Graph Grammars and Computing by Graph Transformation. Vol. 1: Foundations. — World Scientific, 1997.
6. Cordeiro D., Mounié G., Perarnau S., Trystram D., Vincent J.-M., Wagner F. Random graph generation for scheduling simulations // Proc. 3rd International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques (SIMUTools 2010). — 2010. — P. 1–10. DOI: 10.4108/ICST.SIMUTOOLS2010.8667.
7. Canon L.-C., Sayah M., Héam P.-C. A Comparison of Random Task Graph Generation Methods for Scheduling Problems // Euro-Par 2019. LNCS, vol. 11725. — Springer, 2019. — P. 61–73.

CONSTRUCTIVE MODEL FOR GENERATING DAG STRUCTURES OF WORKLOADS

Vadym Andriushchenko, Dmytro Tanasiienko

Abstract. A constructive model for generating DAG structures of workloads for testing Kubernetes cluster schedulers is proposed. The model is based on the generalized constructor formalism and specializes its components for the domain of directed acyclic task graphs. The substitution mechanism is formalized as a special case of node replacement graph grammar with four rule types: attribute assignment, subgraph

substitution, replication, and algorithmic generation. An attribute system extending Knuth's attribute grammars to graph structures is introduced. Preservation of acyclicity under each substitution and termination of the generation process are formally proved. The constructor is implemented in Python with a declarative YAML DSL. Experimental validation on a set of 100 generated DAGs confirms the practical applicability of the model.

Keywords: *information technology, software engineering, constructive-synthesizing modeling, directed acyclic graph, formal grammars, graph grammars, task scheduling, Kubernetes, container orchestration, workload generation.*

РОЗПОДІЛ НАВАНТАЖЕННЯ НА КАНАЛИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБЕРТАННЯ РОТОРА ВІТРОВОЇ ТУРБІНИ, КЕРОВАНОГО ЗМІНАМИ ЇЇ КОНФІГУРАЦІЇ І ГАЛЬМІВНОГО МОМЕНТУ ГЕНЕРАТОРА

С.В. Тарасов¹ [ORCID], О.Н. Молотков² [ORCID]

¹Інститут транспортних систем та технологій НАН України,

к.т.н., ст.наук.спів., Україна

²Інститут транспортних систем та технологій НАН України,

к.т.н., доц., Україна

Анотація. В роботі розглядається функціонування системи стабілізації обертання ротора Дар'є вертикально-осьової вітроенергетичної установки (ВЕУ), керованого сумісними змінами довжини лопатей, траверс і гальмівного моменту синхронного генератора на постійних магнітах. В такій системі стабілізації значні зміни довжини траверс призводять до змін моменту інерції ротора, що перетворює її на нестационарну і суттєво ускладнює синтез працездатних стійких алгоритмів формування зворотних зв'язків. Для зменшення цього пропонується використання алгоритмів розподілу навантаження на канали змін довжини лопатей і траверс. Доведено, що застосування запропонованих алгоритмів суттєво покращує динаміку системи стабілізації – дозволяє значно зменшити відхилення довжини траверс ротору від їх номінальних значень. Методами вирішення задачі є методи математичного моделювання. Новизна отриманих результатів полягає в поширенні методики розподілу навантаження каналів стабілізації на систему з додатковим керуючим каналом змін гальмівного моменту генератора.

Ключові слова: вертикально-осьові турбіни, стабілізація обертання, моделювання, перехідні функції, алгоритми розподілу навантаження, гальмівний момент генератора

Вступ

Можливості вітроенергетики як альтернативного джерела електроенергії все ще залишаються не повністю реалізованими у зв'язку з сукупністю проблем, розв'язання яких вимагає подальших поглиблених теоретичних досліджень [1]. Для ефективної роботи ВЕУ висувають ряд вимог, серед яких: максимальне використання енергії вітру, висока надійність та безпека експлуатації,

можливість функціонування в автоматичному режимі, легкість пристосування до змін напряму та величини швидкості вітрового потоку тощо. Забезпечення частини із перелічених вимог може бути досягнуте шляхом використання адаптаційних можливостей системи стабілізації обертання ротора Дар'є, керованого сумісними змінами його конфігурації і гальмівного моменту синхронного генератора на постійних магнітах. Проблема яка виникає при цьому – забезпечення працездатності каналів стабілізації в умовах залежності тензора інерції ротора від змін довжини траверс. В роботі [2] обґрунтовано алгоритми розподілу навантаження на канали стабілізації швидкості обертання ротора ω вертикально-осьових ВЕУ із H -ротором Дар'є, керованого шляхом сумісних змін довжини лопатей і траверс згідно співвідношень

$$\begin{aligned}\frac{d\Delta\omega}{dt} &= (k_1\Delta V + k_{2h}\Delta H + k_{2r}\Delta R + k_3\Delta N_e - \Delta\omega) / T, \\ \frac{d\Delta H}{dt} &= (k_{2h}K_2\Delta H + ((K_1T - K_2)\Delta\omega + k_1K_2\Delta V)\gamma_1) / T, \\ \frac{d\Delta R}{dt} &= (k_{2r}K_2\Delta R + ((K_1T - K_2)\Delta\omega + k_1K_2\Delta V)\gamma_2) / T,\end{aligned}\quad (1)$$

де $\Delta\omega$ – відхилення швидкості обертів ротора змінної конфігурації, від сталого значення ω_o ; ΔH , ΔR , ΔN_e – зміни довжини лопатей, траверс та потужності генератора відповідно; T , k_1 , k_{2h} , k_{2r} , k_3 – коефіцієнти лінеаризації, обчислені за конструктивними параметрами ротора ВЕУ та умовам його роботи; K_1 , K_2 – коефіцієнти зворотних зв'язків в каналах стабілізації змінами довжини лопатей і траверс; γ_1 , γ_2 – вагові коефіцієнти розподілу навантаження на канали змін довжини лопатей і траверс; ΔV зміна швидкості вітру. Чисельні значення γ_1 , γ_2 обираються за умов

$$\gamma_1 + \gamma_2 = 1, \quad \gamma_1, \gamma_2 \in [0,1]$$

таким чином, щоб забезпечити менше навантаження на канал змін довжини траверс і, як слідство, зробити практично незмінним момент інерції ротора. В роботі що пропонується досліджуються можливості роботи алгоритму розподілу навантаження в каналах змін довжини лопатей і траверс, які працюють сумісно з додатковим каналом стабілізації обертання ротора змінами гальмівного моменту синхронного генератора на постійних магнітах.

Викладення основного матеріалу

Зміни потужності генератора на постійних магнітах ΔN_z , керованого змінами резистивного супротиву навантаження, обчислюються із співвідношень [3]

$$\Delta N_z = e\omega_o \Delta i_q, \quad \frac{d\Delta i_q}{dt} = d\Delta\omega + c\Delta i_q, (2)$$

де Δi_q – зміна керуючого струму генератора; c , d і e – коефіцієнти лінеаризації контуру керування генератора на постійних магнітах [3]

$$c = \left. \frac{\partial i_q}{\partial R_c} \right|_{\lambda=\lambda_o}, \quad d = \left. \frac{\partial i_q}{\partial \omega} \right|_{\lambda=\lambda_o}, \quad e = \left. \frac{\partial M_z}{\partial i_q} \right|_{\lambda=\lambda_o} = \frac{3}{2} n_p \lambda_o,$$

n_p – кількість полюсів, λ_o – коефіцієнт швидкохідності ВЕУ, який відповідає максимуму потужності для швидкості вітру V_o .

З метою оцінки працездатності і ефективності запропонованих алгоритмів проведено моделювання роботи системи стабілізації обертання ротора ВЕУ із конструктивними параметрами близькими до параметрів ВЕУ-0420, наведеними в таблиці 2 роботи [2].

Обчислені значення перехідних функцій ΔH , ΔR системи стабілізації обертання ротора Дар'є для значень параметрів γ_1 , γ_2 з таблиці 1 роботи [2] наведені на рис. 1 і 2. Номера залежностей відповідають номерам строк таблиці 1.

Наведені перехідні функції демонструють: 1) узгоджені зміни ΔH і ΔR в залежності від змін параметрів розподілу навантаження γ_1 і γ_2 ; 2) при зменшенні γ_2 (збільшенні γ_1) пікові та кінцеві значення перехідних функцій змінної ΔR зменшуються, а перехідних функцій змінної ΔH узгоджено зростають; 3) пікові та кінцеві значення ΔR змінами параметрів γ_1 , γ_2 з 1/2 до 1/5 вдається зменшити більше ніж у два рази, що суттєво покращує динамічні властивості системи стабілізації – зменшує зміни моменту інерції ротора ВЕУ.

Додатково обраховані перехідні функції за змінними $\Delta\omega$ і Δi_q прямують до нуля із зростанням часу t , тобто замкнута система з трьома каналами стабілізації не має статичної помилки. Це дозволяє зробити висновок, що збурюючі впливи змін швидкості вітру цілком і повністю компенсуються змінами конфігурації ротора ВЕУ, а не зростанням гальмівного моменту

генератора, тобто адаптивні можливості ротора змінної конфігурації можуть забезпечити суттєву економію витрат енергії на керування при довготривалих змінах швидкості вітру.

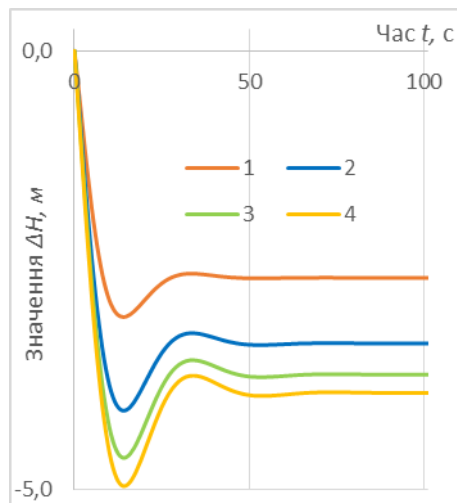


Рисунок 1 – Залежності ΔH від часу t і γ_2

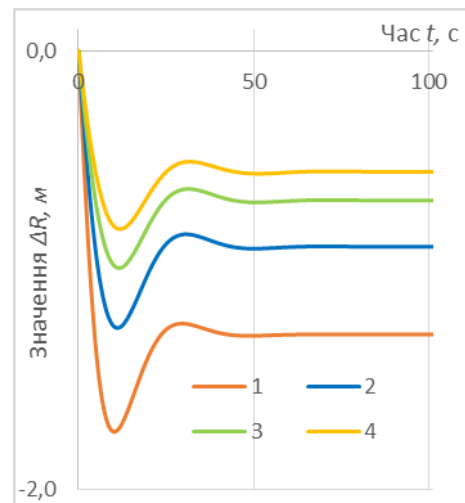


Рисунок 2 – Залежності ΔR від часу t і γ_2

Розраховані перехідні функції для ΔH і ΔR стаціонарної і нестационарної систем стабілізації наведені на рис. 3 і 4 відповідно. Цифрами 1 і 2 позначені перехідні функції для значення параметру $\gamma_2 = 1/2$, цифрами 3 і 4 – для значення параметру $\gamma_2 = 1/5$. Непарні позначки відповідають нестационарній системі стабілізації, парні – стаціонарній.

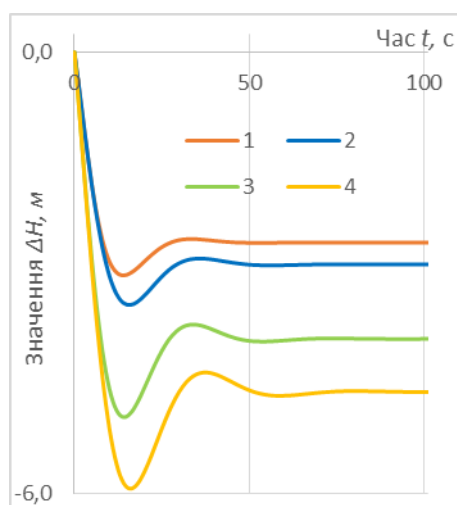


Рисунок 3 – Залежності ΔH від часу t і γ_2 для стаціонарної і нестационарної систем

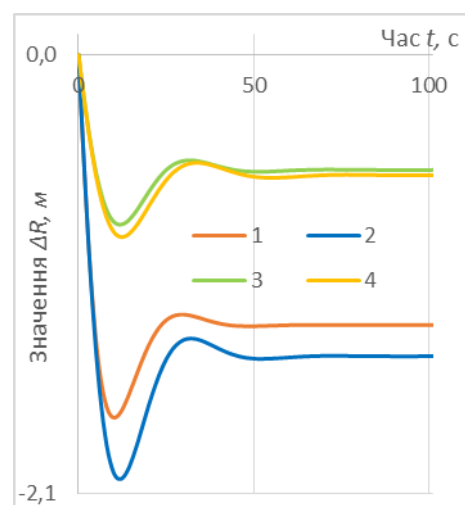


Рисунок 4 – Залежності ΔR від часу t і γ_2 для стаціонарної і нестационарної систем

Аналіз наведених перехідних функцій дозволяє зробити наступні висновки:

- як стаціонарна так і нестаціонарна системи достатньо точно описують динаміку системи; перехід до розгляду нестаціонарної системи стабілізації дещо уточнює опис динаміки системи;

- нестаціонарна система в цілому уявляє собою систему з практично незмінною динамічною матрицею, тобто аналіз її стійкості можна вести по стаціонарній системі.

Висновки

Проведене моделювання роботи ВЕУ із ротором Дар'є, керованим сумісними змінами довжини лопатей, траверс і гальмівного моменту синхронного генератора на постійних магнітах підтвердило працездатність та ефективність методики розподілу навантаження на канали стабілізації в умовах сумісної роботи всіх трьох каналів стабілізації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков: М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.
2. Тарасов С. В., Молотков О. Н. Стабілізація обертання ротора Дар'є сумісними змінами довжини лопатей і траверс. Технічна механіка, 2024, № 2, с. 92–105. <https://doi.org/10.15407/itm2024.02.092>
3. Melício R., Mendes V.M.F., Catalão J.P.S. Fractional order control and simulation of wind energy systems with PMSG/full-power converter topology. [Інтернет ресурс] Energy Conversion and Management - June 2010. - DOI: 10.1016/j.enconman.2009.12.036

LOAD DISTRIBUTION ON THE WIND TURBINE ROTOR'S ROTATION STABILIZATION CHANNELS, CONTROLLED BY CHANGES IN ITS CONFIGURATION AND GENERATOR BRAKING TORQUE

Tarasov Serhii, Molotkov Oleh

Abstract. *The paper considers the functioning of the Darrieus rotor rotation stabilization system of a vertical-axis wind turbine, controlled by simultaneous changes in the length of the blades, traverses, and the braking torque of a permanent magnet synchronous generator. In such a stabilization system, significant changes in the traverse length lead to changes in the rotor moment of inertia, which turns it into a non-stationary one and significantly complicates the synthesis of workable stable algorithms for forming feedback loops. To reduce this, it is proposed to use load distribution algorithms for the*

channels of changes in the length of the blades and traverses. It is proven that the use of the proposed algorithms significantly improves the dynamics of the stabilization system - it allows to significantly reduce the deviation of the length of the rotor traverses from their nominal values. The methods of solving the problem are mathematical modeling methods. The novelty of the results obtained lies in the extension of the method of load distribution of stabilization channels to a system with an additional control channel for changes in the generator braking torque.

Keywords: vertical-axis turbines, rotation stabilization, modeling, transient functions, load distribution algorithms, generator braking torque

REFERENCE

1. Osnovy vitroenerhetyky: pidruchnyk / H. Pivniak, F. Shkrabets, N. Noiberher, D. Tsyplenkov: M-vo osvity i nauky Ukrainy, Nats. hirn. un-t. – D.: NHU, 2015. – 335 s.
2. Tarasov S.V., Molotkov O.N. Stabilizatsiia obertannia rotora Darie sumisnymi zminamy dovzhyny lopatei i travers. Tekhnichna mekhanika, 2024, № 2, s. 92–105. <https://doi.org/10.15407/itm2024.02.092>.
3. Melício R., Mendes V.M.F., Catalão J.P.S. Fractional order control and simulation of wind energy systems with PMSG/full-power converter topology. [Інтернет ресурс] Energy Conversion and Management - June 2010. - DOI: 10.1016/j.enconman.2009.12.036

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТА ОЦІНКА ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ КОЛОНИ ПОВОРОТНОЇ ТУРЕЛІ МБЛЗ

Кононов Д.О.¹ [ORCID], Ціколія А. З.² [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, України

²Український державний університет науки і технологій, аспірант, України

Анотація. Робота присвячена актуальному питанню продовження експлуатаційного ресурсу критичного обладнання сталеплавильного виробництва — головної колони поворотної турелі МБЛЗ. На основі технічної документації компанії *Primetals Technologies* [4,5] для заводу *Voestalpine* виконано дослідження напружено-деформованого стану колони при її відновленні до ремонтних розмірів. Особливу увагу приділено специфіці роботи вузла як демпфуючого пристрою, що піддається циклічним навантаженням під час підйому та опускання стальковшів. Обґрунтовано можливість використання переточування колони замість виготовлення нового дороговартісного виробу, що забезпечує значний економічний ефект при збереженні нормативних запасів втомної міцності.

Ключові слова: МБЛЗ, поворотна турель, втомна міцність, продовження ресурсу, МСЕ-аналіз.

Мета роботи: Оцінка технічної можливості продовження експлуатаційного ресурсу колони поворотної турелі МБЛЗ шляхом механічного відновлення її поверхонь та обґрунтування безпеки експлуатації при змінених геометричних параметрах на основі аналізу НДС та втомної міцності [1,2].

Постановка проблеми. Поворотний вал (Ladle Turret) є ключовою ланкою в ланцюгу безперервного лиття, що працює в умовах екстремальних навантажень. Конструктивна особливість даного вузла полягає в тому, що колона разом із повними сталь-ковшами здійснює вертикальні переміщення, виконуючи роль демпфуючого пристрою. Внаслідок такого режиму роботи в зоні підшипників ковзання виникають задири та дефекти поверхні глибиною до 1,0 мм.

Після напрацювання проектного ресурсу у 200 000 циклів виникає альтернатива: повна заміна колони або її відновлення шляхом механічної обробки. Виготовлення нової деталі таких габаритів є складним та фінансово витратним процесом, тому обґрунтування безпеки експлуатації колони після переточування до ремонтних діаметрів є критично важливим для виробництва.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводилося на основі робочої документації поворотної турелі типу TSC 4. Для аналізу використано сталь марки 25CrMo4, що пройшла покращення (гартування з відпуском), з мінімальною межею плинності 400 МПа.

Моделювання виконано в середовищі Solid Edge Simulation [6] для двох сценаріїв: стан турелі на початку експлуатації ($\varnothing$ 1027/1030 мм) та варіанту після переточування до ремонтних розмірів ($\varnothing$ 1025/1028 мм). Розрахунок проводився для найбільш несприятливого випадку одностороннього навантаження повним ковшем, що створює максимальні згинальні моменти.

Результати чисельного моделювання (Рис. 1) показали, що після зняття пошкодженого шару металу в зонах концентрації напружень еквівалентні напруження становлять близько 200 МПа. Хоча дане значення є вагомим для умов втомного навантаження, порівняння з допустимими напруженнями для даного класу сталі та врахування фактичного стану металу вказують на можливість безпечної подальшої експлуатації.

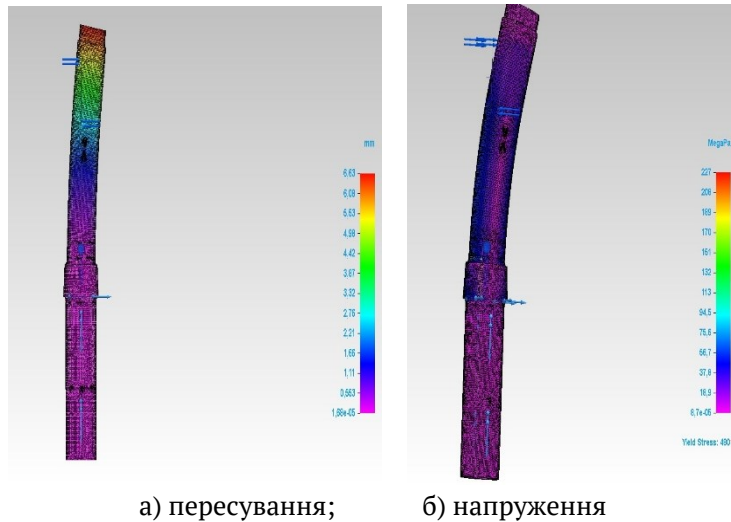


Рисунок 1 — Максимальне переміщення та напруження

Аналітична перевірка втомної міцності підтвердила, що навіть при зменшенні перерізу колони, розрахунковий запас залишається вищим за нормативні вимоги для даного класу обладнання. Це дозволяє впевнено стверджувати про можливість безпечного напрацювання додаткового ресурсу за умови забезпечення шорсткості поверхні $Ra\ 1,6$ та відсутності гострих переходів у зонах обробки.

Висновки

Проведене дослідження підтверджує технічну та економічну доцільність відновлення ресурсу головної колони поворотної турелі МБЛЗ через переточування її поверхонь. Основним перевагою запропонованого підходу є відсутність потреби у виготовленні нової колони, що суттєво скорочує витрати та час на ремонтні роботи. За результатами МСЕ-аналізу встановлено, що ремонтні діаметри забезпечують достатню жорсткість та міцність конструкції. Ключовою рекомендацією для практичної реалізації є проведення обов'язкового NDT-контролю (УЗК) перед початком робіт для підтвердження відсутності втомних тріщин, які могли утворитися протягом перших 200 000 циклів експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Bilodidenko, S., et al. (2023). Residual life extension of metallurgical equipment. Springer. doi.org/10.1007/s44245-023-00017-4

2. Yue, H. L., Zou, J. X., & Lu, Q. (2012). Stress Analysis and Structure Improvement on Arm of Ladle Turret. *Advanced Materials Research*, 597, 336–339. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.433-440.5896
3. Shigley, J. E., & Budynas, R. G. (2015). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill Education. Tenth edition. ISBN 978-0-07-339820-4. https://www.academia.edu/41819063/Shigleys_2015_Mechanical_Engineering_Design_10th_Ed
4. Primetals Technical Documentation: Column Unit Support Column VKD.CV.2111-M1001/DLZ001.
5. [Electronic resource] – URL:<https://www.primetals.com/en/>
6. [Electronic resource] – URL:<https://solidedge.siemens.com>

RESEARCH OF STRESS-STRAIN STATE AND FATIGUE STRENGTH EVALUATION OF A LADLE TURRET COLUMN

Dmytro Kononov, Anzor Tsikolia

Abstract. *The paper addresses the urgent issue of extending the operational life of critical steelmaking equipment — the main column of a Continuous Casting Machine (CCM) ladle turret. Based on the actual technical documentation of Primetals Technologies for the Voestalpine plant, a study of the column's stress-strain state during its restoration to repair dimensions was performed. Particular attention is paid to the specifics of the unit's operation as a damping device subjected to cyclic loads during the lifting and lowering of steel ladles. The feasibility of using column re-machining instead of manufacturing a new expensive product is justified, which provides a significant economic effect while maintaining normative fatigue strength reserves.*

Keywords: CCM, ladle turret, fatigue strength, life extension, FEA-analysis, Primetals.

Objective: Evaluation of the technical feasibility of extending the operational life of a ladle turret column by mechanical restoration of its surfaces and justification of operational safety with changed geometric parameters based on stress-strain state and fatigue strength analysis.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЗАПУСКУ РІДИННИХ РАКЕТНИХ ДВИГУНІВ

Чернявський О.С.¹ [ORCID], Долгополов С.І.² [ORCID], Шевченко С.А.³ [ORCID]

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, аспірант, Україна

²Інститут технічної механіки Національної академії наук України, Державного
космічного агентства України, к.т.н., ст. наук. співробітник, Україна

³Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України,
к.т.н., Україна

Анотація. Розглянуто низку складних фізичних процесів та явищ, що супроводжують запуск рідинних ракетних двигунів (РРД). Експериментально-розрахунковим методом визначено характеристики кавітаційних течій у насосах РРД та розроблено математичну модель кавітуючих насосів. Для математичного моделювання явищ запізнення газоутворення компонентів палива та перебування продуктів згоряння у газових трактах РРД застосовано наближену заміну рівнянь із запізнюваннями звичайними диференціальними рівняннями. Для опису хвильових процесів у протяжних розгалужених гідравлічних трактах багатодвигунних установок використовується підхід, що ґрунтується на імпедансному методі і передбачає узгодження частотних характеристик гідравлічних трактів як систем з розподіленими та зосередженими параметрами. Для гідравлічної системи змінної структури розглянуто кілька конфігурацій, які реалізуються на різних етапах її роботи. Тому актуальним є розроблення математичної моделі динамічних процесів у зворотному клапані, для верифікації якої використано результати CFD-розрахунків розподілу тиску на поверхні тарілки запірного органу. Математичне моделювання запуску РРД з використанням розроблених математичних моделей дозволило уточнити характеристики перехідного процесу при запуску РРД.

Ключові слова: рідинний ракетний двигун, запуск, кавітація в насосах, запізнення газоутворення та перебування продуктів згоряння, система живлення змінної структури, розгалужений гідравлічний тракт, математичне моделювання

Запуск рідинних ракетних двигунів (РРД) включає низку різноманітних складних фізичних процесів та явищ. До них можна віднести заповнення гідравлічних трактів кріогенними компонентами палива, накопичення та займання компонентів палива в газогенераторі та камері згоряння, процеси

динамічної розкрутки турбонасосного агрегату, хвильові процеси у протяжних розгалужених гідравлічних трактах багатодвигунних установок тощо. У даній роботі розглянуто математичне моделювання низки найбільш значимих динамічних процесів, які мають визначальний вплив на характеристики перехідних процесів під час запуску РРД. До них відносяться кавітаційні явища в насосах РРД; явища запізнення газоутворення компонентів палива та перебування продуктів згоряння у газогенераторі та камері згоряння; хвильові процеси у протяжних розгалужених гідравлічних трактах багатодвигунних установок; динамічні процеси під час роботи зворотних клапанів у гідравлічних системах змінної структури. Метою роботи є дослідження складних та різноманітних динамічних процесів при запуску РРД.

Кавітаційні явища у насосах РРД не тільки змінюють енергетичні характеристики насосів, але також впливають на динаміку двигуна [1]. Визначення характеристик кавітаційних течій у насосах РРД теоретичним шляхом зараз не поширено через незадовільну узгодженість результатів теоретичних і експериментальних досліджень. Тому використовуються підходи з залученням експериментальних даних. Актуальним є визначення коефіцієнтів гідродинамічної моделі кавітуючих насосів РРД на основі експериментальних частот кавітаційних коливань та границь областей існування кавітаційних автоколивань. При визначенні пружності кавітаційних каверн і від'ємного опору кавітаційних каверн були використані експериментальні частоти кавітаційних коливань у 26 насосах РРД різної розмірності і продуктивності. При визначенні коефіцієнта розподілу кавітаційного опору та кавітаційного запізнення були додатково використані границі експериментальних областей існування кавітаційних автоколивань 14 насосів. Із залученням зазначених коефіцієнтів гідродинамічної моделі розроблено математичну модель кавітуючих насосів РРД. Математичне моделювання запуску РРД з використанням цієї моделі дозволило уточнити характеристики перехідного процесу при запуску РРД.

Для математичного моделювання явищ запізнення газоутворення компонентів палива та перебування продуктів згоряння у газогенераторі та

камері згоряння використовувалася наближена заміна рівнянь із запізнюваннями математичної моделі низькочастотної динаміки газових трактів РРД звичайними диференціальними рівняннями. Для апроксимації передавальних функцій ланок запізнення запропоновані дробово-раціональні функції, побудовані з урахуванням особливостей розрахунку перехідних процесів при запуску РРД. На основі розрахунку частотних характеристик РРД з допалюванням генераторного газу та перехідних процесів при запуску РРД проведено тестування запропонованих апроксимантів. Показано, що запізнення в рівняннях динаміки газогенератора і газоводу РРД з допалюванням генераторного газу мають помітний вплив на характеристики перехідних процесів при запуску РРД, а використання запропонованих апроксимантів для урахування цих запізнювань дозволяє підвищити точність результатів математичного моделювання.

Математичне моделювання низькочастотної динаміки рідини в трубопровідних системах ґрунтується на розв'язанні диференціальних рівнянь неусталеного руху та нерозривності рідини у частинних похідних. Для опису хвильових процесів у протяжних розгалужених гідравлічних трактах багатодвигунних установок та у стендових системах використовується підхід, що ґрунтується на імпедансному методі. Він складається з двох етапів при визначенні перехідних процесів у гідравлічній системі. На першому етапі визначаються частотні характеристики гідравлічної досліджуваної системи як системи з розподіленими параметрами. Далі складається математична модель із зосередженими параметрами, коефіцієнти якої задаються таким чином, щоб частотні характеристики систем з розподіленими та зосередженими параметрами узгоджувалися із заданою точністю у певному частотному діапазоні. Математична модель із зосередженими параметрами вже безпосередньо використовується для визначення перехідних процесів у гідравлічній системі.

Для гідравлічної системи змінної структури представлений підхід вимагає уточнення. Пропонується розглянути кілька конфігурацій такої системи, які реалізуються на різних етапах її роботи [2]. Перехід від однієї конфігурації до

іншої здійснюється під час моделювання процесу запуску або за рахунок роботи системи зворотних клапанів, або примусово – шляхом програмного закриття одних і відкриття інших клапанів. В зв'язку з цим актуальним є розроблення математичної моделі динамічних процесів у зворотному клапані. Для верифікації цієї моделі використано результати CFD-розрахунків розподілу тиску на поверхні тарілки запірного органу [3]. Для визначення сили дії потоку на тарілку клапана запропоновано підхід у наближенні із зосередженими параметрами, який ґрунтується на балансі витрат робочої рідини у проточній частині клапана. Розглянуто потік у радіальному напрямку на вході клапана, який залежить від ходу тарілки, та потік на периферії запірного органу, у вузькій щілині між корпусом і тарілкою. Для реалізації цього підходу достатньо знати геометричні характеристик клапана та значення коефіцієнтів витрати, які приймаються постійними.

На основі математичного моделювання продемонстровано задовільну роботу системи живлення змінної структури тестового двигуна з допалюванням генераторного газу. Показано стабільну подачу компонентів палива в газогенератор і камеру згоряння при перемиканні живлення від пускового бачка на живлення від насоса для обраної циклограми запуску. Запропоновано конструктивні та схемні рішення для оптимізації роботи зворотних клапанів у гідравлічній системі живлення паливом змінної структури.

Висновки

Розглянуто низку складних фізичних процесів та явищ при запуску РРД. Експериментально-розрахунковим способом визначено характеристики кавітаційних течій у насосах РРД та розроблено математичну модель кавітуючих насосів РРД. Математичне моделювання запуску РРД з використанням цієї моделі дозволило уточнити характеристики перехідного процесу при запуску РРД.

Для математичного моделювання явищ запізнення газоутворення компонентів палива та перебування продуктів згоряння у газогенераторі та камері згоряння використовувалася наближена заміна рівнянь із

запізнюваннями математичної моделі низькочастотної динаміки газових трактів РРД звичайними диференціальними рівняннями. Показано, що запізнення в рівняннях динаміки газогенератора і газоводу РРД з допалюванням генераторного газу мають помітний вплив на характеристики перехідних процесів при запуску РРД, а використання запропонованих апроксимантів для урахування цих запізнювань дозволяє підвищити точність результатів математичного моделювання.

Для опису хвильових процесів у протяжних розгалужених гідравлічних трактах багатодвигунних установок та у стендових системах використовується підхід, що ґрунтується на імпедансному методі і передбачає узгодження частотних характеристик гідравлічних трактів як систем з розподіленими та зосередженими параметрами.

Для гідравлічної системи змінної структури представлений підхід вимагає уточнення. Пропонується розглянути кілька конфігурацій такої системи, які реалізуються на різних етапах її роботи. В зв'язку з цим актуальним є розроблення математичної моделі динамічних процесів у зворотному клапані. Для верифікації цієї моделі використано результати CFD-розрахунків розподілу тиску на поверхні тарілки запірного органу. На основі математичного моделювання продемонстровано задовільну роботу системи живлення змінної структури тестового двигуна з допалюванням генераторного газу.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

- 1 Dolgoplov, S. I. Generalization of Experimental Elasticity of Cavitation Bubbles in LRE Pumps that Differ Significantly in Size and Performance. *Sci. innov.* 2023. 19(5), 71–88. <https://doi.org/10.15407/scine19.05.071>
2. Dolgoplov S., Cherniavskiy O., Shevchenko S. Mathematical modeling of dynamic processes in the branched reconfigurable fuel feed system of a liquid-propellant rocket engine. *CEAS Space Journal*. 2025. p. 14. <https://doi.org/10.1007/s12567-025-00691-y>
3. Cherniavskiy O. S., Dolgoplov S. I., Shevchenko S. A. Modeling of a check valve operation in the reconfigurable hydraulic feed system of a liquid rocket engine. *Техн. мех.* 2025. № 4. С. 19–30. <https://doi.org/10.15407/itm2025.04.019>

MATHEMATICAL MODELING OF COMPLEX DYNAMIC PROCESSES DURING LIQUID-PROPELLANT ROCKET ENGINES START-UP

O. Cherniavskyi, S. Dolgoplov, S. Shevchenko

Abstract. *A number of complex physical processes and phenomena occurring during the start-up of liquid-propellant rocket engines (LPREs) are considered. The characteristics of cavitating flows in LPRE pumps are determined using an experimental–computational approach, and a mathematical model of cavitating pumps is developed. For mathematical modeling of the delay in propellant gasification and the residence time of combustion products in LPRE gas paths, an approximate replacement of delay-differential equations in the dynamic model of gas paths by ordinary differential equations is employed. To describe wave processes in extended branched hydraulic lines of multi-engine systems, an approach based on the impedance method is used, which involves matching the frequency characteristics of hydraulic lines represented as distributed- and lumped-parameter systems. For a reconfigurable hydraulic system, several configurations corresponding to different stages of its operation are considered. In this regard, a mathematical model of dynamic processes in a check valve is developed, and its verification is performed using CFD simulation results of pressure distribution over the valve poppet surface. Mathematical modeling of LPRE start-up using the developed models makes it possible to refine the characteristics of the transient processes during engine start-up.*

Keywords: *liquid-propellant rocket engine, start-up, pump cavitation, propellant gasification delay, combustion product residence time, reconfigurable feed system, branched hydraulic line, mathematical modeling.*

ПРО ОДИН ПІДХІД ДО СТВОРЕННЯ ЕФЕКТИВНОГО АЛГОРИТМУ ВИКОНАННЯ СКЛАДНОЇ ОПЕРАЦІЇ У СИСТЕМІ ЗАЛИШКОВИХ КЛАСІВ

Поліський Ю. Д. [ORCID]

Науково-дослідний інститут автоматизації чорної металургії, к.т.н., с.н.с.,
заслужений винахідник України, України

Анотація. Обробка даних в непозиційній системі числення залишкових класів дозволяє істотно підвищити швидкодію обчислювальних операцій. Метою роботи є дослідження одного підходу до створення ефективного алгоритму виконання складної операції порівняння чисел та саме порівняння чисел за цим підходом. Порівняння поточного стану керованого об'єкта системи із станом об'єкта, заданим алгоритмом функціонування, є предметом розв'язання будь-якого завдання управління. Системний аналіз, теорія чисел та китайська теорема про залишки є інструментами методології дослідження. Підхід базується на представленні кожного із чисел як суми неповної частки та залишку по даному модулю. Саме ж порівняння представляє собою ітераційний процес зіставлення на кожній ітерації величин складових вказаних сум, за результатами якого вибираються дії на наступній ітерації. Даний підхід доцільно розглядати в якості одного з напрямків дослідження шляхів підвищення ефективності обчислень.

Ключові слова: залишкові класи, системи модулів, інтервал, порівняння чисел, ітерації

Вступ. Створення ефективних обчислювальних структур пов'язане з паралельним обробленням даних системами з нетрадиційними способами кодування інформації, зокрема системою числення в залишкових класах. Системою залишкових класів [1] називається система числення, у якій довільне число N представляється як набір найменших невід'ємних залишків по модулях $m_1, m_2, \dots, m_n$, тобто $N = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$. Тут $\alpha_i = N \pmod{m_i}$. При цьому, якщо числа m_i попарно взаємно прості, то такому представленню відповідає тільки одне число N інтервалу $[0, M-1]$, де $M = m_1 m_2 \dots m_n$.

Перевага такого представлення чисел полягає в тому, що операції додавання, віднімання та множення, так звані модульні операції, виконуються досить просто, наприклад, для $N_1 = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ та $N_2 = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$

$$\begin{aligned}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) + (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n) &= (\alpha_1 + \beta_1) \pmod{m_1}, \dots, (\alpha_n + \beta_n) \pmod{m_n} \\(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) - (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n) &= (\alpha_1 - \beta_1) \pmod{m_1}, \dots, (\alpha_n - \beta_n) \pmod{m_n} \\(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \times (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n) &= (\alpha_1 \times \beta_1) \pmod{m_1}, \dots, (\alpha_n \times \beta_n) \pmod{m_n}\end{aligned}$$

Основний матеріал. Недоліки системи залишкових класів обумовлені труднощами при реалізації не модульних операцій. У багатьох обчислювальних завданнях, що виконуються в системі залишкових класів, однією з найбільш трудомістких не модульних операцій є операція порівняння чисел.

Порівняння поточного стану керованого об'єкта системи із станом об'єкта, заданим алгоритмом функціонування, є предметом розв'язання будь-якого завдання управління. Цілі порівняння включають виявлення факту збігу або розбіжності значень величин, що відображають стан об'єкта, та оцінку ступеня розбіжності.

Для кожного модуля системи модулів $m_1, m_2, \dots, m_n$ число N є сумою неповної частки $Q = k \cdot m$ та залишку по модулю $\alpha = N \pmod{m}$, тобто $N = Q_1 + \alpha_1, N = Q_2 + \alpha_2, \dots, N = Q_n + \alpha_n$

Нехай порівнюються числа $N_1 = Q(N1) + \alpha_1$ та $N_2 = Q(N2) + \beta_1$. За алгоритмом порівняння чисел у системі залишкових класів, вперше запропонованим [2], одночасно створюються числа $Q(N1) = N_1 - \alpha_1$ та $Q(N2) = N_2 - \beta_1$. Нехай $R(1)$ - результат порівняння на першій ітерації. Якщо

$$R(1) = \begin{cases} N_1 > N_2, (Q(N1) = Q(N2)) \cap (\alpha_1 > \beta_1) \\ N_1 < N_2, (Q(N1) = Q(N2)) \cap (\alpha_1 < \beta_1) \\ N_1 = N_2, (Q(N1) = Q(N2)) \cap (\alpha_1 = \beta_1) \end{cases},$$

процес порівняння на цьому завершується. Якщо ж $Q(N1) \neq Q(N2)$, то співвідношення α_1, β_1 , запам'ятовується.

На другій ітерації одночасно виконуються операції $E_1 = \frac{Q(N1)}{m_1} = Q(\bar{N}1)m_2 + \bar{\alpha}$ та $E_2 = \frac{Q(N2)}{m_1} = Q(\bar{N}2)m_2 + \bar{\beta}$ та створюються числа $Q(\bar{N}1) = E_1 - \bar{\alpha}$ та $Q(\bar{N}2) = E_2 - \bar{\beta}$.

Якщо при цьому $Q(\bar{N}1) = Q(\bar{N}2)$ та $\bar{\alpha} < \bar{\beta}$, то перевага віддається останньому співвідношенню, та $\tilde{N}_1 < \tilde{N}_2$. Якщо ж $Q(\bar{N}1) = Q(\bar{N}2)$ та $\bar{\alpha} = \bar{\beta}$, то про результат

порівняння судять по запам'ятованому співвідношенню $\alpha_1 \cdot \beta_1$, та процес порівняння на цьому завершується.

Якщо на жодній із ітерацій не виявляється $Q(\bar{N}1)=Q(\bar{N}2)$, про результат порівняння судять по співвідношенню $\bar{\alpha} \cdot \bar{\beta}$ на попередній ітерації, та процес порівняння на цьому завершується.

Висновки. Таким чином, досліджений новий підхід до створення ефективного алгоритму порівняння чисел в системі залишкових класів. Підхід базується на представленні кожного із чисел як суми неповної частки та залишку по модулю. Саме ж порівняння представляє собою ітераційний процес зіставлення величин вказаних сум, що значно прискорює швидкодію обчислювань.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

- 1.Akushskiy I.Ya., Yuditskiy D.I. Mashinnaya arifmetika v ostatochnykh klassakh. M.: Sovetskoye radio. 1968. 440 s
- 2.Faktorovich M.G., Polisskiy Yu.D. Ustroystvo dlya sravneniya chisel, predstavlennykh v sisteme ostatochnykh klassov. Avt. svid. SSSR №608155 M. Kl.2 G06 F 7/04, 1976.

ON ONE APPROACH TO CREATING AN EFFICIENT ALGORITHM FOR PERFORMING A COMPLEX OPERATION IN THE SYSTEM OF RESIDUE CLASSES

Yuriy Polissky

Abstract. Data processing in the non-positional number system of residual classes allows to significantly increase the speed of computational operations. The purpose of the work is to study a new approach to creating an effective algorithm for performing a complex operation of comparing numbers and comparing numbers using this approach. Comparison of the current state of the controlled object of the system with the state of the object specified by the functioning algorithm is the subject of solving any control problem. System analysis, number theory and the Chinese residue theorem are tools of the research methodology. The approach is based on representing each number as the sum of the incomplete fraction and the remainder for a given modulus. The comparison itself is an iterative process of comparing the values of the components of the specified sums at each iteration, the results of which are used to select actions for the next iteration. This approach should be considered as one of the directions of research into ways to increase the efficiency of calculations.

Keywords: residue classes, moduli systems, interval, number comparison, iterations

НОВІ АЛГОРИТМИ ЛОГІКО-ДИНАМІЧНЕ УПРАВЛІННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ ЗНАЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Миргород В.Ф.¹, Гвоздева І.М.², Грама Г.П.³.

¹Національний університет “Одеська морська академія”, д.т.н, доцент. Україна

²Національний університет “Одеська морська академія”, д.т.н., професор. Україна

³Національний університет “Одеська морська академія”, к.п.н, доцент. Україна

Анотація. Пропонується підхід щодо побудови нових принципів управління складними багатовимірними енергетичними об'єктами, вихідні контрольовані та регульовані змінні яких мають різноманітну фізичну природу. Встановлено, що традиційні методи багатозв'язаного регулювання відповідними автоматичними системами при незначній множині регулюючих впливів мають суттєві недоліки та обмеження. Узагальнено опис вказаного типу систем та запропоновані нові принципи логіко – динамічного керування такими об'єктами. Пропонований підхід ілюстрований на прикладі складного енергетичного об'єкту у вигляді вітроенергетичної установки великої потужності турбогенераторного типу. Сутність пропонованого підходу складає формування логіко – динамічного управління багатовимірним об'єктом обмеженою множиною керуючих впливів шляхом відбору найбільш важливих та небезпечних чинників, що впливають на його стан та рух у просторі змінних стану. Встановлено за допомогою комп'ютерного експерименту, що при використанні пропонованих законів керування, у порівнянні з традиційними, має місце покращення техніко - економічних характеристик та спрощення алгоритмічного забезпечення.

Ключові слова. математичне моделювання, системи управління багатовимірними об'єктами, автоматичне керування, вітроенергетична установка, комп'ютерний експеримент

Постановка проблеми. Питання використання відновлюваних джерел енергії є актуальною та важливою для промислового комплексу України. Поряд з використанням відносно малопотужних вітроенергетичних установок (ВЕУ) для загальних потреб, важливе значення має побудова та використання економічних агрегатів великої одиничної потужності промислового значення. Такі ВЕУ розроблені і побудовані в Україні ПКТБ «Конкорд» (м. Дніпро), зокрема ВЕУ турбогенераторного типу потужністю 0,75 МВт та спроектована ВЕУ потужністю більше ніж 1 МВт. Комплекс інформаційно-вимірювальних та

управляючих систем для вказаної ВЕУ створений в АТ «Елемент» (м. Одеса). Новий тип енергетичних об'єктів потребує розробки відповідних математичних моделей зміни стану, методів та алгоритмів керованої зміни стану за відповідних умов функціонування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розрахунок основних параметрів ВЕУ та усталених режимів її функціонування базується на відомих співвідношеннях перетворення енергії вітрового потоку в механічну енергію обертів вітроколеса. Особливість ВЕУ турбогенераторного типу складається в розміщенні турбогенераторів безпосередньо на лопатях вітроколеса майже перпендикулярно вітрового потоку, що створюється вітроколесом великого діаметру. Таке рішення забезпечує значний та стабільний вітровий напір, за умови підтримання стабільних обертів вітроколеса. Стабільність таких обертів забезпечує система зміни кута повороту лопатей вітроколеса. Техніко-економічне обґрунтування турбогенераторної ВЕУ наведено в [1], і воно ґрунтується на розгляді рівнянь балансу потужності. Динамічні режими вказаного складного енергетичного об'єкту детально розглянуті в роботах авторів [2, 6] на основі побудови математичних моделей обертового руху складових ВЕУ з урахуванням характеристик швидкохідності вітроколеса та гвинтів турбогенераторів. Загальні принципи побудови ВЕУ представлені в роботах [3,4,5]. Проблемним питанням є обґрунтування алгоритмів управління ВЕУ, що забезпечують ефективне та безпечне її функціонування в умовах непередбачуваного збурення у вигляді змінної швидкості вітру.

Мета роботи полягає у розробці та обґрунтуванні нових алгоритмів керування рухом ВЕУ вказаного типу на основі принципів логіко – динамічного управління.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Математичний опис руху ВЕУ турбогенераторного типу.

Відповідно [2] рівняння динаміки ВЕУ турбогенераторного типу мають наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} &= \frac{\pi}{2} \rho(T_H, P_H) [C_{n1}(\omega_1 R_1 / V_0, \delta)] \times \\ &\times R_1^2 V_0^3 / \omega_1 - \frac{3\pi}{2} \rho(T_H, P_H) [C_{t2}(\omega_2 R_{20} / V_2)] \times \\ &\times R_{20}^2 R_2 V_2^2 \cos \alpha - M_{C1}(\omega_1, T_H), \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} &= \frac{\pi}{2} \rho(T_H, P_H) [C_{n2}(\omega_2 R_{20} / V_2)] \times \\ &\times R_{20}^2 V_2^3 / \omega_2 - M_H(S, I) - M_{C2}(\omega_2, T_H), \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де R_1 – радіус вітроколеса (ВК), R_{20} – радіус гвинтів турбомашин, R_2 – радіус точки встановлення турбомашин на лопаті ВК, $\rho(T_H, P_H)$ – щільність повітря, що залежить від температури T_H та атмосферного тиску P_H , V_0 – середня швидкість середня скорості вітрового потоку, V_2 – швидкість вітрового потоку на гвинтах турбомашин, α – кут встановлення турбомашин, J_1 – момент інерції вітроколеса, z_1 – швидкохідність вітроколеса, $z_1 = \omega_1 R_1 / V_0$, z_2 – швидкохідність гвинтів турбомашин, $z_2 = \omega_2 R_{20} / V_2$, $C_{n1}(z_1, \delta)$ – розрахункові характеристики коефіцієнту потужності вітроколеса, $C_{n2}(z_2)$ – розрахункові характеристики коефіцієнту потужності гвинтів турбомашин; $C_{t2}(z_2)$ – розрахункові характеристики коефіцієнту вісєвої сили гвинтів турбомашин; M_H – момент навантаження, зокрема генераторний момент, що залежить від струму навантаження I , M_{C1} – момент супротиву, δ – кут повороту лопатей вітроколеса.

Проблемні питання управління рухом БЕУ турбогенераторного типу.

За математичним описом БЕУ як об'єкту управління може бути безпосередньо встановлено, що вихідними регульованими координатами є безпосередньо кутова швидкість обертання вітроколеса та можлива отримана потужність, яка є змінною за причиною зміни швидкості вітру. Стабілізація кутової швидкості обертання вітроколеса забезпечує стабільний і значний повітряний потік на гвинти турбомашин, що дає змогу мати їх постійні оберти необхідної величини і, тим самим, можливість безпосереднього підключення генераторів турбомашин в промислову мережу «нескінченної» потужності. Таке рішення значно спрощує електроенергетичну частину БЕУ і надає суттєвий техніко – економічний ефект. Власне сутність конструктивного

рішення ВЕУ турбогенераторного типу спрямована на саме досягнення вказаних техніко – економічних переваг.

Але, за пропонованим рішенням, виникають проблемні питання стабілізації, регулювання та обмеження вихідних змінних такого складного енергетичного об'єкту. Найбільш важливим є питання регулювання та обмеження вихідних змінних за допомогою тільки одного регулюючого впливу, а саме – кута повороту лопатей вітроколеса.

По – перше, регулювання кутової швидкості вітроколеса:

По – друге, регулювання (обмеження) потужності:

По – третє, обмеження динамічних моментів навантаження:

Додатковим, і ще дискусійним питанням є встановлення запасів аеродинамічної стійкості ВЕУ та управління за заздалегідь визначеними такими запасами.

Відомі пропоновані рішення багатовимірного керування засновані на сучасній теорії управління та засновані на зваженому об'єднанні похибок регулювання в один керуючий вплив. Зважене об'єднання похибок регулювання потребує нормування відносно максимального значення збурень, яке, заздалегідь не може бути відомим. Крім того, слід зазначити, що інтегральна складова в оптимальних регуляторах не може бути теоретично обґрунтованою.

Робочі характеристики ВЕУ ТГ – 750 представлені на Рис. 1.

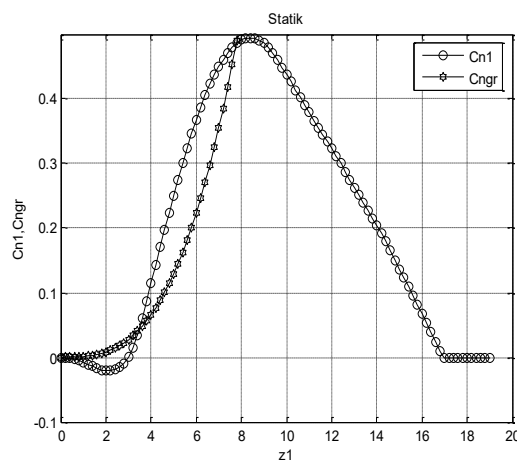


Рисунок - 1. Характеристики ВЕУ турбогенераторного типу

Пропоновані рішення управління рухом ВЕУ турбогенераторного типу.

Пропоновані рішення управління рухом ВЕУ турбогенераторного типу засновані на вимогах забезпечення ефективної експлуатації та безпеки функціонування.

Регулювання кутової швидкості вітроколеса

Стабілізація швидкості обертів вітроколеса при змінному вітровому потоку не забезпечує максимальне значення наявної потужності, що може бути отримано зміною кута повороту лопатей. Крім того, робота на лінії оптимального кута повороту лопаті забезпечує кращу динаміку розгону вітроколеса, що може знизити порогове значення швидкості вітру

Таким чином, пропонований логіко – динамічний алгоритм управління обертами вітроколеса може бути запропонований в наступному вигляді (рис. 1.):

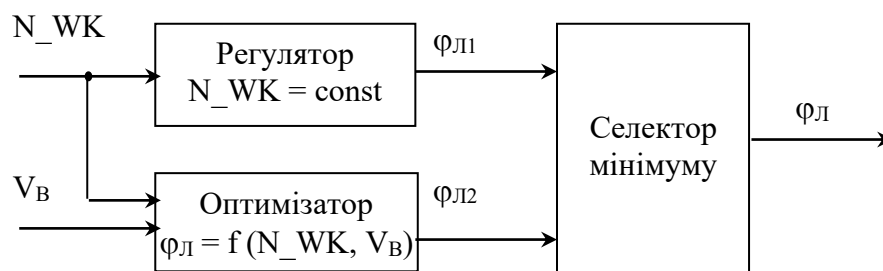


Рисунок 1 - Структурна схема керуючого пристрою.

На рисунку позначені: N_{WK} – значення обертів вітроколеса; V_B - швидкість вітру, що вимірюється власною метеостанцією; кут повороту лопатей вітроколеса ϕ_L .

Захист від перенавантаження крутного моменту

На лопаті вітроколеса діють декілька моментів. у тому числі зустрічно направлений крутний момент та момент супротиву повітря. Вказані моменти залежать від кутового положення лопатей. Тому є необхідним уведення в систему керування ВЕУ алгоритмів обмеження моментів, що діють на лопаті, за допомогою обмежень кута повороту лопатей.

Обмеження моменту при скиді навантаження або зупинці може бути запропонований у вигляді наступного логіко - динамічного алгоритму (рис. 2).

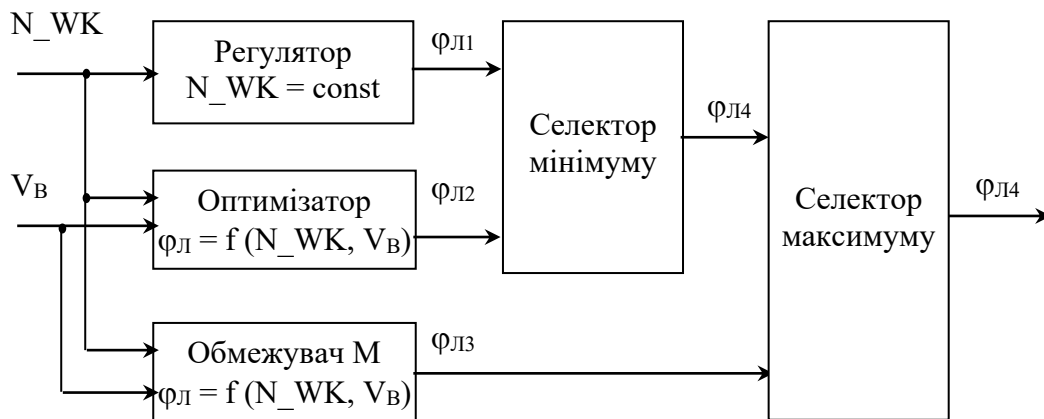


Рисунок - 2 Структурна схема керуючого пристрою з обмеженням моменту

Результати моделювання

Результати моделювання динаміки ВЕУ в різних режимах за пропонуваними алгоритмами керування представлені на Рис.3

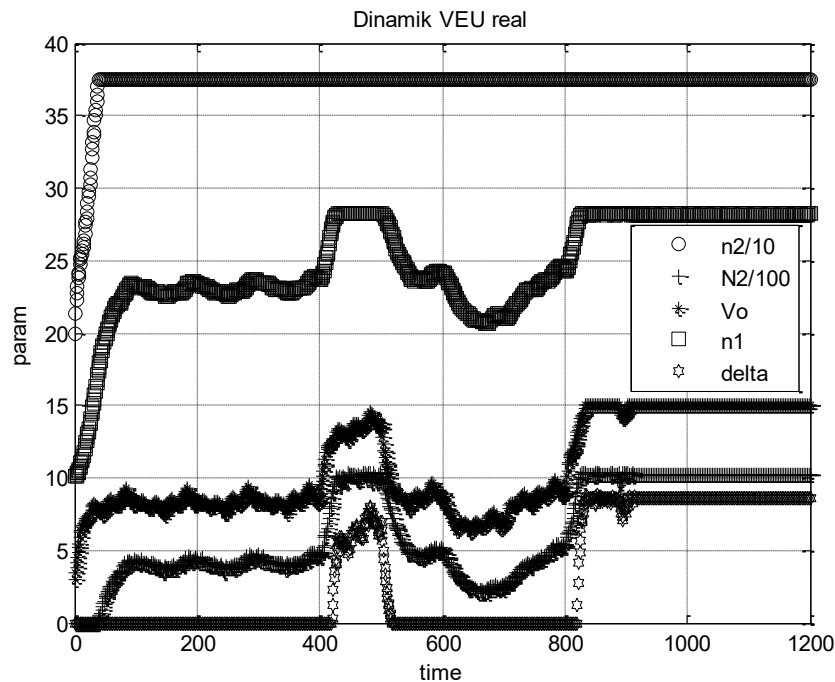


Рисунок - 3 Зіна параметрів ВЕУ в режимі роботи паралельно з мережею для реального вітрового потоку та обмежувача потужності.

На рисунку позначені: n1 – оберти вітроколеса; n2 – оберти віротурбін;
N2 - споживана потужність; V0 – швидкість вітру; delta – кут повороту лопатей вітроколеса.

Висновки

Обґрунтовано підхід щодо побудови нових принципів управління складними багатовимірними енергетичними об'єктами, вихідні контрольовані та регульовані змінні яких мають різноманітну фізичну природу. Встановлено, що традиційні методи багатозв'язаного регулювання відповідними

автоматичними системами при незначній множині регулюючих впливів мають суттєві недоліки та обмеження. Узагальнено опис вказаного типу систем та запропоновані нові принципи логіко – динамічного керування такими об'єктами. Пропонований підхід ілюстрований на прикладі складного енергетичного об'єкту у вигляді вітроенергетичної установки великої потужності турбогенераторного типу. Сутність пропонованого підходу складає формування логіко – динамічного управління багатовимірним об'єктом обмеженою множиною керуючих впливів шляхом відбору найбільш важливих та небезпечних чинників, що впливають на його стан та рух у просторі змінних стану.

Встановлено за допомогою комп'ютерного експерименту, що при використанні пропонованих законів керування, у порівнянні з традиційними, має місце покращення техніко - економічних характеристик та спрощення алгоритмічного забезпечення.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Golubenko N.S., Aerodynamic features of multiplierless turbogenerator circuit of the high-powered wind-driven powerplant // Materials of IV international conference "Nontraditional energetics in XXI century". – Crimea, Gurzuf, 2003. – P. 125–132. [in Russian]
2. Mirgorod V.F., Ranchenko G.S, Golubenko N.S. Modelling the dynamic modes of high-powered wind-driven powerplant // Air-space technique and technology. – 4(30). – 2006. – P. 96–99. [in Russian]
3. Tsvadze John, Weir A.D. Renewable energy resources. – M.: Energoatomizdat, 1990. – 392 p. [in Russian]
4. Shefter Ya.I. Using of wind energy. – M.: Energoatomizdat, 1983. – 200 p. [in Russian]
5. Johnson G. Wind Energy System. – N.Y: Prentice Hall, 1985. – 421 p. [in English]
6. Gvozdeva I.M. Preobrazovanie matematicheskoi modeli dinamiki vetroenergeticheskoi ustanovki k normirovanoi forme / Gvozdeva I.M. , Mirgorod V.F., Dereng Ye.V., Polishchuk P.I., Glazeva O.V. // «Elektromekhanichni i yenergozberigayuchi sistemi» – 3/2012(19) – 2012. – S.456-458.

NEW ALGORITHMS FOR LOGIC-DYNAMIC CONTROL OF A HIGH-CAPACITY WIND POWER PLANT

Volodymyr Myrhorod, Iryna Hvozdeva, Gennadiy Grama

Abstract. *An approach is proposed to generate new principles for managing complex, rich energy objects, output control and regulation of changes that may have a different physical nature. It has been established that traditional methods of richly connected regulation of automatic systems with an insignificant number of regulatory inputs may result in significant shortcomings and limitations. The description of the specified type of system has been specified and new principles of logical and dynamic management of such objects have been established. Proposition of the approach and illustrations on the example of a collapsible energy object in the form of a high-pressure turbine-generator-type wind power plant. The essence of the proposed approach is the formation of a logical - dynamic management of a richly-worldly object surrounded by a multitude of influxes in the selection of the most important and unsafe officials who will be involved in Yogo stan ta rukh I will stan in the expanse of change.*

It was established with the help of a computer experiment that with the different implementation of the laws of keratinization, compared with traditional ones, there may be an improvement in technical and economic characteristics and a simplification of algorithmic security.

Keywords: *mathematical modeling, control systems for large-scale objects, automatic heating, wind power installation, computer experiment*

СЕКЦІЯ 4

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНО-УПРАВЛЯЮЧІ СИСТЕМИ ТА
ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ**

SECTION 4

**INTELLIGENT INFORMATION MANAGEMENT SYSTEMS
AND INFORMATION SECURITY ISSUES**

ШІ-ПІДХОДИ ПОЯСНЕННЯ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ

Бубнов М.С.¹ [ORCID], Гнатушенко В.В.² [ORCID], Гнатушенко Вік.В.³ [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, України

²Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

д.т.н., професор, України

³Український державний університет науки і технологій

д.т.н., професор, України

Анотація. У роботі розглянуто сучасні підходи пояснюваного штучного інтелекту (Explainable Artificial Intelligence, XAI), що застосовуються для інтерпретації та обробки супутникових і аерокосмічних знімків у задачах дистанційного зондування Землі. Проаналізовано основні класи XAI-методів, зокрема атрибуцію ознак, дистиляцію моделей, внутрішньо інтерпретовані підходи та контрастивні пояснення, принципи їх роботи, переваги, обмеження та обчислювальні особливості. Наведено приклади практичного використання XAI для моніторингу природних катастроф, агромоніторингу, оцінки соціально-економічних індикаторів, класифікації землекористування та аналізу мультимодальних даних. Зроблено висновок, що XAI є важливим інструментом для підвищення надійності, прозорості та прийнятності результатів моделей штучного інтелекту у критично важливих прикладних застосуваннях.

Ключові слова: пояснюваний штучний інтелект, XAI, дистанційне зондування Землі, аерокосмічні знімки, інтерпретація моделей, атрибуція ознак, дистиляція моделей, супутникові дані.

Обробка та аналіз супутникових і аерокосмічних знімків є однією з ключових задач сучасного дистанційного зондування Землі. Швидке зростання обсягів даних, доступних з оптичних, радарних, мульти- та гіперспектральних сенсорів, зумовлює активне використання методів штучного інтелекту, зокрема глибокого навчання. Разом з тим складність таких моделей призводить до зниження прозорості процесу прийняття рішень, що є критичним у задачах з високим рівнем відповідальності. Пояснюваний штучний інтелект (Explainable AI, XAI) пропонує набір підходів, спрямованих на підвищення зрозумілості та інтерпретованості моделей. У контексті супутникових знімків XAI дозволяє не лише перевіряти надійність прогнозів, а

й інтегрувати експертні знання, виявляти помилки в даних та забезпечувати регуляторну й етичну прозорість.

Застосування ХАІ у задачах дистанційного зондування має низку суттєвих переваг. По-перше, пояснювальні методи дозволяють виявляти ситуації, коли модель ґрунтує свої рішення на нерелевантних ознаках або артефактах, таких як хмарність чи смуги сенсора. По-друге, ХАІ сприяє підвищенню довіри користувачів та полегшує комунікацію результатів між розробниками моделей і доменними експертами. По-третє, у контексті прийняття управлінських або гуманітарних рішень ХАІ забезпечує можливість обґрунтування отриманих висновків [4].

Водночас ХАІ-підходи мають і низку обмежень. Пояснення часто є нечіткими та не завжди відображають причинно-наслідкові зв'язки. Результати можуть бути чутливими до архітектури моделі, параметрів навчання та попередньої обробки даних. Крім того, багато методів характеризуються високою обчислювальною складністю, що ускладнює їх застосування для великих зображень або гіперспектральних даних. Важливою проблемою залишається відсутність стандартизованих метрик оцінки якості пояснень [3].

Розглянемо класифікацію ХАІ-підходів для аналізу та пояснення супутникових знімків, а також приклади практичного застосування ХАІ.

Атрибуція ознак (Feature Attribution). Методи атрибуції ознак спрямовані на визначення входних параметрів, які найбільше впливають на прогноз моделі. Для досягнення цієї мети, дані методи використовують навчену модель машинного навчання. Залежно від того, чи пояснення генеруються шляхом перевірки внутрішніх механізмів моделі, чи шляхом аналізу змін у вихідних даних моделі після модифікації входних ознак, методи цієї категорії додатково поділяються на методи на основі зворотного поширення та методи на основі збурень.

Методи зворотного поширення, такі як Gradient, Integrated Gradients, Deconvolution, Class Activation Mapping (CAM, Grad-CAM) та Layer-wise Relevance Propagation, використовують внутрішню структуру глибоких

нейронних мереж для оцінки важливості пікселів або регіонів зображення. Їхньою перевагою є відносна простота та наочність у вигляді теплових карт, проте результати можуть бути складними для інтерпретації у мультиспектральних та мультикласових задачах.

Методи на основі збурень (Occlusion Sensitivity, PDP, ALE) оцінюють важливість ознак шляхом аналізу зміни прогнозу при систематичній модифікації вхідних даних. Ці методи відрізняються тим, як саме ознаки збурюються. Серед інших, типи збурення включають розмиття, усереднення, перетасування або додавання шуму. Дані методи інтуїтивні та часто дають стабільніші пояснення, однак є обчислювально затратними та чутливими до параметрів збурення [2, 6].

Дистиляція моделей (Distillation). Методи дистиляції будують інтерпретовану сурогатну модель, яка апроксимує поведінку складної моделі. Відтворюючи прогнози складної моделі, сурогатна модель пропонує гіпотези про відповідні ознаки та кореляції, отримані складною моделлю, не надаючи додаткового розуміння її внутрішнього механізму прийняття рішень. До цієї групи належать локальні апроксимації (LIME, SHAP) та методи трансляції моделей у правила, дерева або графи. Основною перевагою таких підходів є кількісна оцінка внеску ознак, однак їх застосування до гіперспектральних і мультимодальних даних потребує додаткових адаптацій [5].

Внутрішньо інтерпретовані методи (Intrinsic). Внутрішньо інтерпретовані підходи орієнтовані на створення моделей, які є зрозумілими за своєю структурою. До них належать інтерпретовані за проектом моделі (дерева рішень, лінійні та адитивні моделі), а також підходи на основі простору вкладень і концептів. Методи на кшталт TCAV дозволяють пояснювати рішення через семантично зрозумілі концепти, що є особливо важливим у соціально значущих застосуваннях. Перевагами цих методів є те, що вони створюють семантично інтерпретовані пояснення. Можуть використовуватись у політико-соціальних застосунках (наприклад, пояснення прогнозів добробуту за супутниковими даними). Головним недоліком є те, що такі методи

потребують наборів прикладів концептів. Також концепти інколи важко формалізувати для мультиполюсних/гетерогенних сцен.

Контрастивні пояснення (Contrastive Examples). Контрастивні методи надають альтернативні приклади, що дозволяють пояснити рішення моделі шляхом порівняння. Контрфактичні пояснення відповідають на питання про мінімальні зміни, необхідні для зміни прогнозу, тоді як пояснення на основі прикладів демонструють схожі історичні випадки з навчальної вибірки. Такі підходи є інтуїтивно зрозумілими та наближеними до людського способу міркування [1].

Приклади практичного застосування XAI. XAI-методи широко застосовуються для моніторингу природних катастроф, де теплові карти дозволяють визначити критичні регіони зображення, що впливають на класифікацію пожеж або повеней. В агромоніторингу пояснення важливих спектральних смуг сприяють кращому розумінню впливу біофізичних факторів на врожайність. У задачах оцінки соціально-економічних індикаторів концепт-базовані підходи допомагають встановити зв'язок між візуальними ознаками інфраструктури та прогнозованими показниками добробуту.

Висновки. Пояснюваний штучний інтелект є перспективним напрямом розвитку методів аналізу супутникових знімків. Його використання сприяє підвищенню довіри до моделей, полегшує інтеграцію експертних знань і дозволяє виявляти помилки у даних та моделях. Разом з тим актуальними залишаються проблеми нечіткості інтерпретацій, високої обчислювальної вартості та відсутності єдиних стандартів оцінки. Для практичних застосувань доцільно комбінувати різні XAI-підходи, проводити кількісну валідацію пояснень і документувати параметри використаних методів.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Höhl, A., Obadic, I., Fernández Torres, M. Á., Najjar, H., Oliveira, D., Akata, Z., Dengel, A., & Zhu, X. X. Opening the Black-Box: A Systematic Review on Explainable AI in Remote Sensing. arXiv preprint arXiv:2402.13791 (2024). URL: <https://arxiv.org/abs/2402.13791>
2. Kakogeorgiou, I. & Karantzalos, K. Evaluating explainable artificial intelligence methods for multi-label deep learning classification tasks in remote sensing. Journal of Arid Environments (Elsevier). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243421002270>

3. (P08) Recent Trends, Challenges, and Limitations of Explainable AI in Remote Sensing (scoping review). XAI4CV workshop paper. URL: <https://xai4cv.github.io/assets/papers2024/P08.pdf>
4. Klotz, J., Burgert, T., & Demir, B. On the Effectiveness of Methods and Metrics for Explainable AI in Remote Sensing Image Scene Classification. arXiv:2507.05916 (2025). URL: <https://arxiv.org/abs/2507.05916>
5. Interpretable Deep Learning Framework for Land Use and Land Cover Classification in Remote Sensing using SHAP. International Journal of Information Technology and Computer Engineering (2025). URL: <https://ijitce.org/index.php/ijitce/article/view/1346/1165>
6. Hnatushenko Vik., Honcharov O. Land cover mapping with Sentinel-2 imagery using deep learning semantic segmentation models (2024). Proceedings of the X International Scientific Conference "Information Technology and Implementation", p.1-18. URL: CEUR-WS.org/Vol-3909

EXPLAINABLE AI APPROACHES FOR SATELLITE IMAGE INTERPRETATION

Mykola Bubnov, Volodymyr Hnatushenko, Viktoriia Hnatushenko

Abstract. *This paper explores contemporary Explainable Artificial Intelligence (XAI) methods applied to the interpretation and analysis of satellite and aerospace imagery within remote sensing tasks. We present a comprehensive overview of primary categories of XAI techniques – including feature attribution, model distillation, intrinsically interpretable models, and contrastive explanations – and discuss their operational principles, strengths, limitations, and computational characteristics. The practical relevance of XAI for tasks such as natural disaster monitoring, agricultural assessment, socio-economic indicator estimation, and land use/land cover classification is highlighted with real-world examples. Emphasis is placed on how explainability enhances model transparency, reliability, and integration with domain expert knowledge. Challenges such as ambiguous interpretations, high computational costs, and the lack of standardized evaluation metrics for explanations are also discussed. The review underscores XAI's growing importance in bridging the gap between black-box AI performance and human understanding in Earth observation applications.*

Keywords: *Explainable Artificial Intelligence, Remote Sensing, Satellite Imagery, Interpretable Models, Feature Attribution, Model Distillation, Satellite Data.*

DEVELOPMENT OF A HIGH-LOAD PIPELINE FOR TRANSFERRING MARINE TRAFFIC DATA FROM SOURCE TO END USER IN REAL TIME

Sofiia Burimova¹ [ORCID], Hanna Mykhalchuk² [ORCID]

¹Oles Honchar Dnipro National University, student, Ukraine

²Oles Honchar Dnipro National University,
Cand. Phys.-Math. Sci., Assoc. Prof., Dept, Ukraine

Abstract. *In modern maritime industry, vessel traffic monitoring is the most important and often required task, where failures in data delivery or instability of software components can lead to colossal economic losses. This paper considers the problem of processing AIS (Automatic Identification System) data streams in large volumes and in real time. The author proposes a pipeline architecture on the .NET platform, with acceleration of object deserialization with source-generated JSON, moving data using gRPC and SignalR with MessagePack, temporary storage of data portions in Redis, and delegating client visualization of results to GPU. The implementation of the subsystem made it possible to achieve a stable display of 20-25 thousand dynamic ship objects – approximately a quarter of the world's maritime traffic – with an instantaneous speed, sometimes outpacing the loading of map tiles. The considered approach can be scaled to other geographic information systems with high data input loads.*

Keywords: *performance optimization, data streaming, maritime traffic, AIS, geographic information system, monitoring, high-load system, .NET, gRPC, Redis*

Introduction. Maritime logistics is a critically important industry for global trade and economies on the scale of countries. From 75% to 90% of all freight transport takes place on water routes. Currently, digital transformation is taking place aiming to standardize management, make faster decisions, monitor safety, and accelerate communication between ships, ports, stations, etc.

One of the most important tasks in the industry is monitoring vessels, in particular their location, technical condition and planned actions. To exchange such data between ships, the standard AIS (Automatic Identification System) communication protocol has long been used, where messages are sent at intervals from every few seconds to several minutes [1]. With the number of active ships in the world (slightly over 100 thousand), the need to receive real-time updates, and the

presence of a generally accepted protocol through which these updates are shared quite often, monitoring is probably the first task to undergo software automation.

At the same time, its improper implementation - software instability, inability to keep up with data volumes, data arrival delays - most directly leads to physical and operational losses, and as a result - to very significant financial ones. A day of vessel delay during delivery costs from \$150 thousand, annually in total the delays cause \$14 billion in losses to the global maritime industry, collisions - another \$20 billion per year [2]. Taking into account the situation described above, high-performance and fault-tolerant systems capable of visualizing global AIS data flows without delays are a relevant type of software projects.

The main goal of this work is to develop the transmission of real AIS data streams in the existing software project of a geographic information system, from listening to communications to displaying ship markers on the map, with latency as close to real-time as possible and without harming the performance of other parts of the system.

To listen to AIS data streams, a separate microservice with a constantly running web socket was added into the architecture. This separation is decided due to a significant difference of the principle of how web sockets work, compared to Dependency Injection in ASP. NET Core [3], and therefore to exclude the interruption of listening by some DI component or delays due to the functioning of many other processes in the main API.

The source of AIS data in the project is an open-source API aisstream.io. It delivers AIS messages not from all vessels where the protocol is enabled, only from 20-25 thousand, which is at most a quarter of the world's traffic, but it is positively distinguished by simple connection setup and completely free access, which became the reason for this choice.

In the AIS specification, there are only 27 types of messages [1], but for the implemented subsystem, 6 are enough: 2 types for vessel locations, 2 for properties and 2 for safety incidents. Selection of these particular types was specified at the stage of connecting the web socket to the aisstream.io API.

Messages come from the data source already in JSON format. With a flow rate of several hundred messages per second, deserializing them the way common for .NET would be unproductive, since reflection is used there and it decreases performance the most. Therefore, a JSON context was defined for message classes so that the deserialization code would be generated at compile time. At this stage, the number and structure of classes fully correspond to the JSON that comes from the web socket. The specific type of each message is determined by reading the type name bytes at its beginning.

Next, AIS messages need to be sent to the main project API. The gRPC protocol was chosen for this channel due to its binary nature, which is 70-80% more efficient than HTTP, and its reputation as a good choice for communication between services, especially at high load of hundreds of objects per second [5]. When using gRPC, it is necessary to define data models using the proto3 syntax [5], from which the C# classes are generated at compile time.

It was decided to use new message classes for gRPC, since the classes from the previous stage were too complex, had a lot of nesting, and barely differed within one purpose (location/ship properties/safety). For gRPC 4 message classes have been developed: one for each purpose and a wrapper with fields common for any message.

AIS data comes to the main API into one of the background services constantly as it arrives. But the same continuous flow cannot be channeled further to the browser for visualization, because that approach would lead to almost instant memory exhaustion. Batches must be gathered on the server side before being sent further in between some time intervals [3], so there is a need for temporary data storage. The interval between batches was decided as 2 seconds, and to work with streaming loads so significant, the high-performance NoSQL database Redis was undoubtedly chosen as the storage.

The data needed for visualization of markers includes coordinates, type of a vessel (for color coding), and the key that logically joins all this is MMSI (Maritime Mobile Service Identity) - the identifier of a vessel in communications. Coordinates are taken from messages about vessel locations, types - from messages about their properties, and safety messages do not participate in the formation of markers. In

Redis, the data is organized into one hash table, so that all the information for filling the map can be retrieved with a single command [4]. The keys are composed of MMSI and property names, and the corresponding values are atomic, as shown in Fig. 1. These key-value pairs are created, or more often - updated, constantly as AIS objects arrive from the gRPC channel.

```
46029) "367480140:type"  
46030) "18"  
46031) "232006684:type"  
46032) "11"  
46033) "538010698:type"  
46034) "20"  
46035) "244020442:long"  
46036) "5.0640266666666669"  
46037) "257093820:long"  
46038) "6.7857783333333339"  
46039) "319173000:long"  
46040) "9.40142666666666675"  
46041) "314836000:lat"  
46042) "44.367333333333335"  
46043) "244690959:type"  
46044) "7"  
46045) "244013558:long"  
46046) "4.7560966666666662"  
46047) "538010198:long"  
46048) "-15.398741666666666"  
46049) "255768000:lat"
```

Figure 1 – Output fragment of the contents of a Redis hash table with visualization data

For sending data further to the client side, a SignalR channel was used, since in the current project its textbook usage scenario takes place: an ASP.NET application which should send a large number of records to clients at a speed as close to real-time as possible [3]. Another performance improvement by 40-60% more was achieved by configuring the SignalR channel to use the binary protocol MessagePack.

For simplicity in the client-side processing, this stage of data transfer was intended so that an object directly corresponds to a marker on the map. The answer is an only class with the fields MMSI, latitude, longitude and vessel type identifier. To serialize its objects with MessagePack, fields must have ordinal numbers set. The objects arrive to the client side as arrays of field values in that set order.

Entries of the Redis hash table are aggregated into objects of the marker class described above in another background service every 2 seconds, as mentioned earlier. Since the values in pairs are atomic, no connection of properties related to the same ship is implemented at the DB level, and the order of pairs is random, it is necessary

to construct objects in the server-side code. MMSI is extracted from keys, which in Redis are strings [4], and a dictionary is filled, where the values are marker objects described above. When receiving another entry from the hash table from Redis, the value of the corresponding property is set on the object in the dictionary by the current MMSI. After iterating through all the hash table entries, collection of values of the dictionary is sent to client side via SignalR.

When received at the client side, data arrays are not converted to GeoJSON collections in the main thread. Given their amount, which in a couple of minutes of application operation exceeds 20 thousand, there would be lags occurring every time - that is every 2 seconds. The conversion is outsourced to WebWorker, where it is performed asynchronously and then a fully prepared GeoJSON is returned to the main thread.

An attempt to display 20-25 thousand markers on the map with the usual DOM or even SVG tools from the Leaflet GIS framework used in the project is far beyond its limit, which immediately led to a crash of the client part or even the entire browser. Linking the leaflet.glify plugin was critical to the operability of the entire data transmission pipeline. It delegates GeoJSON rendering to WebGL, which in turn means GPU rendering, and this way finally displays the working ship markers on the map. With each new data arrival, all previous markers are deleted, because via WebGL it is not possible to change the position of existing images. But this constant deletion with redrawing does not harm the performance of the finished visualization, the most densely filled fragment of which is shown in Fig. 2. Markers are the best performing map layer, loading properly even during fast interactions, when other layers, even the base map tiles, may update with a slight delay.



Data streaming pipeline architecture of the developed in the work completely solves the problem of visualization of a significant part of the global AIS traffic in real time. The achieved performance is way beyond limits of more traditional data transfer protocols and web visualization tools capabilities. It is expected that if AIS sources with greater coverage, up to the complete maximum, get included in the project, the developed subsystem will demonstrate the same speed and stability.

1. B. J. Tetreault, Use of the Automatic Identification System (AIS) for maritime domain awareness (MDA). Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE. – 2005. P. 1590 – 1594. DOI:10.1109/OCEANS.2005.1639983.
2. J. Verschuur, J. Lumma & Jim W. Hall, Systemic impacts of disruptions at maritime chokepoints. Nature Communications – 2025. P. 3 – 8. DOI:10.1038/s41467-025-65403-w.
3. Kleppmann, M. Designing Data-Intensive Applications. O'Reilly. – 2017. P. 451 – 456, 459 – 467. ISBN: 9781491903063. URL: <https://www.oreilly.com/library/view/designing-data-intensive-applications/9781491903063/>
4. Dr. Josiah L C., Redis in Action. O'Reilly. – 2017. P. 48 – 54. ISBN: 9781935182054. URL: <https://www.oreilly.com/library/view/redis-in-action/9781617290855/>
5. A. Giretti, Beginning gRPC with ASP.NET Core 6. Apress – 2022. P. 85 – 91, 122 – 148. DOI:10.1007/978-1-4842-8008-9.

РОЗРОБЛЕННЯ ВИСОКОНАВАНТАЖЕНОГО КОНВЕЄРА ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ МОРСЬКОГО ТРАФІКУ ВІД ДЖЕРЕЛА ДО КІНЦЕВОГО КОРИСТУВАЧА В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

С.К. Бурімова, Г.Й. Михальчук

Анотація. В сучасній морській справі моніторинг руху суден є найважливішою і найчастіше затребуваною задачею, де збої у доставці даних або нестабільність компонентів ПЗ можуть призвести до колосальних економічних втрат. В роботі розглядається проблема обробки потоків даних AIS (Automatic Identification System) у великому обсязі та режимі реального часу. Автором запропонована архітектура конвеєра на платформі .NET, з прискоренням десеріалізації об'єктів завдяки source-generated JSON, переміщенням даних за допомогою gRPC та SignalR з MessagePack, тимчасовим збереженням порцій даних у Redis та переведенням клієнтської візуалізації результатів на GPU. Впровадження підсистеми дозволило досягти стабільного зображення 20-25 тисяч динамічних об'єктів суден – приблизно чверті світового морського трафіку – з миттєвою швидкістю, що інколи випереджає завантаження фрагментів мапи. Розглянутий підхід може бути масштабований на інші геоінформаційні системи з великими навантаженнями надходження даних.

Ключові слова: оптимізація продуктивності, потокова обробка даних, морський трафік, AIS, геоінформаційна система, моніторинг, високонавантажена система, .NET, gRPC, Redis.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНА СИСТЕМА ДЛЯ АБІТУРІЄНТІВ

Бутов М.В.¹ [ORCID], Куроп'ятник О.С.² [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, студент, Україна

²Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доц., Україна

Анотація. У роботі запропоновано використання інформаційно-комунікаційної системи для абітурієнтів. Система включає у себе чат-бот, адміністративну панель та базу даних. Передбачено систему ролей користувачів. На етапі проектування для визначення поведінки та структури системи використовувалися діаграми станів та компонентів. Для забезпечення масштабованості та зручності підтримки було застосовано модульний підхід з розділенням відповідальностей. Для оцінки продуктивності систему було реалізовано з використанням двох різних технологічних стеків. Перший стек: React + ElysiaJS(TypeScript) + PrismaORM + хмарна база Neon(PostgreSQL). Другий стек: Go з веб-фреймворком Gin та локально розгорнутою базою PostgreSQL у Docker-контейнері. Тести продуктивності показали, що стек на основі Go пропонує вищу ефективність виконання. У подальшому передбачається наповнення системи контентом та перехід до дослідної експлуатації.

Ключові слова: інформаційно-комунікаційна система, чат-бот, go, python, typescript, вебтехнології, бази даних, контейнери, інформаційні технології.

Вступ. Система вищої освіти України пропонує абітурієнту широкий вибір галузей, спеціальностей та освітніх програм, за якими здійснюється підготовка за різними формами навчання та фінансування. Для здійснення обґрунтованого вибору абітурієнт повинен мати доступ до відповідної інформації. Це зумовлює попит на відповідні інформаційні системи.

Заклади вищої освіти конкурують між собою для набору абітурієнтів. З 2022 якісна цифровізація процесів вступної кампанії, зокрема інформування та комунікації зі вступниками, стає стратегічним активом ЗВО [1]. Спостерігається інтенсивне зміщення акцентів від простих інформаційних веб-сайтів до більш складних систем, зокрема таких, що дозволяють проводити розрахунку, роботи прогнози та комунікувати.

Засоби, якими користуються заклади освіти України та світу, можна класифікувати за їхніми функціональним призначенням: агрегатори даних (зокрема сайти), комунікаційні чат-боти [2], спеціалізовані CRM-системи та інтелектуальні сервіси обробки документів [3, 4, 5]. Усі вони об'єднані спільною метою: зробити процес вступу прозорим для абітурієнта та керованим для університету.

Метою цієї роботи є надання зручного інструментарію для інформаційної підтримки абітурієнта протягом вступної кампанії, а також періоду підготовки до вступу до закладу освіти. Об'єктом дослідження є процеси профорієнтаційної роботи, предметом – інформаційно-комунікаційна система для абітурієнтів (ІКСА).

Основний матеріал. Розробка системи для інформаційної підтримки абітурієнтів, яка враховує особливості структури закладу вищої освіти та роботи його підрозділів, дозволяє допомогти абітурієнтам здійснити обґрунтований вибір спеціальності та закладу освіти. Основними функціями ІКСА є інформаційна та комунікаційна. Перша полягає у наданні інформації про вступ до університету, спеціальності, заходи для абітурієнтів. Друга забезпечує сервіс відповіді на запитання. Запитання абітурієнт надсилає до системи в текстовому форматі.

Особливістю інформування щодо спеціальності є прив'язка до структурного підрозділу (кафедри) університету, який здійснює підготовку за нею. Для цього у системі передбачено окремі блоки інформаційні блоки та відповідна система прав доступу.

В основу системи покладено чат-бот у меседжері, адміністративну веб-панель, базу даних.

Система передбачає три ролі користувачів:

- адміністратор надає доступ до системи адміністратором, встановлює права доступу до компонентів системи;
- модератор додає команди для бота, визначає дії за командами, надає відповіді на запитання;
- абітурієнт користуючись командами бота отримує інформацію та комунікує з адміністратором в текстовому режимі.

У ролі модератора виступає відповідальна особа від структурного підрозділу (кафедри), який реалізує освітні програми за певною спеціальністю. Такий підхід підвищує релевантність інформації, яку надаватиме система.

Оскільки система має розгалужену систему переходів для отримання інформації для уникнення глухих кутів у комунікації сценарій діалогу змодельовано за допомогою UML-діаграми станів користувача-абітурієнта.

Для наочного представлення архітектури серверної частини системи та взаємодії між її компонентами розроблено діаграму компонентів (рис. 1). Діаграма відображає трирівневу організацію бекенду, охоплюючи шляхи проходження запитів від зовнішніх клієнтів через конвеєр middleware до рівня доступу до даних.

Застосунок розділений на 6 шарів, кожен шар має свою роль у системі:

1. Зовнішні клієнти – незалежні клієнти, що взаємодіють із API. Адмін панель - веб панель для адміністраторів, створена для керування даними, які будуть відображатися користувачам в телеграм боті. Телеграм бот розроблено на python, він надає наповнену адміністраторами інформацію користувачам через зручний інтерфейс, для отримання інформації бот звертається до API через внутрішній http-клієнт.
2. Middleware pipeline – перший рівень обробки кожного запиту всередині бекенду. Запит послідовно проходить через CORS, Auth, Role middleware, для перевірки чи дозволено домен з якого виконано запит, перевірки токена доступу та перевірки прав доступу користувача відповідно.
3. Handler layer – роутер розподіляє запити між сімома обробниками http-запитів за доменами: користувачі, абітурієнти, спеціальності, події, команди, повідомлення та базова інформація. Обробники також відповідають формуванням відповідей.
4. Service layer: кожен обробник делегує виконання бізнес-логіки відповідному сервісу. В цьому шарі зосереджені правила предметної області, є дві міжсервісні залежності: CommandHandler перевіряє приналежність спеціальності через Specialty Services, а UserMessageService перевіряє цільового абітурієнта через Abiturient Service.

5. Repository layer відповідає за доступ до даних, кожен сервіс працює зі своїм репозиторієм, усі репозиторії використовують спільний пул для з'єднання з базою даних.
6. Database – єдине сховище даних системи, в ролі БД використовується PostgreSQL, з'єднання приймаються через порт 5432.

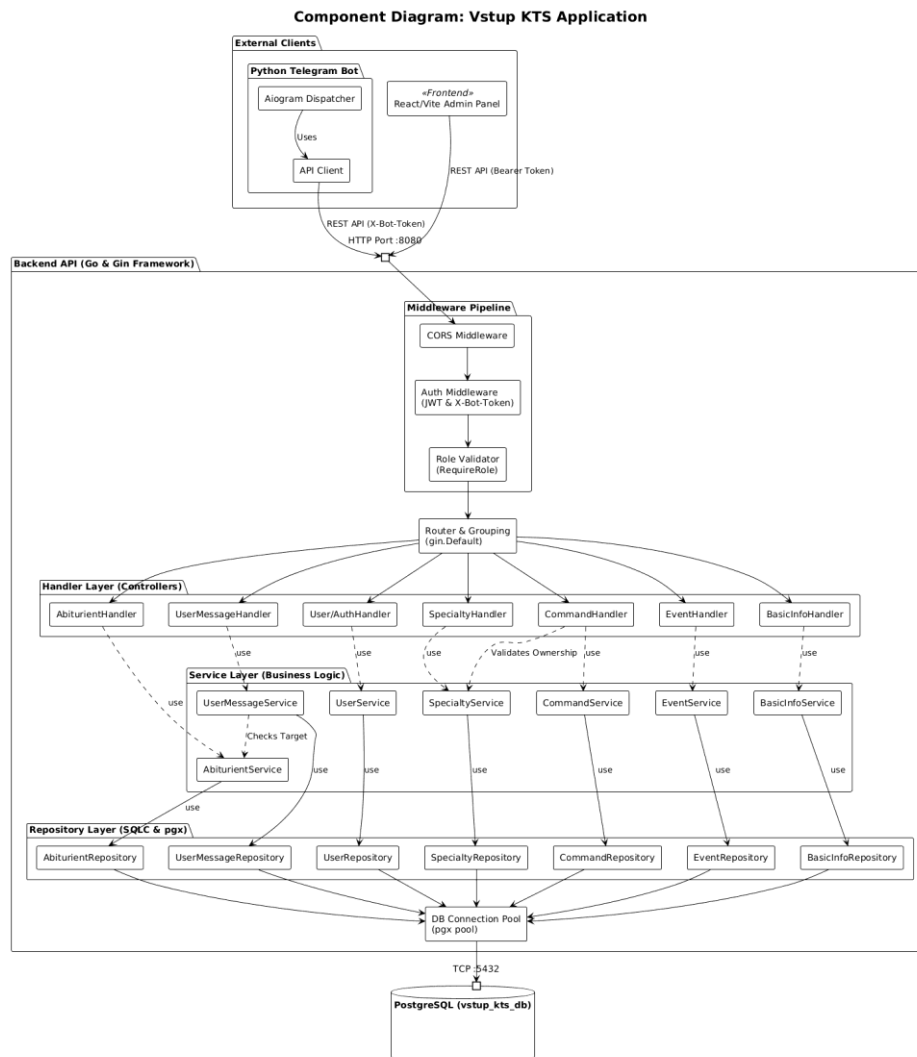


Рисунок 1 – Діаграма компонентів застосунку

Вибір стеку технологій для реалізації системи обумовлений вимогами до продуктивності, надійності та довгострокової підтримки системи. Для серверної частини обрано мову програмування Go з веб-фреймворком Gin, оскільки мова програмування специфічна саме для швидкодії та high-load систем, вона забезпечує високу швидкість при обробці великої кількості одночасних запитів. Взаємодія з БД реалізована через SQLC та драйвер pgx – такий підхід дозволяє писати чисті SQL-запити, уникаючи накладних

витрат ORM. В якості СКБД обрано PostgreSQL – сучасну, безкоштовну реляційну базу даних, що розгорнута в контейнері Docker для мінімізації затримки по мережі. Адмін-панель реалізовано на React через велику кількість готових рішень, які дозволили привести її до робочого стану в короткі терміни. Телеграм-бот розроблено на Python з використанням фреймворку Aiogram, використання цього фреймворку є стандартом для розробки телеграм-ботів, через свої асинхронні можливості. Авторизація побудована на механізмі JWT. Адмін-панель, телеграм-бот, бекенд та БД розгорнуті в окремих Docker-контейнерах та керуються за допомогою docker-compose, це надає просту та швидку можливість для розгортання усього сервісу на віддаленому сервері.

На початковому етапі систему було реалізовано на стеку React + ElysiaJS(TypeScript) + PrismaORM з використанням хмарної бази даних Neon(PostgreSQL). Це забезпечило коректне функціонування та високу швидкість розробки завдяки гнучкості обраних технологій та єдиній мові для всіх рівнів. Попри високу швидкість розробки, система демонструвала недостатню швидкодію з кількох причин. ElysiaJS працює у середовищі Bun на основі JavaScriptCore – інтерпретованого рушія з JIT компіляцією, який поступається продуктивністю компільованим мовам при обробці великої кількості одночасних запитів. Критичним чинником стало розміщення бази даних у хмарному сервісі Neon – кожен запит до БД проходив через мережу, додаючи затримку у часі в залежності від розміру запиту.

Перехід на Go з локально розгорнутою PostgreSQL у Docker-контейнері усунув зазначені проблеми. Go – компільована мова програмування з власною моделлю конкурентності на основі goroutine, вони дозволяють більш ефективно обробляти паралельні запити, ніж JavaScript Event Loop. SQLC генерує Go-код із SQL-запитів на етапі компіляції, повністю усуваючи накладні витрати ORM під час роботи застосунку. Розміщення PostgreSQL в одній інфраструктурі з бекендом скоротило затримку запитів до кількох мілісекунд.

Висновки. У результаті розробки створено інформаційну систему підтримки вступної кампанії, що інтегрує Telegram-бот для взаємодії з абітурієнтами та веб-панель адміністратора в єдиний сервіс з централізованим

API. Система автоматизує процес надання інформації про спеціальності, події та базову інформацію для вступу, забезпечуючи абітурієнтам цілодобовий доступ до актуальних даних у зручному форматі.

Перехід з JavaScript стеку на Go стек з локальним розгортанням бази даних дозволив усунути затримки по мережі та підвищити швидкодію усієї системи через використання інструментів специфічних для високих навантажень. Чітка архітектура забезпечує модульність, легке розширення функціоналу та спростила підтримку усієї системи.

Наразі система перебуває на етапі тестування та готується до передачі для дослідної експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Москвич А. Особливості комунікації закладів вищої освіти України з абітурієнтами на медійних платформах (на прикладах Дніпровського державного технічного університету, Поліського національного університету і Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського»). Наукові праці Міжрегіональної Академії управління персоналом. Філологія. № 3 (17). 2025. С. 139-146. <https://doi.org/10.32689/maup.philol.2025.3.18>
2. Мина Ж. В., Малетич Д. В. Інформаційне забезпечення комунікації з абітурієнтами при вступі в магістратуру. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Т 34 (73). № 5. с. 252-256. DOI <https://doi.org/10.32782/2710-4656/2023.5/41>
3. Li, K., & Jiang, H. Graduate Enrollment Information Management System Based on Machine Learning. In Proceedings of the International Conference on Big Data Mining and Information Processing. 2024. pp. 173-177. <https://doi.org/10.1145/3735014.3735894>
4. Tan, E. T. S., Tabudlong, A. L. C., Lomantas, J. M. E., & Estember, R. D.. Evaluation and Improvement of the Higher Education Institution's Enrollment Information System. In Proceedings of the 2024 The 6th World Symposium on Software Engineering (WSSE). 2024 . pp. 45-53. <https://doi.org/10.1145/3698062.3698084>
5. Лемешук О. І., Юрчук Ю. Ю., Сенчишен Д. О. Віртуальні освітні середовища: допомога абітурієнтові в кризових умовах. Збірник наукових праць «Педагогічні науки». № 109. 2025. с. 60-69. <https://doi.org/10.32999/ksu2413-1865/2025-109-8>

INFORMATION AND COMMUNICATION SYSTEM FOR APPLICANTS

Maksym Butov, Olena Kuropiatnyk

Abstract. *This paper proposes an information and communication system designed for prospective students. The system comprises a chatbot, an administrative panel, and a database, featuring a role-based access control model. The design phase utilized state and component diagrams to define system behavior and structure. A modular,*

separation-of-concerns approach was adopted to ensure scalability and maintainability. The system was implemented using two distinct technology stacks: 1) React, ElysiaJS (TypeScript), PrismaORM, and Neon (PostgreSQL) cloud database; 2) Go with the Gin framework and a containerized (Docker) PostgreSQL instance. Performance benchmarks demonstrated that the Go-based stack offers superior execution efficiency. Future work will focus on content population and transitioning to pilot operation.

Keywords: *information and communication system, chatbot, Go, Python, TypeScript, web technology, databases, containers, information technology.*

REFERENCE

1. Moskvych A. Peculiarities of communication between higher education institutions of Ukraine and applicants on media platforms (on the examples of Dnipro State Technical University, Polesie National University and the National Technical University of Ukraine "I. Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute") . Scientific works of the Interregional Academy of Personnel Management. Philology. No 3 (17). 2025. pp. 139-146. <https://doi.org/10.32689/maup.philol.2025.3.18> [in Ukrainian].
2. Myna Zh. V, Maletych D. V. Information support for communication with applicants when entering a master's degree program. Academic notes of V. I. Vernadsky TNU. 2023. Vol. 34 (73). No 5. pp. 252-256. <https://doi.org/10.32782/2710-4656/2023.5/41> [in Ukrainian].
3. Li, K., & Jiang, H. Graduate Enrollment Information Management System Based on Machine Learning. In Proceedings of the International Conference on Big Data Mining and Information Processing. 2024. pp. 173-177. <https://doi.org/10.1145/3735014.3735894>.
4. Tan, E. T. S., Tabudlong, A. L. C., Lomantas, J. M. E., & Estember, R. D.. Evaluation and Improvement of the Higher Education Institution's Enrollment Information System. In Proceedings of the 2024 The 6th World Symposium on Software Engineering (WSSE). 2024 . pp. 45-53. <https://doi.org/10.1145/3698062.3698084>.
5. Lemeshchuk O. I., Yurchuk Yu. Yu., Senchyshen D. O. Virtual educational environments: assistance to applicants in crisis conditions. Collection of scientific works "Pedagogical Sciences". No 109. 2025. pp. 60-69. <https://doi.org/10.32999/ksu2413-1865/2025-109-8> [in Ukrainian].

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦІЛІСНОСТІ ДАНИХ У СИСТЕМАХ ВАНТАЖНИХ
ПЕРЕВЕЗЕНЬ З НЕСТАБІЛЬНИМ З'ЄДНАННЯМ: DAG-РЕЄСТР ЯК
ІНСТРУМЕНТ ВІДКЛАДЕНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ**

Велегура Є. А.¹ [ORCID], Горячкін В. М.² [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

²Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

Анотація. У роботі розглядається актуальна проблема забезпечення консистентності та незмінності логістичних даних в умовах переривчастого зв'язку, що є характерним для вантажних перевезень. Досліджено обмеження класичних блокчейн-протоколів у контексті теореми CAP при роботі в динамічних транспортних мережах. Обґрунтовано перехід від лінійних структур реєстру до направлених ациклічних графів (DAG), що дозволяє паралельно записувати події різними вузлами системи. Запропоновано архітектурне рішення, що включає двошарову CRDT-модель синхронізації стану та дворівневий адаптивний gossip-протокол з proximity-комунікацією між транспортними засобами. Такий підхід покликаний забезпечити кінцеву узгодженість системи без втрати доступності даних при розділенні мережі.

Ключові слова: DAG-DLT, вантажні перевезення, консистентність даних, переривчастий зв'язок, CRDT, gossip-протокол, кінцева узгодженість, стійкість до розділення.

Вступ

Сучасні системи вантажних перевезень (TMS-системи) дедалі більше залежать від безперервного обміну даними між учасниками логістичного ланцюга: транспортними засобами, диспетчерськими центрами, складами та митними пунктами [1, 2]. Проте специфіка вантажних перевезень пов'язана з частими розривами зв'язку через проходження тунелів, віддалених ділянок доріг, зон з обмеженим покриттям. У ці моменти TMS-система перетворюється на роз'єдану сукупність вузлів, де дані накопичуються локально, а їх наступна передача відбувається за принципом «зберегти та переслати» (store-and-forward).

Класичні підходи до блокчейну розраховані на стабільне з'єднання між усіма учасниками, тому в умовах переривчастого зв'язку вони демонструють

низьку ефективність [3]. Проблема полягає в тому, що після відновлення з'єднання класичні лінійні блокчейн-протоколи вимагають глобального консенсусу для визначення єдиного порядку транзакцій, що призводить до конфліктів між гілками, втрати частини записів або значних затримок синхронізації. Традиційні методи реплікації баз даних, у свою чергу, не забезпечують криптографічної незмінності записів та їх аудитоспроможності.

Аналіз системних обмежень та теорема CAP

Будь-яка мережа транспортних засобів є розподіленою системою, що підпорядковується теоремі CAP [4]. Згідно з цією теоремою розподілена система зберігання даних не може одночасно забезпечити більше двох із трьох властивостей: узгодженість (Consistency), доступність (Availability) та стійкість до розділення (Partition tolerance).

Традиційні блокчейн-протоколи (Bitcoin, Ethereum) потребують регулярного зв'язку з більшістю вузлів для забезпечення прогресу консенсусу. При тривалому розділенні мережі ізольовані вузли або припиняють запис (у BFT-протоколах), або продовжують формувати локальні гілки, які згодом можуть бути відкинуті під час реорганізації ланцюга (у протоколах Nakamoto-типу) [5].

Архітектурні підходи до забезпечення стійкості реєстру в умовах переривчастого зв'язку

Розв'язання проблеми забезпечення стійкості реєстру досягається через відмову від традиційної лінійної моделі блокчейну на користь архітектури спрямованого ациклічного графа (DAG). Завдяки тому, що кожна нова транзакція посиляється хешами на декілька попередніх, досягається можливість паралельного асинхронного фіксування даних різними вузлами без глобального консенсусу [5, 6]. При цьому кожен транспортний засіб формує та підтримує власну локальну гілку графа — автономний логістичний ланцюг.

При встановленні прямого зв'язку між транспортними засобами відбувається автоматичний обмін буферизованими даними за механізмом «зберегти та переслати»: ізольований вузол передає свої логи транспортному засобу, що проїжджає повз, який доставляє їх до мережі при першій нагоді

(proximity gossip, V2V) [7]. Злиття розрізнених гілок DAG здійснюється за допомогою безконфліктних реплікованих типів даних (Conflict-free Replicated Data Types, CRDT), що математично гарантує кінцеву узгодженість (eventual consistency) незалежно від порядку синхронізації вузлів [8].

Така структура дозволяє учасникам логістичного процесу (наприклад, вантажівкам поза зоною покриття) працювати автономно. Після відновлення мережевого доступу розрізнені гілки інтегруються в загальний граф за встановленими протоколами, що підтверджується архітектурним рішенням SwarmDAG [6], а також підходом Vegvisir [5], який забезпечує стійкість до розділення через злиття локальних ланцюгів після відновлення зв'язку.

Слід зазначити, що процес злиття гілок не є тривіальним: при одночасному записі даних про одну й ту саму подію різними вузлами виникає необхідність детермінованого розв'язання порядку. У запропонованій моделі для цього застосовується двошарова CRDT-структура: перший шар (G-Set) забезпечує збереження повного журналу транзакцій через операцію об'єднання множин; другий шар (автомат стану вантажу) агрегує поточний стан кожного вантажу через операцію поелементного максимуму за визначеним частковим порядком станів ($CREATED < IN\_TRANSIT < AT\_CHECKPOINT < DELIVERED < ACCEPTED$). Математичні властивості цих операцій (комутативність, асоціативність, ідемпотентність) гарантують, що результат злиття є однаковим незалежно від порядку синхронізації вузлів (рис. 1). Слід зазначити, що монотонність цього автомата є свідомим проектним обмеженням: зворотні переходи (повернення, відмова) моделюються як окремі транзакції з новим ідентифікатором вантажної одиниці.

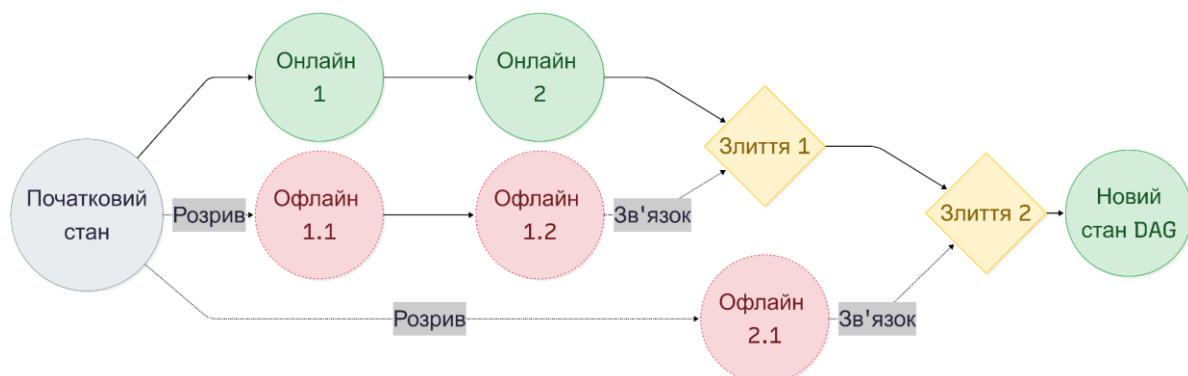


Рисунок 1 – Модель злиття локальних гілок даних у DAG-структурі після відновлення з'єднання

Адаптивний gossip-протокол синхронізації

Для ефективного розповсюдження даних між вузлами мережі застосовується дворівневий адаптивний gossip-протокол. На інфраструктурному рівні кожен вузол періодично ініціює синхронізацію з одним зі своїх постійних сусідів (складами, диспетчерськими центрами). Вибір партнера здійснюється адаптивно: обирається сусід з найбільшим інформаційним віком – тобто той, від якого найдовше не надходили оновлення. На proximity-рівні транспортні засоби, що знаходяться у фізичній близькості (в зоні дії Bluetooth або WiFi Direct), автоматично обмінюються буферизованими даними.

Кожен обмін даними відбувається через CRDT-merge операцію, що гарантує коректність результату незалежно від кількості проміжних передач. Цифрові підписи створювачів транзакцій та хеші попередніх блоків DAG-структури унеможливають модифікацію даних вузлами-посередниками.

Висновки

На відміну від класичних блокчейн-протоколів, DAG-структури забезпечують безперервну фіксацію даних в ізольованих сегментах завдяки асинхронному паралельному запису подій.

Запропонована архітектура, що поєднує двошарову CRDT-модель синхронізації стану та дворівневий адаптивний gossip-протокол з proximity-комунікацією між транспортними засобами, дозволяє забезпечити кінцеву узгодженість розподіленого реєстру без втрати доступності даних. Математичні властивості CRDT-операцій (комутативність, асоціативність, ідемпотентність) гарантують детерміноване злиття розрізнених гілок DAG незалежно від порядку синхронізації.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. M. B. Mollah et al., "Blockchain for the Internet of Vehicles Towards Intelligent Transportation Systems: A Survey," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 8, no. 6, pp. 4157–4185, 15 March 2021, doi: 10.1109/JIOT.2020.3028368.
2. European Commission, "Regulation (EU) 2020/1056 on electronic freight transport information (eFTI)," Official Journal of the European Union, 2020, url: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32020R1056>.
3. Y. Xiao et al., "A survey of distributed consensus protocols for blockchain networks," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 22, no. 2, pp. 1432–1465, 2020, doi: 10.1109/comst.2020.2969706.

4. S. Gilbert and N. Lynch, "Brewer's conjecture and the feasibility of consistent, available, partition-tolerant web services," ACM SIGACT News, vol. 33, no. 2, pp. 51–59, 2002, doi: 10.1145/564585.564601.
5. K. Karlsson et al., "Vegvisir: A partition-tolerant blockchain for the internet-of-things," in 2018 IEEE 38th Int. Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS), IEEE, 2018, pp. 1150–1158, doi: 10.1109/ICDCS.2018.00114.
6. M. Tran et al., "SwarmDAG: A partition tolerant distributed ledger protocol for swarm robotics," Ledger, vol. 4, pp. 25–31, 2019, doi: 10.5195/ledger.2019.174.
7. Y. Wang et al., "Lifesaving with RescueChain: Energy-Efficient and Partition-Tolerant Blockchain Based Secure Information Sharing for UAV-Aided Disaster Rescue," in IEEE INFOCOM 2021, IEEE, 2021, pp. 1–10, doi: 10.1109/INFOCOM42981.2021.9488719.
8. M. Shapiro et al., "A comprehensive study of convergent and commutative replicated data types," INRIA Research Report, 2011, url: <https://inria.hal.science/inria-00555588v1>.

ENSURING DATA INTEGRITY IN FREIGHT TRANSPORTATION SYSTEMS WITH UNSTABLE CONNECTIVITY: DAG-BASED LEDGER AS A TOOL FOR DEFERRED SYNCHRONIZATION

Yevhenii Velehura , Vadym Horiachkin

Abstract. *The paper addresses the urgent problem of ensuring the consistency and immutability of logistics data under conditions of intermittent connectivity, which is characteristic of freight transportation. The limitations of classical blockchain protocols in the context of the CAP theorem when operating in dynamic transport networks are investigated. The transition from linear ledger structures to directed acyclic graphs (DAG) is justified, which allows parallel recording of events by different system nodes. An architectural solution is proposed, which includes a two-layer CRDT model for state synchronization and a two-level adaptive gossip protocol with proximity communication between vehicles. This approach is intended to ensure the eventual consistency of the system without losing data availability during network partitioning.*

Keywords: *DAG-DLT, freight transportation, data consistency, intermittent connectivity, CRDT, gossip protocol, eventual consistency, partition tolerance.*

ДЕКОМПОЗИЦІЯ ОНТОЛОГІЙ ТА ГРАФІВ ЗНАНЬ ЧЕРЕЗ ВІДНОШЕННЯ НУЛЬОВОГО ПОРЯДКУ

Галушка О.В.¹ [ORCID], Шинкаренко В.І.² [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

²Український державний університет науки і технологій, д.т.н, професор, Україна

Анотація. Графи знань та онтології оперують структурно гетерогенними висловлюваннями – бінарними триплетами, n -арними реіфікованими відношеннями, вкладеними фактами – що ускладнює їх обробку нейромережевими моделями. У роботі запропоновано декомпозицію довільного онтологічного висловлювання до єдиного примітиву – анонімного спрямованого зв'язку нульового порядку (r_0). Предикат переноситься з ребра у вузол, і граф стає однорідним: усі елементи є вузлами, з'єднаними єдиним типом ребра. Декомпозиція спирається на два принципи: ролеву нейтральність концептів, за якою розрізнення «концепт» і «відношення» є контекстуальним, та рекурсивний порядок висловлювання, що формалізує структурну складність. Показано, що r_0 -декомпозиція виконує для графів знань роль, аналогічну токенизації для текстів: перетворює гетерогенну структуру на однорідну, придатну для нейромережової обробки.

Ключові слова. Граф знань, онтологія, реіфікація, декомпозиція логічних висловлювань, представлення знань, нейронні мережі.

Вступ. Графи знань оперують структурно різномірними формами представлення фактів. Найпростішою є бінарний триплет виду «Суб'єкт-Предикат-Об'єкт» [1], проте реальні предметні області часто потребують складніших конструкцій: n -арних відношень із кваліфікаторами, вкладених фактів. Для їх формалізації розроблено низку підходів – реіфікацію RDF [2], формат RDF-star [3], гіперреляційні моделі [4, 5] – кожен з яких орієнтований на певний тип структури. Модель, створена для одного класу структур, як правило, не переноситься на інший без суттєвих змін.

Це контрастує з обробкою природної мови, де довільне висловлювання зводиться до однорідної послідовності слів, і саме однорідність представлення робить текст придатним для обробки нейромережевими моделями [6]. Для графів знань аналогічного уніфікованого представлення досі не запропоновано.

У цій роботі ми вводимо таке представлення шляхом декомпозиції довільного онтологічного висловлювання до єдиного анонімного спрямованого примітиву нульового порядку (r_0) та формалізуємо структурну складність висловлювань через рекурсивну метрику порядку.

Основний матеріал. Ми визначаємо анонімний спрямований зв'язок нульового порядку r_0 як примітив, що не несе власної семантики й лише фіксує спрямований зв'язок між двома вузлами. Бінарний триплет розкладається у два зв'язки типу r_0 :

$$R(S, O) \rightarrow r_0(S, R), r_0(R, O) \quad (1)$$

Семантика при цьому переноситься з ребра у вузол: предикат relation перестає бути міткою ребра й стає повноцінним вузлом графа нарівні з іншими концептами. В результаті отримуємо однорідний граф, у якому всі елементи онтології – і сутності, і відношення – є вузлами, з'єднаними єдиним типом ребра r_0 .

N-арне відношення обробляється аналогічно через реіфікацію. Тернарне відношення $R(a, b, c)$ спочатку реіфікується у вузол R^* , пов'язаний із кожним аргументом відповідною роллю, а потім кожен із цих зв'язків декомпозиується до пари r_0 . Таким чином, незалежно від початкової арності, результатом завжди є однорідний r_0 -граф.

Декомпозиція передбачає, що предикат стає вузлом. Це можливо завдяки принципу ролевої нейтральності: розрізнення між «концептом» та «відношенням» є контекстуальним, а не онтологічним. Концепт, що виступає предикатом в одному висловлюванні, може бути аргументом в іншому. Наприклад, предикат «працює» у триплеті `works_at(Petro, University)` стає аргументом у висловлюванні `believes(Mary, works_at(Petro, University))`. Ролева нейтральність забезпечує необмежену вкладеність: реіфікований концепт автоматично може брати участь у висловлюваннях вищого рівня без додаткових механізмів.

Для формалізації структурної складності ми вводимо рекурсивну цілочислову метрику – порядок висловлювання. Атомарний концепт, що не є

висловлюванням, має порядок 0. Порядок висловлювання φ з аргументами $a_1, a_2, \dots, a_n$ визначається як:

$$\rho(\varphi) = \delta + \max(\rho(a_1), \rho(a_2), \dots, \rho(a_n)) \quad (2)$$

де $\delta = 1$ для бінарних відношень (арність 2) та $\delta = 1$ для n-арних (арність > 2), оскільки n-арне відношення потребує додаткового кроку реіфікації при декомпозиції.

Розглянемо приклади різних порядків:

- **works_at(Petro, University)**: бінарне, атомарні аргументи, $\rho = 1$;
- **between(Kyiv, Dnipro, Lviv)**: тернарне, потребує реіфікації, $\rho = 2$;
- **believes(Mary, works_at(Petro, University))**: бінарне, але другий аргумент є висловлюванням порядку 1, тому $\rho = 2$.

Порядок є властивістю саме висловлювання, а не предиката: один і той самий предикат може брати участь у висловлюваннях різних порядків залежно від складності аргументів. Це принципово відрізняє запропоновану метрику від класичного поділу відношень на «бінарні» та «n-арні», який характеризує предикат, а не конкретне висловлювання.

Подібно до того, як токенізація зводить природномовне висловлювання до послідовності однотипних одиниць [6], r_0 -декомпозиція зводить онтологічне висловлювання довільного порядку до однорідного графа з єдиним типом ребра. Висловлювання будь-якого порядку представлені однаковими структурними елементами, тому обробляються однаково незалежно від вихідної складності.

Висновки. У роботі запропоновано декомпозицію довільного онтологічного висловлювання до єдиного анонімного спрямованого примітиву r_0 та формалізовано структурну складність висловлювань через рекурсивну метрику порядку. Проведений нами огляд літератури показав, що існуючі підходи до вкладених фактів або обмежуються фіксованою глибиною [4, 5], або допускають довільну глибину без формальної метрики. Деякі роботи порівнюють різні форми представлення фактів у графах знань [2, 7], проте жодна з них не використовує декомпозицію до єдиного анонімного примітиву. За результатами проведеного огляду, запропонований підхід є першим, що зводить висловлювання довільної структурної складності до однорідного графа через єдиний тип зв'язку, забезпечуючи уніфіковане представлення, придатне для нейромережевої обробки.

ЖИТЕПАТҮПА / REFERENCE

1. Hogan, A., Blomqvist, E., Cochez, M., d'Amato, C., Melo, G. D., Gutierrez, C., ... & Zimmermann, A. (2021). Knowledge graphs. ACM Computing Surveys, 54(4), 1–37. DOI: 10.1145/3447772
2. Hernández, D., Hogan, A., & Krötzsch, M. (2015). Reifying RDF: What works well with Wikidata? Proceedings of the 11th International Workshop on Scalable Semantic Web Knowledge Base Systems (SSWS), 32–47. URL: https://ceur-ws.org/Vol-1457/SSWS2015_paper3.pdf
3. Hartig, O. (2017). Foundations of RDF* and SPARQL* – An alternative approach to statement-level metadata in RDF. Proceedings of the 11th Alberto Mendelzon International Workshop on Foundations of Data Management (AMW), vol. 1912. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-1912/paper12.pdf>
4. Galkin, M., Trivedi, P., Maheshwari, G., Usbeck, R., & Lehmann, J. (2020). Message passing for hyper-relational knowledge graphs. Proceedings of the 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP), 7346–7359. DOI: 10.18653/v1/2020.emnlp-main.596
5. Guan, S., Jin, X., Wang, Y., & Cheng, X. (2019). Link prediction on n-ary relational data. Proceedings of the World Wide Web Conference (WWW), 583–593. DOI: 10.1145/3308558.3313414
6. Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., ... & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 30. URL: <https://papers.nips.cc/paper/2017/hash/3f5ee243547dee91fbd053c1c4a845aa-Abstract.html>
7. Rosso, P., Yang, D., & Cudré-Mauroux, P. (2020). Beyond triplets: Hyper-relational knowledge graph embedding for link prediction. Proceedings of The Web Conference (WWW), 1885–1896. DOI: 10.1145/3366423.3380257

DECOMPOSITION OF ONTOLOGIES AND KNOWLEDGE GRAPHS VIA ZERO-ORDER RELATIONS

Oleksandr Halushka, Viktor Shynkarenko

Abstract. Knowledge graphs and ontologies operate with structurally heterogeneous statements – binary triples, n -ary reified relations, and nested facts – which complicates their unified processing. This paper proposes decomposing any ontological statement into a single primitive – an anonymous directed link of zero order (r_0). The predicate is transferred from the edge to a node, producing a homogeneous graph where all ontological elements are nodes connected by a single edge type. The decomposition relies on two principles: role neutrality of concepts, whereby the distinction between «entity» and «relation» is contextual rather than ontological, and recursive statement order, which formalizes structural complexity through a metric. It is shown that r_0 -decomposition performs for knowledge graphs a role analogous to tokenization for natural language texts: it transforms a heterogeneous structure into a homogeneous one suitable for neural network processing.

Keywords. Knowledge graph, ontology, reification, logical statement decomposition, knowledge representation, neural networks.

СТВОРЕННЯ ТРИВИМІРНИХ ІГРОВИХ РІВНІВ НА ОСНОВІ РЕКОНСТРУКЦІЇ АЕРОФОТОЗНІМКІВ

Глазунова П.А.¹ [ORCID], Олійник Ю.О.² [ORCID]

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського», студентка, Україна

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського», к.т.н., доцент, Україна

Анотація. Робота присвячена автоматизованій генерації тривимірних ігрових рівнів на основі реконструкції одиночного аерофотознімка та розробці відповідного методу та програмного забезпечення. Метод поєднує монокулярну оцінку глибини за допомогою Depth Anything V2, семантичну сегментацію об'єктів за допомогою Segment Anything Model 3 та спеціалізовані алгоритми екстракції геометрії чотирьох класів об'єктів – будівель, доріг, дерев і водойм. Також в даному методі використовується система координатних перетворень, що забезпечує уніфікований перехід від двовимірної системи координат фотознімка в тривимірну систему координат ігрового рівня. В основі програмної реалізації лежить мікросервісна архітектура з п'ятьма контейнеризованими Docker-сервісами, що забезпечує логічне розділення компонентів і масштабованість системи. Для розробки обрано мови програмування Python і C#, а в якості кінцевого ігрового рушія – Unity. Запропонований підхід забезпечує повну автоматизацію процесу – від завантаження знімка до отримання готового ігрового рівня.

Ключові слова: розробка ігор, аерофотознімок, тривимірний ігровий рівень, Unity, генерація ігрових рівнів.

Вступ

Створення реалістичних тривимірних ігрових середовищ є однією з найбільш ресурсомістких задач у сучасній розробці відеоігор. При цьому, з кожним роком вимоги до якості і масштабності ігрових світів зростають.

В умовах бойових дій на території України також зростає потреба в оперативному відтворенні конкретних реальних локацій у військових симуляторах для тренування військовослужбовців і планування операцій. Традиційний підхід – відтворення існуючих локацій у вигляді тривимірних

середовищ вручну – потребує значних ресурсів і часу, тоді як існуючі підходи до автоматизації – процедурна генерація та фотограмметрична реконструкція – не задовольняють одночасно вимогам до автоматизації, реалістичності та оптимізації для ігрових рушіїв [1-4].

З огляду на це було розроблено метод генерації тривимірних ігрових рівнів на основі реконструкції аерофотознімків, що забезпечує повну автоматизацію процесу створення, оптимізацію створеного рівня для ігрових рушіїв та відтворення існуючих середовищ.

Основний матеріал

Розроблений метод концептуально базується на підході Sketch2Scene [2], розширеному та адаптованому для роботи з реальними аерофотознімками.

На вхід подається аерофотознімок. На виході отримується збірка (.exe файл) готового ігрового рівня.

Спочатку виконується нейромережева обробка вхідного аерофотознімка: оцінюється глибина зображення та виконується семантична сегментація об'єктів. Для створення карти глибини використовується Depth Anything V2 – модель, що складається з кодера Vision Transformer (ViT) і декодера Dense Prediction Transformer (DPT) [5]. Семантична сегментація об'єктів (будівлі, дороги, дерева, водойми) виконується за допомогою SAM3 – моделі з архітектурою подвійного трансформера типу кодер-декодер [6]. Результатом сегментації є набір бінарних масок об'єктів. Для усунення дублювань масок використано алгоритм Non-Maximum Suppression з метрикою Intersection over Union. Наступним кроком карта глибини перетворюється на карту висот, що відповідає вимогам Unity.

Далі генерується splatmap, що керує просторовим розподілом і змішуванням текстурних шарів рельєфу. Бінарні маски сегментованих класів кодуються в канали RGBA двох PNG-зображень з плавними переходами між текстурами через гаусове розмиття країв.

Наступний етап передбачає екстракцію тривимірних об'єктів, оснований на обробці масок. Для будівель та водойм виконується морфологічне замикання та спрощення контурів алгоритмом Дугласа-Пекера. Висота споруд

обчислюється порівнянням медіанної глибини даху та прилеглої поверхні. Дорожня мережа будується як планарний граф через скелетонізацію методом медіальної осі. Для виокремлення дерев у масивах застосовується кластеризація DBSCAN. Кожен кластер визначає позицію стовбура (центроїд), радіус крони та висоту окремого дерева.

На всіх етапах використовується уніфікована система перетворення координат. Така система забезпечує перехід від піксельних координат 2D-зображення до метричних координат 3D-сцени. Горизонтальні координати масштабуються за осями, а висота обчислюється через інверсію нормалізованої глибини: максимальна глибина відповідає нульовому рівню землі. Алгоритм також реалізує метричне перетворення площ та медіанну фільтрацію для підвищення стійкості оцінки висот об'єктів.

Для програмної реалізації було обрано мікросервісну архітектуру (рис. 1). Система складається з п'яти контейнерів. Сервіс gateway реалізований за допомогою Python та FastAPI і є єдиною точкою входу: приймає від користувача аерофотознімок та конфігурацію, оркеструє послідовність виклику інших сервісів і повертає користувачу готовий результат. Сервіс depth виконує оцінку глибини за допомогою Depth Anything V2 з використанням GPU, сервіс segment – семантичну сегментацію об'єктів за допомогою SAM3 з використанням CPU. Ці два сервіси запускаються паралельно, що дозволяє скоротити загальний час обробки. Сервіс pipeline генерує карту висот, splatmap та виконує екстракцію тривимірних об'єктів. Сервіс unity запускає Unity Editor у headless-режимі та виконує автоматичну збірку рівня. Передача даних між усіма сервісами здійснюється через спільний Docker volume.

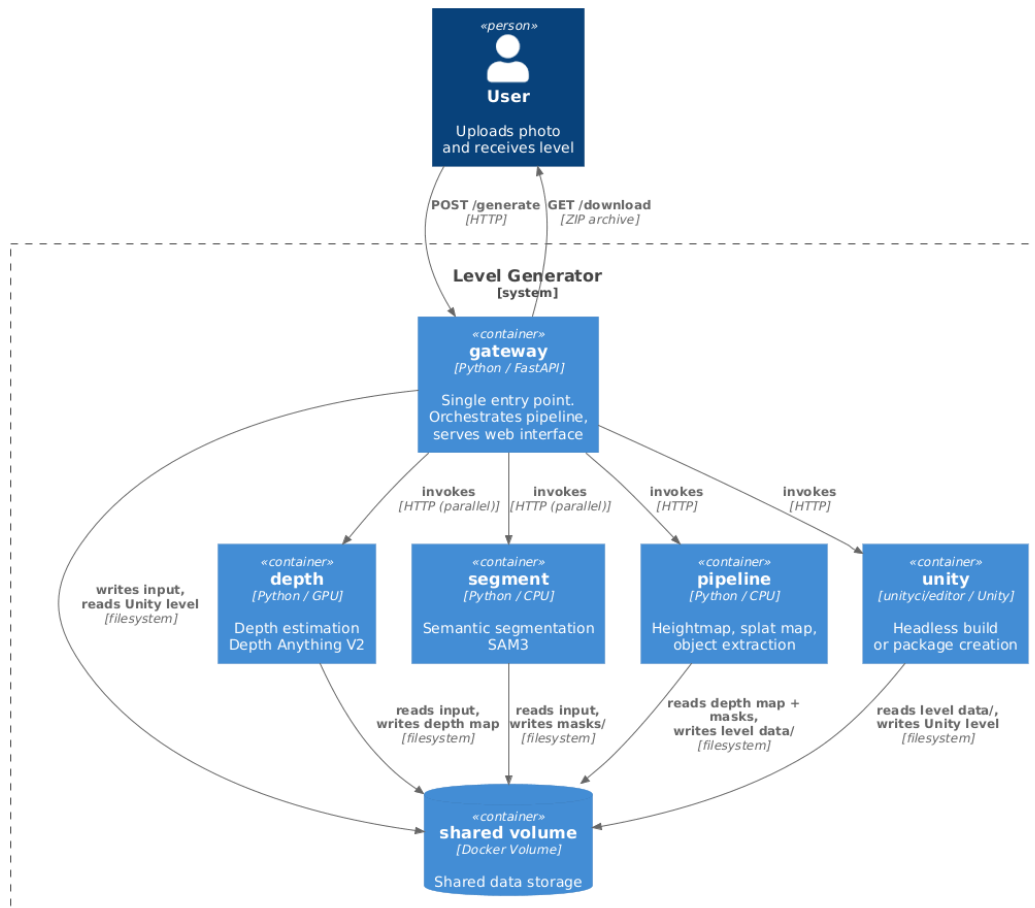


Рисунок 1 – Архітектура системи (діаграма контейнерів) в нотатції C4

Висновки

В даній доповіді представлено метод та програмні засоби для автоматизованої генерації тривимірних ігрових рівнів з одиночного аерофотознімка. Метод поєднує неймережеву оцінку глибини (Depth Anything V2), семантичну сегментацію об'єктів (SAM3) та спеціалізовані алгоритми екстракції геометрії чотирьох класів об'єктів. Програмна система реалізована у вигляді мікросервісної архітектури і забезпечує повний автоматизований цикл від завантаження аерофотознімка до готового ігрового рівня у Unity. Запропонований підхід одночасно забезпечує повну автоматизацію, оптимізацію результату для ігрового рушія та реконструкцію реальних середовищ, а також значно спрощує і пришвидшує створення і впровадження нових тривимірних ігрових рівнів.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Newlands C., Zauner K.-P. Procedural Generation and Rendering of Realistic, Navigable Forest Environments: An Open-Source Tool. Computer Graphics Forum. 2022. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.01471>.
2. Sketch2Scene: Automatic Generation of Interactive 3D Game Scenes from User's Casual Sketches / Y. Xu та ін. arXiv preprint arXiv:2408.04567. 2024.
3. Berrezueta-Guzman S., Koshelev A., Wagner S. From Reality to Virtual Worlds: The Role of Photogrammetry in Game Development. 2025 IEEE Gaming, Entertainment, and Media Conference (GEM), м. Kaohsiung, Taiwan, 16–18 лип. 2025 р. 2025. С. 1–6. URL: <https://doi.org/10.1109/gem66882.2025.11155764>.
- 4 .RealFusion 360° Reconstruction of Any Object from a Single Image / L. Melas-Kyriazi та ін. 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), м. Vancouver, BC, Canada, 17–24 черв. 2023 р. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/cvpr52729.2023.00816>.
5. Depth Anything V2 / L. Yang та ін. Advances in Neural Information Processing Systems. 2024. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.09414>.
6. Carion N. SAM 3: Segment Anything with Concepts. 2025. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.16719>.

CREATING THREE-DIMENSIONAL GAME LEVELS BASED ON THE RECONSTRUCTION OF AERIAL PHOTOGRAPHS

Polina Hlazunova, Yurii Oliinyk

Abstract. *This paper focuses on automated generation of three-dimensional game levels based on the reconstruction of a single aerial photograph, as well as development of the corresponding method and software. The method combines monocular depth estimation using Depth Anything V2, semantic object segmentation using Segment Anything Model 3, and specialized geometry extraction algorithms for objects of four classes – buildings, roads, trees, and water objects. The proposed method also employs a coordinate transformation system that ensures a unified transition from the two-dimensional coordinate system of the image to the three-dimensional coordinate system of the game level.*

The software implementation is based on a microservice architecture with five containerized Docker services, providing logical separation of components and system scalability. Python and C# were selected as the programming languages, and Unity was used as the target game engine. The proposed approach enables full automation of the process – from image uploading to obtaining a ready-to-use game level.

Keywords: *game development, aerial photograph, three-dimensional game level, Unity, game level generation.*

РИЗИКИ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ ВИЯВЛЕННЯ МЕРЕЖЕВИХ ВТОРГНЕНЬ ЯК ДЖЕРЕЛА НАВЧАЛЬНИХ МІТОК ДЛЯ НЕЙРОМЕРЕЖ

Горбатов В.С.¹ [ORCID], Журба А.О.² [ORCID]

¹УДУНТ, аспірант. Україна

²УДУНТ, к.т.н., доцент. Україна

Анотація. Використання сповіщень систем виявлення мережових вторгнень (NIDS) як навчальних міток для моделей машинного навчання спричиняє виникнення систематичних похибок, що суттєво погіршують точність виявлення загроз. У дослідженні проаналізовано розбіжності між фактичними мережевими атаками та спрацюваннями сигнатурних аналізаторів, з акцентом на трьох критичних викликах: однобічній похибці маркування, самопідсиленні помилок у середовищах безперервного навчання та вразливості до навмисного отруєння даних. Зокрема, неспроможність традиційних систем ідентифікувати загрози нульового дня призводить до забруднення негативного класу, в якому пропущені атаки помилково класифікуються як безпечний трафік. Для мінімізації цих ризиків розглянуто стратегії нейтралізації, зокрема навчання на позитивних і немаркованих даних (PU-learning), слабке керування навчанням та механізми фільтрації за рівнем довіри. Впровадження надійних протоколів перевірки та методів буферизації забезпечує достовірніше виявлення вторгнень і підвищує стійкість нейромереж до мінливих кіберзагроз у динамічних середовищах.

Ключові слова: NIDS, машинне навчання, кібербезпека, PU-learning, дрейф концепції, самопідсилення похибки, онлайн-адаптація моделі.

Вступ. Сигнатурні системи виявлення мережових вторгнень вирізняються високою точністю виявлення відомих загроз за низької частоти хибних спрацювань, проте вони не здатні розпізнавати нові вектори атак [1]. Використання їхніх сповіщень як навчальних міток формує однобічну похибку: маркування атакуючого трафіку є здебільшого коректним, натомість відсутність спрацювання не гарантує безпечності. Невиявлені атаки класифікуються як звичайний трафік, що викривлює навчальну вибірку. Модель оптимізується на зміщених даних і втрачає здатність виявляти пропущені системою NIDS загрози. Ця ситуація потребує застосування методів навчання на позитивних і немаркованих даних, оскільки стандартні підходи

керованого навчання є неефективними через хибне трактування всіх немаркованих зразків як абсолютно безпечних [2].

Однобічна похибка маркування. Сигнатурні NIDS пропускають значну кількість нових атак. У навчальній вибірці утворюється дисбаланс: позитивний клас (відомі атаки) представлений вузько, а негативний клас (безпечний трафік) містить приховані позитивні випадки. Навчена на таких даних модель отримує систематичне зміщення, розпізнаючи лише відомі шаблони та ігноруючи нові аномалії через їхню попередню класифікацію як безпечних [2].

Шляхи вирішення:

- Навчання на позитивних і немаркованих даних: Алгоритми цього класу оцінюють частку прихованих атак і коригують вагові коефіцієнти для компенсації зміщення. Часто використовують двокрокові схеми з попереднім пошуком аномалій серед немаркованих даних [2].
- Слабке керування навчанням: Залучення додаткових джерел інформації (евристичних правил, списків блокувань) для формування попередніх міток. Часткова анотація з високим рівнем довіри зменшує кількість хибних негативних прикладів [3].

Самопідсилення помилок під час безперервної адаптації. Під час безперервного донавчання моделі на нових даних виникає ефект накопичення похибок [4]. Якщо алгоритм не розпізнає атаку і зараховує цей трафік до безпечного, під час наступного циклу навчання хибна асоціація посилюється. Відбувається поступова деградація точності та зсув робочої концепції. Без механізму зовнішнього контролю алгоритм втрачає чутливість до аномалій, помилково адаптуючись до нових атак як до норми.

Шляхи вирішення:

- Фільтрація за рівнем довіри: Модель має оновлюватися лише на тих прикладах, щодо яких існує найвища впевненість у правильності маркування [4].
- Перехресна перевірка: Використання двох різних моделей. У разі розбіжності оцінок зразок вилучається з процесу оновлення [5].
- Попередня перевірка на еталонному наборі: Якщо після донавчання метрики погіршуються, нові дані відхиляються [5].
- Буферизація історичних даних: Збереження підтверджених атак минулих періодів у буфері запобігає забуванню попередніх класів [3].

- Активне навчання: Система самостійно відбирає найбільш суперечливі зразки для ручної експертної перевірки [6].

Вразливість до цілеспрямованого викривлення даних. Автоматичне оновлення моделі створює загрозу навмисного отруєння навчальної вибірки зловмисником. Нападник може генерувати шкідливий трафік, який не викликає спрацювання правил, змушуючи модель вивчити його як безпечний. Альтернативний сценарій передбачає створення штучних спрацювань на безпечному трафіку, що призводить до блокування легітимних користувачів. Цілеспрямоване викривлення даних здатне критично знизити точність класифікатора або створити приховані вразливості для безперешкодного доступу [5].

Шляхи вирішення:

- Контроль цілісності даних: Зразки, додавання яких до тренувальної вибірки погіршує показники моделі на контрольній множині, ідентифікуються як шкідливі та відхиляються [5].
- Адверсаріальне навчання: Включення до навчального процесу штучно модифікованих зразків та аномалій підвищує стійкість нейромережі до цілеспрямованих маніпуляцій із вхідними характеристиками трафіку [5].

Висновки

Формування навчальних вибірок на основі спрацювань сигнатурних аналізаторів супроводжується ризиками неповноти та ненадійності даних. Однобічна похибка маркування знижує рівень виявлення нових атак, самопідсилення помилок деградує модель у часі, а відсутність механізмів перевірки уможливорює цілеспрямоване викривлення вибірки. Застосування навчання на позитивних і немаркованих даних, фільтрації за рівнем довіри, буферизації, активного навчання та змагальних тренувань мінімізує зазначені ризики. Комплексне впровадження цих стратегій забезпечує стійкість нейромережових систем виявлення вторгнень в умовах реальних динамічних середовищ.

ЖИТЕПАТҮПА / REFERENCE

1. Feng Y., Sakurai K. Network Intrusion Detection: Evolution from Conventional Approaches to LLM Collaboration and Emerging Risks. URL: <https://arxiv.org/abs/2510.23313>.
2. Dilworth R., Gudla C. Applications of Positive Unlabeled (PU) and Negative Unlabeled (NU) Learning in Cybersecurity. URL: <https://arxiv.org/abs/2412.06203>.
3. Caravan: practical online learning of in-network ML models with labeling agents / Q. Zhang et al. 18th USENIX symposium on operating systems design and implementation (OSDI 24). Santa Clara, CA, 2024. P. 325–345. URL: <https://www.usenix.org/conference/osdi24/presentation/zhang-qizheng>.
4. Zou H. P., Caragea C. JointMatch: a unified approach for diverse and collaborative pseudo-labeling to semi-supervised text classification. Proceedings of the 2023 conference on empirical methods in natural language processing / ed. by H. Bouamor, J. Pino, K. Bali. Singapore, 2023. P. 7290–7301. URL: <https://doi.org/10.18653/v1/2023.emnlp-main.451>.
5. Alajaji A. FortiNIDS: defending smart city iot infrastructures against transferable adversarial poisoning in machine learning-based intrusion detection systems. Sensors. 2025. Vol. 25, no. 19. P. 6056. URL: <https://doi.org/10.3390/s25196056> (date of access: 04.03.2026).
6. Managing Concept Drift in Online Intrusion Detection Systems with Active Learning / C. F. et al. URL: <https://www.tib.eu/de/suchen/id/base:1b52787437b97f11f6c3a39a28994f83fc750b5f>.
7. Sommer R., Paxson V. Outside the closed world: on using machine learning for network intrusion detection. 2010 IEEE symposium on security and privacy. 2010. P. 305–316. URL: <https://doi.org/10.1109/SP.2010.25>.

RISKS OF USING NETWORK INTRUSION DETECTION SYSTEMS AS A SOURCE OF TRAINING LABELS FOR NEURAL NETWORKS

Vitalii Gorbatov, Anna Zhurba

Abstract. *The use of network intrusion detection system (NIDS) alerts as training labels for machine learning models introduces systematic biases that significantly degrade detection accuracy. This study investigates the discrepancies between actual network attacks and signature-based triggers, focusing on three critical challenges: one-sided labeling bias, error self-amplification in continuous learning environments, and vulnerability to adversarial data poisoning. Specifically, the inability of traditional NIDS to identify zero-day threats results in a polluted negative class, where missed attacks are misclassified as legitimate traffic. To address these risks, mitigation strategies are analyzed, including positive-unlabeled (PU) learning, weak supervision, and confidence-based filtering mechanisms. Implementing these robust validation protocols and buffering techniques ensures more reliable threat detection and enhances the resilience of neural networks against evolving cyber threats in dynamic network environments.*

Keywords: *NIDS, machine learning, cybersecurity, PU-learning, concept drift, error self-amplification, online model adaptation.*

ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВБУДОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ З МОДУЛЕМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

Гусев А.Ю.¹ [ORCID], Клим В.Ю.² [ORCID]

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, аспірант, Україна

²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

канд. наук, доц, Україна

Анотація. У роботі досліджується актуальна проблема підвищення ефективності вбудованих систем автоматичного керування, де алгоритми комп'ютерного зору (на базі глибоких нейромереж) виконують роль віртуальних датчиків. Проаналізовано методи компресії моделей (квантування, проріджування) у межах підходів Edge AI та TinyML. Висунуто припущення, що ізольована програмна оптимізація нейромереж без урахування динаміки фізичного об'єкта може знижувати запаси стійкості системи через виникнення стохастичного шуму та змінної затримки. Запропоновано комплексну методологію дослідження, яка поєднує використання цифрових двійників, симуляції (Vision-in-the-loop), емуляції та апаратної реалізації (Hardware-in-the-loop). Цей підхід спрямований на пошук оптимального компромісу між затримкою інференсу та точністю розпізнавання для підвищення надійності та ефективності автономних кіберфізичних систем.

Ключові слова: комп'ютерний зір, вбудовані системи, автоматичне керування, TinyML, компресія нейромереж.

Розвиток автономної робототехніки та безпілотних літальних апаратів (БПЛА) вимагає розширення сенсорних можливостей кіберфізичних систем. У сучасних системах керування все частіше відбувається заміна коштовних фізичних датчиків на модулі комп'ютерного зору (КЗ). Проте інтеграція сучасних алгоритмів КЗ у периферійні пристрої (Edge devices) ускладнюється жорсткими обмеженнями апаратного забезпечення: лімітованою пам'яттю, обчислювальною потужністю та енергоспоживанням. Це вимагає використання методів стиснення нейромереж, що, своєю чергою, впливає на загальну стійкість систем автоматичного керування (САК).

Для перенесення алгоритмів КЗ на бортові пристрої застосовуються підходи Edge Computing та TinyML, зокрема квантування (перетворення

значень ваг у форматі меншої розрядності, наприклад INT8) та проріджування (видалення найменш важливих синаптичних зв'язків) [1].

Проте виникає певна проблема: фахівці з Data Science оптимізують нейромережі переважно ізольовано від об'єкта керування, оцінюючи якість статичними метриками. Але інтеграція такого модуля в контур зворотного зв'язку докорінно змінює характер його роботи. Відеосенсор виступає як динамічна ланка із запізненням, що описується передавальною функцією:

$$W(s) = e^{(-sT)}, \quad (1)$$

де T — час затримки.

Перевищення граничної затримки робить систему нестійкою.

Щоб зменшити затримку, моделі компресують. Однак зниження розрядності ваг генерує шум квантування (хаотичне тремтіння координат обмежувальної рамки). Сигнал y_t на виході такого віртуального датчика описується рівнянням:

$$y(t) = f_{cnn}(x(t - \tau(t))) + w(t), \quad (2)$$

Де f_{cnn} (function of Convolutional Neural Network) - це функція перетворення згорткової нейромережі (модуля комп'ютерного зору), яка відображає реальний просторовий стан об'єкта у вихідні координати обмежувальної рамки; $x(t)$ - реальний стан керованого об'єкта, $\tau(t)$ - змінна затримка інференсу, а $w(t)$ - стохастичний шум вимірювань, спричинений компресією; t - час.

У контурі керування цей шум може діяти деструктивно на диференціальну складову ПІД (пропорційно-інтегрально-диференціальний) - регулятора, змушуючи його хаотично "смикати" виконавчі механізми [2].

Для вирішення цієї проблеми пропонується багаторівнева методологія комплексного дослідження, що складається з 6 етапів:

1. Створення цифрового двійника (3D-моделі) об'єкта в середовищах Unity або NVIDIA Isaac Sim.
2. Синтез ідеального керування (Ground Truth) за допомогою віртуальних датчиків симулятора.
3. Vision-in-the-loop: впровадження нестисненої нейромережі у контур керування.
4. Оптимізація та емуляція (TinyML) з різними ступенями квантування.

5. Апаратна реалізація (Hardware-in-the-loop) на реальних контролерах (STM32, Raspberry Pi, NVIDIA Jetson).
6. Порівняльний аналіз для оцінки взаємовпливу компресії та запасів стійкості САК.

Висновки

Підвищення ефективності вбудованих систем керування з модулем комп'ютерного зору потребує міждисциплінарного (Co-design) підходу. Ізольована оптимізація швидкості інференсу без урахування динаміки об'єкта може призводити до втрати стійкості через шум квантування. Запропонована методологія дозволить обґрунтувати гранично допустимий ступінь стиснення мережі, за якого кіберфізичний об'єкт зберігає керованість та задані показники якості перехідного процесу.

ЛІТЕРАТУРА

1. El Zeinaty C., Hamidouche W., Herrou G., Menard D. Designing Object Detection Models for TinyML: Foundations, Comparative Analysis, Challenges, and Emerging Solutions. ACM Computing Surveys. 2024. Vol. 56. P. 1–46. DOI: <https://doi.org/10.1145/3744339>.
2. Park J., Kim P., Ko D. Real-time open-vocabulary perception for mobile robots on edge devices: a systematic analysis of the accuracy-latency trade-off. Frontiers in Robotics and AI. 2025. Vol. 12. 1693988. DOI: <https://doi.org/10.3389/frobt.2025.1693988>.
3. Худяков І. В., Грицук І. В., Черненко В. В. та ін. Особливості моделювання та побудови інформаційної системи дистанційного моніторингу технічного стану транспортних засобів. Вісник машинобудування та транспорту. 2021. № 2 (14). С. 140–148. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-140-148>.

ISSUES OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF EMBEDDED CONTROL SYSTEMS WITH A COMPUTER VISION MODULE

Artem Husiev, Viktoriia Klym

Abstract. *This paper investigates the relevant problem of improving the efficiency of embedded automatic control systems, where deep learning-based computer vision algorithms act as virtual sensors. Methods of model compression (quantization, pruning) within Edge AI and TinyML approaches are analyzed. It is hypothesized that isolated software optimization of neural networks, without considering the dynamics of the physical object, may reduce the system's stability margins due to the emergence of stochastic noise and variable latency. A comprehensive research methodology is proposed, combining the use of digital twins, simulation (Vision-in-the-loop), emulation, and*

hardware implementation (Hardware-in-the-loop). This approach aims to find the optimal trade-off between inference latency and recognition accuracy to enhance the reliability and efficiency of autonomous cyber-physical systems.

Keywords: *computer vision, embedded systems, automatic control, TinyML, neural network compression.*

REFERENCE

1. El Zeinaty, C., Hamidouche, W., Herrou, G., & Menard, D. (2024). Designing object detection models for TinyML: Foundations, comparative analysis, challenges, and emerging solutions. *ACM Computing Surveys*, 56, 1–46. <https://doi.org/10.1145/3744339>
2. Park, J., Kim, P., & Ko, D. (2025). Real-time open-vocabulary perception for mobile robots on edge devices: A systematic analysis of the accuracy-latency trade-off. *Frontiers in Robotics and AI*, 12, 1693988. <https://doi.org/10.3389/frobt.2025.1693988>
3. Khudiakov, I. V., Gritsuk, I. V., Chernenko, V. V., et al. (2021). Osoblyvosti modeliuвання ta pobudovy informatsiinoi systemy dystantsiinoho monitorynhu tekhnichnoho stanu transportnykh zasobiv. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 14(2), 140–148. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-140-148>.

ПОКРАЩЕННЯ СЕГМЕНТАЦІЇ МОДЕЛІ U-NET З УРАХУВАННЯМ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Димо В.В.¹[ORCID], Гожий О.П.²[ORCID]

¹ЧНУ ім. Петра Могили, аспірант, Україна

²ЧНУ ім. Петра Могили, д.т.н., професор, Україна

Анотація. Незважаючи на важливість підвищення точності та ефективності, у задачах попереднього аналізу пошкоджень ключову роль відіграє оцінка невизначеності, яка використовується для прийняття рішень. Метою дослідження є покращення сегментації модифікованої архітектури U-Net із модулем ASPP та врахуванням невизначеності через Monte Carlo Dropout.

У роботі запропоновано заміну bottleneck на ASPP та застосування стохастичного відсіювання. На основі дисперсії, ентропії та взаємної інформації сформовано карти невизначеності, що покращують сегментацію. Показано, що ASPP підвищує точність визначення форм об'єктів, а комбінована функція втрат — якість результатів. У експериментах досягнуто приросту 3.8% середнього IoU, 4% для вцілілих і 5.3% для зруйнованих будівель. Підтверджено позитивний вплив запропонованих методів і підходів на сегментаційні можливості моделі, водночас для практичного впровадження необхідні подальші дослідження.

Ключові слова: розпізнавання пошкоджених будівель, згорткові нейронні мережі, комп'ютерний зір, семантична сегментація, Monte Carlo Dropout, ASPP, U-Net.

Природні явища – повені, урагани, землетруси, а також військові дії призводять до критичних руйнувань, масштаби яких можуть вимірюватися сотнями і тисячами квадратних кілометрів. Автоматизація виявлення пошкоджених ділянок та попередня оцінка збитків дозволяє не лише прискорити ці процеси, але й зменшити навантаження на логістичні шляхи, оптимізувати надання допомоги й відновлення.

Згорткові нейронні мережі історично зайняли нішу моделей для виявлення об'єктів та сегментації зображень, такі архітектури як YOLO, ResNet, U-Net набули широкого поширення й модифікацій. Наприклад, для U-Net розглядається застосування окремих модулів, а також механізмів уваги, водночас кількісна оцінка невизначеності моделей все ще потребує досліджень [1-2].

Аналізуючи останні дослідження можна виділити декілька основних підходів до оцінки невизначеності: калібрація моделей, моделювання невизначеностей завдяки підходам, що натхненні байєсівськими процесами та деякі інші [3-4]. Наприклад, в контексті модифікації U-Net можуть розглядатися метод Monte Carlo Dropout (MCD) або ансамблі моделей, за допомогою яких можна змодельовати набори прогнозів для розрахунку невизначеності.

Таким чином, актуальність роботи підтверджується необхідністю аналізу можливостей кількісної оцінки невизначеності сегментаційних моделей, в свою чергу, підвищення їх ефективності з урахуванням отриманих результатів, що є важливим компонентом для аналізу пошкоджень і збитків. Мета роботи – покращення сегментації (підвищення точності) моделі U-Net з урахуванням невизначеності з використанням методу MCD.

В рамках дослідження було побудовано декілька моделей модифікованої архітектури U-Net із модулем ASPP (англ. Atrous Spatial Pyramid Pooling), на рис. 1 можна побачити загальну будову мережі.

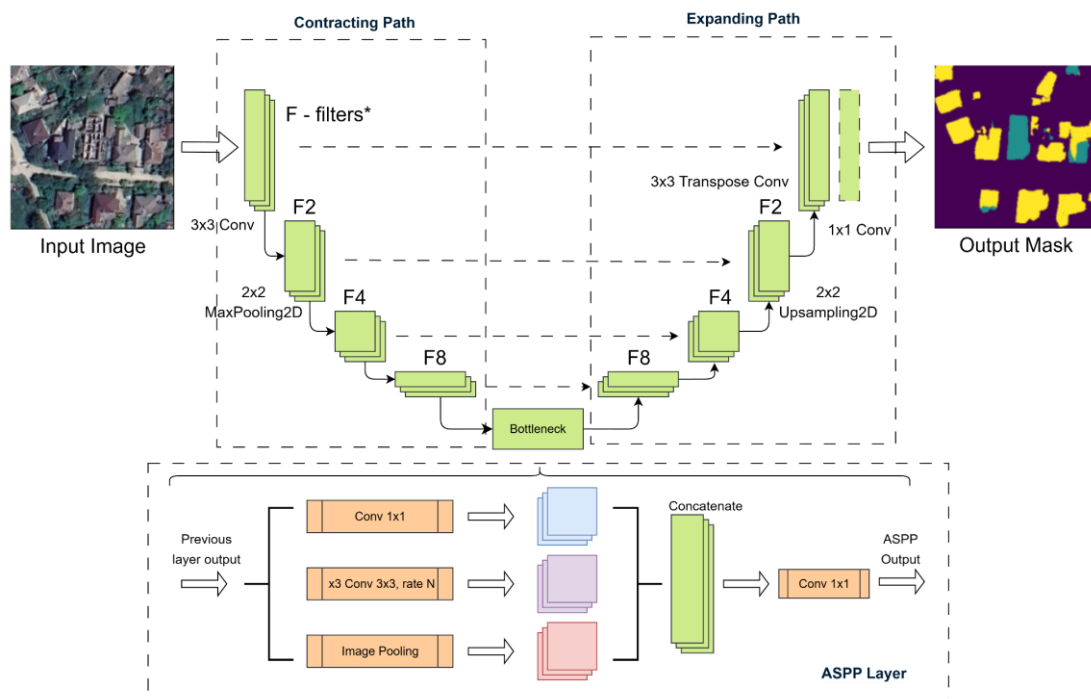


Рисунок 1 - Архітектура моделі згорткової U-Net з модулем ASPP

Архітектура складається зі стискаючого та розширюючого шляхів, що реалізують підхід кодер-декодер для виділення ознак і сегментації зображення.

Вона включає згорткові блоки з операціями 3×3 та функціями активації. Блоки кодера виконують підвибірку (2×2 пулінг) і застосовують dropout, формуючи стискаючий шлях. Блоки декодера здійснюють апсемплінг, конкатенацію ознак із кодера та завершальне застосування dropout.

Модуль ASPP використовує кілька шарів із розрідженими (dilated) фільтрами, що дозволяє ефективно вилучати ознаки різних масштабів без значного зростання обчислювальної складності. Наприкінці результати з кількох гілок об'єднуються, після чого застосовується згортка для узгодження розмірності. Отримані ознаки передаються до декодера, який формує фінальну сегментаційну маску.

Метод Monte Carlo Dropout широко використовується для оцінки невизначеності в глибоких мережах завдяки простоті реалізації. Yarin Gal і Zoubin Ghahramani [3] показали, що dropout можна інтерпретувати як наближений баєсівський висновок, де модель розглядається як сукупність стохастичних підмереж. Під час інференсу dropout залишається активним, і для кожного зразка виконуються багаторазові проходи через мережу. Це дозволяє отримати набір передбачень, на основі якого обчислюються середнє, дисперсія та ентропія. У результаті метод забезпечує як більш стабільний прогноз, так і кількісну оцінку невизначеності моделі.

Для кількісної оцінки невизначеності використано дисперсію, прогностичну ентропію та взаємну інформацію, які широко застосовуються в підходах із Monte Carlo Dropout. Дисперсія відображає варіативність прогнозів, ентропія — загальну невизначеність, а взаємна інформація дозволяє виділити епістемічну складову через розбіжності між окремими передбаченнями та їх середнім значенням. Також було використано узагальнену функцію втрат, яка враховує комбінацію втрат CCE та Dice Loss, що максимізує перекриття між прогнозованою й цільовою сегментаційними масками.

В результаті дослідження було побудовно декілька моделей модифікованої архітектури з різними параметрами, досліджено такі показники як IoU, Mean IoU, Loss, що зведені в єдину таблицю (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняння отриманих метрик різних моделей

Функція втрат	Інші параметри	Loss		IoU Damaged		IoU Intact		IoU Mean	
		Val	Test	Val	Test	Val	Test	Val	Test
CCE	Базова модель	0.275	0.269	0.415	0.395	0.418	0.406	0.546	0.539
	32 фільтри, 0.2 dropout, 10 аугмент.	0.232	0.224	0.436	0.43	0.42	0.409	0.55	0.546
	32 фільтри, 0.3 dropout, 10 аугмент. *	0.147	0.146	0.462	0.453	0.47	0.45	0.586	0.577
	32 фільтри, 0.4 dropout, 10 аугмент.	0.155	0.153	0.437	0.43	0.436	0.423	0.557	0.553
Combined loss	Базова модель	0.256	0.245	0.41	0.404	0.413	0.427	0.559	0.555
	32 фільтри, 0.2 dropout, 10 аугмент.	0.227	0.221	0.431	0.423	0.42	0.399	0.56	0.552
	32 фільтри, 0.3 dropout, 10 аугмент.	0.204	0.199	0.454	0.448	0.462	0.446	0.582	0.577
	32 фільтри, 0.4 dropout, 10 аугмент. **	0.201	0.196	0.456	0.448	0.459	0.444	0.584	0.577

Як видно з результатів, використання комбінованої функції витрат частково підвищує точність сегментації, водночас збільшення варіативності дропауту сповільнює перенавчання мережі, а також впливає на розрахунок невизначеності. На рис. 2 наведено приклад роботи моделі.

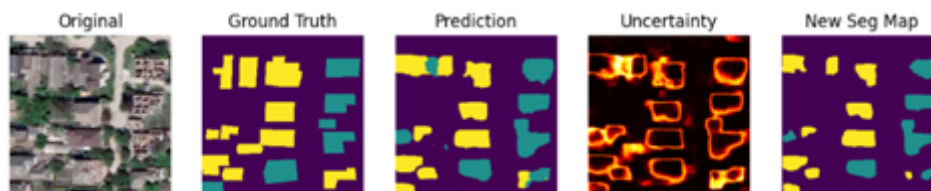


Рисунок 2 – Приклад сегментації зображення, побудовані маски невизначеності й нова сегментована маска на основі двох порогових значень

Висновки

У дослідженні використано модифіковану архітектуру U-Net із модулем ASPP та Monte Carlo Dropout для оцінки невизначеності. На основі дисперсії, ентропії та взаємної інформації побудовано маски невизначеності, які застосовані для покращення сегментації. Зазначається, що ASPP і комбінована функція втрат підвищують точність, забезпечивши приріст до 3.8% середнього IoU та до 5.3% для зруйнованих будівель. Маски невизначеності використано для виділення найбільш надійних ділянок, що підтверджує перспективність подальших досліджень.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Yang Q., Wang Z., Liu S., Li Z. Research on improved U-net based remote sensing image segmentation algorithm. arXiv, 2024. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.12672> (дата звернення: 25.03.2026).
2. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2015. Vol. 37, No. 9. P. 1904–1916. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1406.4729> (дата звернення: 25.03.2026).
3. Gal Y., Ghahramani Z. Dropout as a Bayesian approximation: Representing model uncertainty in deep learning // Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning. 2016. Vol. 48. P. 1050–1059. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.02142> (дата звернення: 26.03.2026).
4. Rey M., Mnih A., Neumann M., Overlan M., Purves D. Uncertainty evaluation of segmentation models for Earth observation. arXiv, 2025. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.19586> (дата звернення: 26.03.2026).

IMPROVEMENT OF U-NET MODEL SEGMENTATION WITH ACCOUNT OF UNCERTAINTY

Valerii Dymo, Aleksandr Gozhyj

Abstract. *Despite the importance of increasing accuracy and efficiency, uncertainty assessment, which is used for decision-making, plays a key role in the tasks of preliminary damage analysis. The aim of the study is to improve the segmentation of the modified U-Net architecture with the ASPP module and taking into account uncertainty through Monte Carlo Dropout (MCD) method.*

The paper proposes replacing the bottleneck with ASPP and applying stochastic dropout. Based on variance, entropy and mutual information, uncertainty maps are formed that improve segmentation. It is shown that ASPP increases the accuracy of determining object shapes, and the combined loss function improves the quality of the results. In the experiments, an increase of 3.8% of the average IoU, 4% for intact and 5.3% for destroyed buildings was achieved. The positive impact of the proposed methods and approaches on the segmentation capabilities of the model is confirmed, while further research is needed for practical implementation.

Keywords: *damaged building recognition, convolutional neural networks, computer vision, semantic segmentation, Monte Carlo Dropout, ASPP, U-Net.*

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ У ПРОМИСЛОВИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ З ВИКОРИСТАННЯМ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Довидовський Е.О.¹ [ORCID], Гуда А.І.² [ORCID], Селівьорстова Т.В.³ [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

²Український державний університет науки і технологій,

д.т.н., професор, Україна

³Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

Анотація. У роботі розглянуто підходи до виявлення аномалій у промислових інформаційно-управляючих системах із використанням методів машинного навчання. Проаналізовано особливості функціонування сучасних виробничих середовищ та пов'язані з ними ризики інформаційної безпеки, що виникають у процесі цифрової трансформації промисловості та інтеграції інформаційних технологій у виробничі процеси. Основну увагу приділено моделям неконтрольованого навчання, які дозволяють формувати узагальнене уявлення про нормальний стан системи без попереднього маркування даних. Розглянуто принцип роботи автоенкодера як інструмента виявлення відхилень на основі аналізу помилки реконструкції. Запропоновано узагальнену концептуальну схему виявлення аномалій, що базується на порівнянні фактичних і відновлених значень параметрів та дозволяє інтерпретувати відхилення як потенційні порушення нормального функціонування системи. Робота має теоретичний характер і спрямована на систематизацію існуючих підходів.

Ключові слова: машинне навчання, аномалії, інформаційна безпека, автоенкодер, промислові системи, поведінковий аналіз.

У промисловості останніх років інформаційні системи перестали бути допоміжним інструментом і фактично стали частиною виробничого процесу. Це особливо помітно у випадку інтеграції SCADA, сенсорних мереж та систем аналітики, які працюють у постійному режимі збору та обробки даних. З одного боку, це підвищує керованість процесів, з іншого — створює додаткові точки вразливості.

Проблема полягає в тому, що будь-яке відхилення в роботі таких систем не завжди легко інтерпретувати. У реальних умовах складно однозначно

сказати, чи є певна зміна параметрів наслідком нормального технологічного процесу, чи це вже сигнал про збій або зовнішнє втручання. Саме тому завдання виявлення аномалій не зводиться до простої перевірки значень на вихід за межі допустимих інтервалів.

Класичні підходи, які базуються на наперед визначених правилах, у таких умовах швидко втрачають ефективність. Вони добре працюють у стабільних системах, але погано реагують на нові або нетипові сценарії. У цьому контексті логічним виглядає перехід до моделей, які можуть самостійно формувати уявлення про нормальну поведінку системи.

Якщо розглядати промислову систему не як набір окремих параметрів, а як динамічну структуру, то стає очевидним, що її “нормальність” визначається не конкретними значеннями, а скоріше їх взаємозв’язками. Наприклад, певне значення температури може бути допустимим лише за конкретного тиску або навантаження. Саме такі залежності і становлять інтерес у задачі виявлення аномалій.

У цьому сенсі машинне навчання виконує роль інструмента, який дозволяє ці залежності відновити з даних [1,2,5]. Особливо це стосується підходів неконтрольованого навчання, де модель не отримує готових прикладів “нормального” і “аномального”, а змушена самостійно знаходити структуру в даних. Це не завжди дає однозначні результати, але дозволяє уникнути залежності від попередньо підготовлених вибірок.

Одним із найбільш інтуїтивно зрозумілих прикладів такого підходу є автоенкодер [3]. Його часто описують як механізм стиснення і відновлення даних, але у контексті цієї задачі більш важливо інше — здатність моделі “звикати” до певного типу вхідних сигналів. Після навчання вона відтворює знайомі патерни досить точно, тоді як нетипові — значно гірше.

Це можна інтерпретувати як непряму оцінку відповідності поточного стану системи її типовій поведінці [4]. Якщо відновлення відбувається з помилкою, яка помітно перевищує звичайний рівень, це дає підстави вважати, що система перебуває у нетиповому режимі. Формально така помилка часто задається через середньоквадратичне відхилення (1):

$$L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2, \quad (1)$$

де x_i — фактичне значення параметра системи у момент часу i , $\hat{x}_i$ — відповідне значення, відновлене моделлю, n — загальна кількість спостережень. Величина L відображає середній рівень розбіжності між реальною поведінкою системи та тією, яку модель вважає типовою.

Однак у практичному сенсі важливе не саме значення функції, а спосіб інтерпретації її змін. Вибір порогового рівня, при якому відхилення вважається аномалією, не є універсальним і зазвичай визначається емпірично.

Якщо спробувати узагальнити логіку роботи такої системи, то вона виглядає як послідовний процес: спочатку дані приводяться до зручного вигляду, далі формується модель, яка описує нормальний стан, і вже потім нові спостереження порівнюються з цим описом. При цьому кожен із етапів може впливати на кінцевий результат, іноді навіть сильніше, ніж сама модель.

Окремо варто звернути увагу на те, що поняття аномалії в подібних задачах не є жорстко визначеним. У реальних системах часто трапляються перехідні режими, які формально відрізняються від «нормальних», але не є помилковими. Це створює ситуацію, коли модель повинна балансувати між чутливістю до відхилень і стійкістю до варіацій.

Інші підходи, такі як кластеризація або ізоляційні методи, вирішують подібну задачу інакше, але загальна ідея залишається тією ж [5,6]. Вони також намагаються виділити структуру даних і знайти елементи, які цій структурі не відповідають.

Висновки

Розглянутий підхід до виявлення аномалій базується на досить простій ідеї: замість того, щоб шукати конкретні ознаки загроз, доцільніше описати нормальну поведінку системи і відслідковувати відхилення від неї. Методи машинного навчання, зокрема автоенкодера, надають інструменти для реалізації такого підходу без жорсткої прив'язки до попередньо визначених сценаріїв.

При цьому слід враховувати, що ефективність подібних рішень значною мірою залежить від контексту застосування. Теоретично описана схема може бути реалізована різними способами, і її практична цінність визначається не лише вибором моделі, але й якістю даних та коректністю інтерпретації результатів.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. Cambridge: MIT Press, 2016. URL: <https://www.deeplearningbook.org>
2. Chandola V., Banerjee A., Kumar V. Anomaly Detection: A Survey. ACM Computing Surveys. 2009. Vol. 41, No. 3. P. 1–58. DOI: 10.1145/1541880.1541882
3. Hinton G. E., Salakhutdinov R. R. Reducing the dimensionality of data with neural networks. Science. 2006. Vol. 313. P. 504–507. DOI: 10.1126/science.1127647
4. Aggarwal C. C. Outlier Analysis. 2nd ed. Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-47578-3
5. Ahmed M., Mahmood A. N., Hu J. A survey of network anomaly detection techniques. Journal of Network and Computer Applications. 2016. Vol. 60. P. 19–31. DOI: 10.1016/j.jnca.2015.11.016
6. Goh J., Adepu S., Junejo K. N., Mathur A. A dataset to support research in the design of secure water treatment systems (SWaT). International Conference on Critical Information Infrastructures Security. 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-71368-7_25

CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF ANOMALY DETECTION IN INDUSTRIAL INFORMATION SYSTEMS USING MACHINE LEARNING

Eduard Dovydivskyi, Anton Guda, Tetiana Seliverstova

Abstract. *The paper provides a conceptual overview of anomaly detection in industrial information systems with a focus on machine learning methods. The discussion emphasizes unsupervised approaches for modeling normal system behavior and detecting deviations without predefined attack patterns. The work is descriptive and aims to clarify the underlying principles rather than present experimental validation.*

Keywords: *machine learning, anomaly detection, cybersecurity, autoencoder, industrial systems, behavioral analysis*

СТВОРЕННЯ КРИЗОВО-ЗАЛЕЖНОГО ДАТАСЕТУ ДЛЯ ADAPTIVE IRM

Березюк М.О.¹ [ORCID], Гуда А.Ю.² [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

²Український державний університет науки і технологій,

д.т.н., професор, Україна

Анотація. У кризових ситуаціях великі мовні моделі (LLM) мають потенціал допомагати у формуванні порад та рекомендацій, однак їх стандартна поведінка часто ігнорує специфіку події. Це знижує релевантність і може становити ризик у критичних ситуаціях. У роботі представлено підхід до створення спеціалізованого датасету для навчання та оцінки Adaptive IRM – модуля, який інжектує прихований кризовий контекст у LLM. За основу взято корпус HumAID із твітами про стихійні лиха, для яких згенеровано абстрактні запитання без прямої згадки події. Сформований набір (~41 тис. прикладів) дозволяє перевіряти, чи здатні моделі з Adaptive IRM давати відповіді, що відрізняються залежно від типу кризи, підвищуючи їх релевантність і безпечність.

Ключові слова: контекстно залежна генерація; великі мовні моделі; мультимодальний датасет; анотація кризових даних; кризова інформатика; датасет HumAID; ін'єкція контексту; адаптація поведінки моделі.

Вступ

Генеративні LLM усе частіше застосовуються у кризових ситуаціях, однак без урахування контексту подій вони схильні продукувати загальні або ризиковані поради [1,2]. Відсутність у публічних корпусах пар типу «абстрактний запит – відповідь, адаптована під конкретну кризу» ускладнює оцінку методів керованої адаптації.

Запропонований кризово-залежний датасет вирішує цю проблему: він дозволяє навчати та перевіряти Adaptive IRM – модуль, що інжектує латентний контекст (наприклад, повінь, пожежа, землетрус, ураган) у LLM [3]. Завдяки цьому однакові абстрактні запитання породжують різні відповіді, сфокусовані на конкретній ситуації.

Таким чином, датасет створює основу для об'єктивної оцінки та розвитку методів контекстно залежної генерації, підвищуючи релевантність і безпечність використання LLM у критичних умовах.

Основний матеріал

Для побудови корпусу було використано відкритий датасет HumAID, який містить понад 77 тисяч твітів, промаркованих за 19 типами кризових подій, зібраних у 2016–2019 роках [4]. Це один із найбільш повних публічних ресурсів у сфері crisis informatics, що охоплює землетруси, повені, урагани, пожежі та інші стихійні лиха. З нього було відібрано приблизно 41 тисячу прикладів, що дозволило зберегти баланс між обсягом даних та дотриманням політики Twitter щодо обмеження поширення первинних записів.

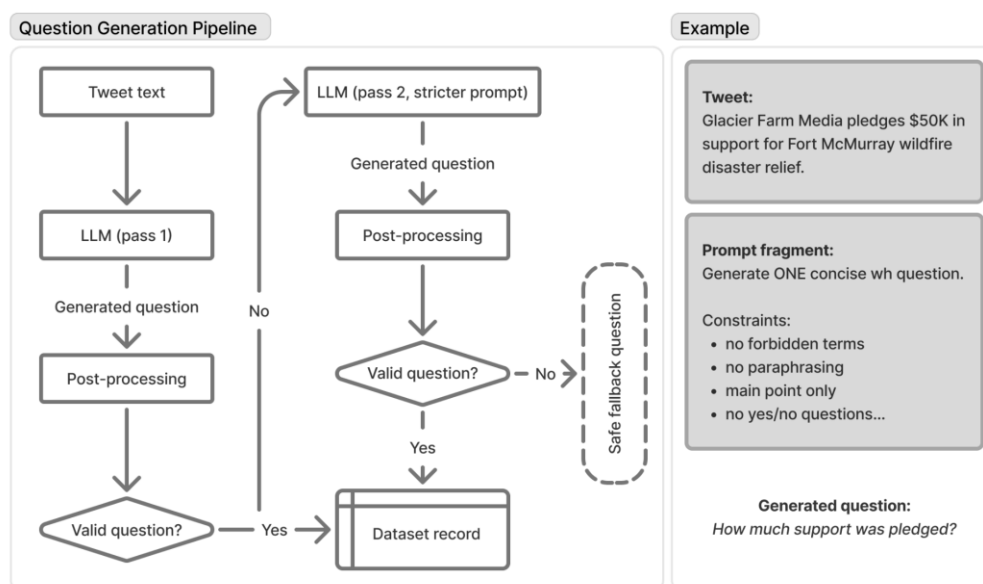


Рисунок 1 - Конвеєр генерації запитань для побудови кризо-незалежних запитів на основі твітів.

Для заданого твіту LLM генерує кандидатне запитання (перший прохід), яке далі проходить постобробку та перевірку. Якщо перевірка не пройдена, виконується другий прохід генерації з використанням суворішого промпта. Якщо обидві спроби є неуспішними, використовується безпечне запасне запитання. Запитання вважається коректним, якщо воно не містить заборонених термінів, пов'язаних із кризами, не є перефразуванням вхідного твіту, відповідає формату WH-запитання та задовольняє обмеження довжини. Постобробка включає нормалізацію, зокрема виділення одного запитання та забезпечення коректного форматування. Фрагмент промпта наведено у скороченому вигляді з ілюстративною метою.

На основі цих повідомлень за допомогою моделі GPT-OSS 20B було згенеровано абстрактні запитання, які не містять явних згадок про кризу. Для кожного твіту передбачалося одне запитання, що дозволило зменшити обчислювальні витрати та стандартизувати структуру даних. У випадках, коли модель некоректно включала назву події, використовувались підготовлені fallback-запитання на кшталт «Яка зараз ситуація?». Такий підхід дозволив зберегти узгодженість формату, а також забезпечив контроль якості: вибіркова перевірка сотні прикладів підтвердила валідність сформованих запитань.

У підсумковому датасеті кожен запис включає ідентифікатор повідомлення, його текст, категорію кризи, сформоване запитання та позначку методу генерації. Для подальших експериментів корпус поділяється на навчальну, валідаційну та тестову підвибірки зі збереженням пропорційності кризових типів, що мінімізує ризик дисбалансу та підвищує надійність оцінки.

Сконструйований датасет використовується для навчання та оцінки роботи Adaptive IRM - невеликого нейронного модуля, що інтегрується у forward pass LLM і модифікує його внутрішні представлення залежно від кризового контексту. Основна ідея полягає в тому, що на однакові абстрактні запитання модель повинна відповідати по-різному, якщо контекстом виступає, наприклад, повінь чи пожежа. Таким чином, IRM виконує роль механізму керованої адаптації, що інжектує приховану інформацію про тип події, не змінюючи основні ваги LLM.

Ефективність такого підходу оцінюється шляхом порівняння базової моделі та моделі з Adaptive IRM. Для вимірювання якості відповідей використовується метрика BERTScore, яка дозволяє обчислити семантичну близькість між згенерованим текстом та оригінальними кризовими повідомленнями. Додатково застосовується семантичний класифікатор, що дає змогу визначити, наскільки відповідь належить до правильного кризового класу. Це дозволяє оцінити не лише змістовність, а й стійкість адаптації у різних сценаріях.

Висновки

Побудований корпус із приблизно 41 тисячі пар «текст твіту – абстрактне запитання - кризовий тип» створює основу для валідації Adaptive IRM як інструменту контекстно залежної генерації. Навіть у текстовому форматі такий ресурс дозволяє перевірити, чи здатна модель змінювати свою поведінку динамічно залежно від поданого контексту.

Подальший розвиток дослідження передбачає кілька напрямів: розширення корпусу за рахунок генерації кількох запитань на один твіт, включення мультимодальних даних (зображень, сенсорних показників та інших аналітичних сигналів), а також проведення user studies із залученням експертів у сфері реагування на надзвичайні ситуації для оцінки практичної корисності та безпечності системи.

Серед ключових обмежень варто відзначити використання fallback-питань приблизно у 4.5% прикладів, а також ризик надмірної категоричності або помилкових рекомендацій з боку моделі. Для зниження цих ризиків у майбутньому планується впровадження додаткових механізмів фільтрації та аудит безпеки.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Otal H. T., Canbaz M. A. C. LLM-Assisted Crisis Management: Building Advanced LLM Platforms for Effective Emergency Response and Public Collaboration // 2024 IEEE Conference on Artificial Intelligence (CAI). 2024. P. 851–859. DOI: 10.48550/arXiv.2402.10908.
2. Fengyi X. та ін. Large language model applications in disaster management: An interdisciplinary review // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2025. Vol. 127. Art. No. 105642. DOI: 10.1016/j.ijdr.2025.105642.
3. Березюк М. О., Гуда А. І. Контекстно залежна адаптація відповідей генеративних LLM. Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні – ITMM'2025 : тези доп. Міжнародної наук.-техн. конф. (м. Дніпро, 23-24 березня 2025 р.). Дніпро, 2025. С. 503–508. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2025.01.089.
4. Alam F., Qazi U., Imran M., Ofli F. HumAID: Human-Annotated Disaster Incidents Data from Twitter with Deep Learning Benchmarks [Електронний ресурс]. 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2104.03090> (дата звернення: 11.03.2026).

CREATING A CRISIS-DEPENDENT DATASET FOR ADAPTIVE IRM

M. Berezuk, A. Guda

Abstract. *In crisis communications, Large Language Models (LLMs) have the potential to assist in generating guidance and recommendations; however, their default behavior often ignores the specific nature of the event. This reduces relevance and may pose risks in critical situations. This paper presents an approach to constructing a specialized dataset for training and evaluating Adaptive IRM - a module that injects latent crisis context into the forward pass of an LLM. The HumAID corpus of disaster-related tweets was used as a foundation, with abstract questions generated without explicit mentions of the crisis type. The resulting dataset (~41K examples) enables the assessment of whether models equipped with Adaptive IRM can produce responses that vary according to the crisis type, thereby improving both relevance and safety.*

Keywords: *context-aware generation; large language models; multimodal dataset; crisis data annotation; crisis informatics; HumAID dataset; context injection; model behavior adaptation.*

ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ПЛАНУВАННІ ХМАРНОЇ МІГРАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Євланов М.В.¹ [ORCID], Шутько В.В.² [ORCID]

¹Харківський національний університет радіоелектроніки,
д.т.н., професор, Україна

²Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант, Україна

Анотація. Проаналізовано сучасні підходи до використання засобів штучного інтелекту в плануванні хмарної міграції інформаційних систем. Показано, що в умовах цифрової трансформації хмарна міграція дедалі більше набуває ознак задачі інтелектуальної підтримки прийняття рішень, у межах якої застосовуються методи машинного навчання, прогностної аналітики, інтелектуального аналізу даних і автоматизації окремих етапів перенесення. На основі аналізу досліджень 2025–2026 років встановлено, що засоби ШІ вже демонструють результативність у підготовці даних до міграції, аналізі архітектурних залежностей, оптимізації ресурсів, підтримці мікросервісної трансформації та супроводі постміграційної експлуатації. Водночас виявлено, що більшість наявних праць зосереджена на окремих підпроцесах або суміжних завданнях, тоді як цілісні інтелектуальні моделі планування хмарної міграції ще не є достатньо сформованими. Обґрунтовано перспективність подальших досліджень у напрямі побудови інтегрованих систем інтелектуальної підтримки міграційних рішень.

Ключові слова: дані, планування, хмарна міграція, штучний інтелект

У сучасних умовах цифрової трансформації планування хмарної міграції інформаційних систем (ІС) дедалі частіше розглядається не лише як інженерне або організаційне завдання, а як задача інтелектуальної підтримки прийняття рішень. Такий підхід передбачає використання різних засобів штучного інтелекту (ШІ), зокрема моделей машинного навчання, методів прогностної аналітики, засобів оброблення неструктурованих даних, систем інтелектуального аналізу та агентних рішень. Їх застосування дає змогу не лише автоматизувати окремі етапи аналізу, а й підвищити обґрунтованість рішень щодо оцінювання стану системи, прогнозування ризиків, вибору варіанта перенесення та адаптації міграційного плану до змін середовища.

Унаслідок цього ІІІ поступово стає важливим засобом підвищення точності, гнучкості та адаптивності планування хмарної міграції ІС.

Аналіз досліджень 2025–2026 років показав, що в центрі уваги перебуває застосування методів і засобів ІІІ для оцінювання стану системи, прогнозування ризиків, вибору варіанта перенесення та адаптації міграційного плану до змін середовища. Дослідження демонструють, що ІІІ у задачах планування хмарної міграції використовується передусім як засіб інтелектуалізації аналітичного етапу.

У роботі [1] засоби ІІІ розглядалися як інструмент підготовки систем бізнес-аналітики до безпечної хмарної міграції. Основна сфера їх застосування пов'язувалася не з вибором загальної стратегії перенесення, а з автоматизованим виявленням чутливих даних, їх анонімізацією та подальшою перевіркою збереження аналітичної придатності наборів даних після перенесення у хмарне середовище. Було запропоновано інтелектуальний конвеєр оброблення, у межах якого модель класифікатора дерева рішень використовувалася для виявлення чутливих стовпців за структурними ознаками даних, а далі застосовувалися комбіновані механізми псевдонімізації, хешування та маскуванню з урахуванням ролі кожного атрибута в аналітиці бізнес-даних. Перевагою такого підходу було зменшення ручної праці, зниження впливу людського фактору, автоматичне виявлення не лише очевидних, а й приховано чутливих полів, а також збереження структурної сумісності даних із засобами бізнес-аналітики. Для перевірки того, що анонімізація не «руйнувала» аналітичну цінність даних, було використано метод випадкового лісу (Random Forest), метод головних компонент (Primary Component Analysis), метод k-середніх (K-Means) і кореляційний аналіз, унаслідок чого було встановлено, що модель виявлення чутливих даних досягла близько 99% точності. Водночас до обмежень такого підходу було віднесено використання лише синтетичного набору даних, відсутність повної перевірки масштабованості на промислових обсягах та орієнтацію лише на структуровані табличні дані. Це не дозволяло безпосередньо узагальнювати результати на всі реальні сценарії хмарної міграції ІС, однак підтверджувало

перспективність використання засобів ШІ для забезпечення безпечної та аналітично керованої міграції рішень бізнес-аналітики у хмару.

У дослідженні [2] засоби ШІ розглядалися у значно ширшому контексті життєвого циклу мікросервісних систем, що було важливим для тематики хмарної міграції, оскільки сучасне перенесення ІС у хмару часто супроводжується переходом від монолітної до мікросервісної архітектури. На основі аналізу 269 рецензованих праць 2017–2023 років було показано, що засоби ШІ застосовувалися в усіх ключових фазах безперервної розробки та експлуатації мікросервісів, хоча найбільша концентрація досліджень припадала на етапи розгортання, функціонування і моніторингу, а домінуючими цілями були підвищення продуктивної ефективності та надійності. У роботі було встановлено, що найпоширенішими напрямками застосування ШІ були автоматичне масштабування, виділення ресурсів, планування виконання, виявлення аномалій, аналіз першопричин, діагностика відмов, а також автоматизація декомпозиції монолітних застосунків у мікросервіси, причому для цього переважно використовувалися методи машинного навчання, глибокого навчання, навчання з підкріпленням, оптимізаційні алгоритми та кластеризація. Для тематики хмарної міграції особливо важливим був висновок про те, що засоби ШІ вже давали відчутний результат у суміжних із міграцією завданнях. Вони покращували розподіл ресурсів, адаптивне масштабування, виявлення вузьких місць продуктивності, автоматизацію експлуатації та підтримку реконструкції мікросервісної структури із застарілих систем, що безпосередньо впливало на обґрунтованість архітектурних і міграційних рішень. Водночас робота виявила і суттєві обмеження сучасного стану досліджень. Переважна більшість підходів була орієнтована на операційні фази, тоді як застосування ШІ у фазах планування, програмування і тестування, де якраз формувалися стратегічні рішення щодо хмарної міграції, залишалося недостатньо розвиненим. Крім того, майже були відсутні дослідження, спрямовані на переносність, сумісність та зручність використання, а також обмежено було представлено генеративний ШІ і пояснюваний ШІ. Таким чином, дослідження сформувало підґрунтя для

подальшого аналізу використання засобів ІІІ на окремих етапах хмарної міграції, зокрема в аналізі архітектурних залежностей, автоматизації трансформації систем, оптимізації розгортання ІС у мікросервісному хмарному середовищі.

Нарешті, у роботі [3] засоби ІІІ розглядалися як комплексний інструментарій підтримки хмарної міграції та модернізації корпоративних ІС, причому їх застосування охоплювало практично весь життєвий цикл міграції: від попереднього аналізу портфеля застосунків до постміграційного моніторингу й оптимізації. Основними сферами використання ІІІ були автоматизований аналіз застосунків перед міграцією, побудова карт залежностей, прогнозування ресурсних потреб і витрат. Також туди увійшли підтримка вибору міграційної стратегії, автоматизація контейнеризації, рефакторингу та інфраструктури як коду (Infrastructure as a Code), а також інтелектуальний моніторинг, виявлення аномалій. Перевагами такого підходу в роботі визначалися зменшення операційних витрат і технічного боргу, підвищення точності оцінювання складності міграції, прискорення планування та виконання міграції. Також було виокремлено зниження когнітивного навантаження на архітекторів і команду міграції, а також можливість переходу від статичних рішень до планування, керованого даними, і безперервної оптимізації. Особливий акцент було зроблено на тому, що інтелектуальні засоби підтримки міграції дозволяли точніше класифікувати застосунки за придатністю до різних сценаріїв перенесення, краще виявляти приховані залежності між компонентами та більш обґрунтовано балансувати між продуктивністю, вартістю, безпекою і відповідністю вимогам. Як результат, було зроблено висновок: впровадження ІІІ дало змогу досягати вимірюваних покращень у часових параметрах міграції, продуктивності після міграції, ефективності розподілу ресурсів та операційній стійкості. Наведені галузеві приклади з фінансового сектору, охорони здоров'я, роздрібної торгівлі та сфери виробництва демонстрували, що використання інтелектуальних механізмів сприяло не лише технічному перенесенню систем у хмару, а й ширшій трансформації стратегій модернізації підприємств. Водночас робота

була переважно узагальнювальною та концептуальною, спиралася на огляд підходів і приклади застосування, але не подавала формалізованої експериментальної моделі оцінювання ефективності конкретної інтелектуальної моделі хмарної міграції, тому її доцільно було розглядати насамперед як систематизований доказ перспективності засобів ІІІ для інтелектуалізації планування, виконання та супроводу хмарної міграції ІС.

Отже, розглянуті дослідження репрезентують не єдину завершену концепцію інтелектуального планування хмарної міграції, а сукупність взаємодоповнювальних підходів, кожен із яких розкриває окремий аспект потенціалу засобів ІІІ в цьому процесі.

Висновки

Таким чином, сучасні дослідження підтверджують, що засоби ІІІ вже є результативними в окремих аналітичних, захисних, інфраструктурних та експлуатаційних завданнях, пов'язаних із хмарною міграцією інформаційних систем, і саме через це вони формують реальне підґрунтя для інтелектуалізації планування міграції. Водночас наявні праці переважно або розглядають окремі підпроцеси, або мають суміжний щодо міграції характер, або залишаються концептуальними й оглядовими. Тому на поточному етапі доцільно стверджувати, що використання засобів ІІІ поступово формує набір методів і засобів, з яких може бути побудована майбутня цілісна система інтелектуальної підтримки рішень для планування хмарної міграції ІС.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Khouibiri N., Farhaoui Y., El Allaoui A. AI-driven anonymization for secure and privacy-preserving business intelligence cloud migration. *Discover Computing*. 2026. Т. 29, № 1. URL: <https://doi.org/10.1007/s10791-025-09898-3> (дата звернення: 31.03.2026).
2. AI Techniques in the Microservices Life-Cycle: a Systematic Mapping Study / S. Moreschini та ін. *Computing*. 2025. Т. 107, № 4. URL: <https://doi.org/10.1007/s00607-025-01432-z> (дата звернення: 31.03.2026).
3. Ajay Varma Indukuri. AI-Powered Cloud Migration: Transforming Enterprise Modernization Strategies. *Journal of Computer Science and Technology Studies*. 2025. Т. 7, № 2. С. 567–575. URL: <https://doi.org/10.32996/jcsts.2025.7.2.60> (дата звернення: 31.03.2026).

USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS IN CLOUD MIGRATION OF INFORMATION SYSTEMS PLANNING

Maksym Ievlanov, Viktor Shutko

Abstract. *Modern approaches to the use of artificial intelligence tools in planning cloud migration of information systems are analyzed. It is shown that in the context of digital transformation, cloud migration is increasingly acquiring the characteristics of the task of intelligent decision support, within which the methods of machine learning, predictive analytics, data mining and automation of individual stages of migration are used. Based on the analysis of the 2025–2026 studies, it was found that AI tools are already demonstrating effectiveness in preparing data for migration, analyzing architectural dependencies, optimizing resources, supporting microservice transformation, and supporting post-migration operation. At the same time, it has been found that most of the available works are focused on separate sub-processes or related tasks, while holistic intelligent models of cloud migration planning are not yet sufficiently formed. The prospects of further research in the direction of building integrated systems of intellectual support for migration solutions are substantiated.*

Keywords: *artificial intelligence, cloud migration, data, planning*

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕЛЕМЕТРИЧНИХ ДАНИХ МАНЕВРОВИХ ТЕПЛОВОЗІВ

Іващев Д. В.¹ [ORCID], Герасимов В. В.² [ORCID]

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, аспірант, Україна

²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,

к.т.н., доцент, Україна

Анотація. Дослідження присвячено статистичному аналізу великих масивів телеметричних даних маневрових тепловозів (понад 4,89 млн вимірювань) для контролю їхньої енергоефективності. Проаналізовано дискретні багатовимірні часові ряди, що включають рівень палива, швидкість та потужність. Встановлено, що безперервний потік даних містить апаратні та експлуатаційні перешкоди (виявлено 1501 апаратний викид), що ускладнює пряме застосування стандартних алгоритмів. Розраховано глобальні статистичні характеристики, які свідчать про високу дисперсію та асиметрію розподілу. Виявлено значну частку часу знаходження тепловозів у стані простою (57,7–98,8%), під час якого дизель-генераторна установка продовжує споживати паливо. Крос-кореляційний аналіз показав низьку загальну кореляцію між рівнем палива та потужністю (0,055–0,341), яка зростає до 0,485 у режимах активного навантаження. Доведено необхідність обов'язкової попередньої фільтрації та сегментації даних для коректного алгоритмічного виявлення експлуатаційних аномалій.

Ключові слова: телеметричні дані, маневровий тепловоз, статистичний аналіз, часовий ряд, енергоефективність, крос-кореляція, фільтрація даних.

Вступ

В умовах експлуатації маневрових тепловозів системи телеметричного моніторингу використовуються для контролю енергоефективності рухомого складу. Безперервний потік бортових даних містить аномалії, спричинені різними чинниками. Базовий (медіанний) крок дискретизації становить 1 хвилину. Вплив зовнішніх факторів та специфіка роботи ємнісних датчиків рівня палива [1] зумовлюють появу дефектів та розривів у часовому ряді. Це впливає на рівномірність масиву даних, що обмежує застосування стандартних алгоритмів визначення експлуатаційних витрат без попереднього статистичного аналізу всього часового ряду в цілому. Метою дослідження є

статистичний аналіз телеметричних даних без їх попередньої сегментації на окремі експлуатаційні стани. Це дозволяє оцінити імовірісно-статистичні характеристики потоку та визначити природу аномалій у даних.

Основний матеріал

Загальний телеметричний потік формалізується у вигляді дискретного багатозначного часового ряду:

$$Z = \{t_i, V_i, S_i, P_i\}_{i=1}^N$$

де t_i — часова мітка i -го вимірювання; V_i — рівень палива у баках (л); S_i — швидкість тепловоза (км/год); P_i — потужність дизель-генераторної установки (кВт); N — кількість точок вимірювання.

Суцільна вибірка з шести маневрових тепловозів охоплює $N = 4\,898\,881$ вимірювань. Для отримання достовірних статистичних оцінок, перед розрахунком ключових моментів розподілу масив даних був очищений від аномалій. Для ідентифікації аномалій у ряді $V(t)$ застосовувалося обчислення дискретного градієнта швидкості зміни об'єму [3]:

$$\Delta V_i = \left| \frac{V_i - V_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right|$$

Точки, у яких градієнт ΔV_i перевищує фізично можливі межі швидкості зміни об'єму палива, ідентифікувалися як апаратні викиди. У процесі обробки масиву було вилучено 1501 такий стрибок сигналу. Розраховані на очищеному масиві ключові статистичні характеристики наведені у табл. 1.

Таблица 1

Глобальні статистичні характеристики часових рядів

Характеристика (параметр)	Діапазон значень
Загальний обсяг вибірки, вимірювань	4 898 881
Медіанний рівень палива у баках V_{med} , л	3391 ÷ 4679
Частка часу знаходження у стані простою ($S = 0$), %	57,74 ÷ 98,83
Середньоквадратичне відхилення рівня палива σ_V , л	689 ÷ 1180
Максимальна зафіксована потужність ДГУ P_{max} , кВт	753 ÷ 1537
Коефіцієнт асиметрії ряду палива	-0,511 ÷ -0,246
Екссес ряду рівня палива	2,14 ÷ 4,35

Статистичний аналіз масиву швидкості $S(t)$ демонструє асиметричний розподіл. Відсоток нульових значень швидкості (стан простою) варіюється від

57,7% до 98,8% залежно від тепловоза. Водночас часовий ряд потужності $P(t)$ показує, що дизель-генераторна установка генерує енергію для допоміжних систем навіть у стані простою, демонструючи **середнє значення потужності на рівні 8,6 кВт (від 4,7 до 11,1 кВт залежно від локомотива)** із середньоквадратичним відхиленням 115–346 кВт.

Часовий ряд рівня палива $V(t)$ містить коливання, пов'язані з динамікою рідини. Розрахований коефіцієнт ексцесу досягає 4,35, що вказує на наявність значної кількості викидів розподілу [2]. Коефіцієнт асиметрії є від'ємним (від -0,24 до -0,51), що відповідає загальному тренду на споживання палива. Взаємозв'язок параметрів у часовому ряді оцінюється через крос-кореляційну функцію R_{VP} між споживанням палива та потужністю:

$$R_{VP} = \frac{\sum (V_i - \bar{V})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum (V_i - \bar{V})^2 \sum (P_i - \bar{P})^2}}$$

Розрахунки (табл. 2) показують, що глобальна крос-кореляція є низькою (0,055 – 0,341) внаслідок значної частки режимів холостого ходу.

Таблиця 2

Крос-кореляційний аналіз глобальних параметрів

Об'єкт	R (Паливо-Швидкість) загальне	R (Паливо-Потужність) загальне	R (Паливо-Потужність) в активному режимі
Тепловоз 1	0,003	0,071	0,097
Тепловоз 2	-0,011	0,114	0,258
Тепловоз 3	-0,029	0,341	0,485
Тепловоз 4	0,013	0,113	0,162
Тепловоз 5	0,003	0,151	0,135
Тепловоз 6	0,001	0,055	0,156

При виключенні ділянок простою коефіцієнт кореляції зростає до 0,485, що вказує на наявність помірного лінійного зв'язку між параметрами під навантаженням.

Висновки

Проведений статистичний аналіз масиву обсягом 4,89 млн вимірювань показує, що телеметричні ряди маневрових тепловозів характеризуються високим рівнем дисперсії (до $1,39 \times 10^6$) та наявністю асиметрії у показниках

споживання палива. Значна частка часу простою (від 57,7% до 98,8%) призводить до низької загальної крос-кореляції між рівнем палива та потужністю (0,055–0,341), яка зростає до 0,485 лише у режимах активного навантаження. Виявлення 1501 апаратного викиду та розривів зв'язку тривалістю до 176 годин підтверджує необхідність попередньої фільтрації та сегментації масиву. Виконання цих процедур є обов'язковою умовою для алгоритмічного виявлення експлуатаційних аномалій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Navixy. Fuel level sensors: resistive, capacitive, ultrasonic methods. URL: <https://www.navixy.com/blog/fuel-level-sensors/> (дата звернення: 20.03.2026).
2. Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 5th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2015. 712 p.
3. Іващев Д., Герасимов В. Алгоритм сегментації даних вимірювань рівня палива на транспорті. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2025. № 2 (332). С. 60–65. DOI: 10.31891/2219-9365-2025-82-60.

STATISTICAL ANALYSIS OF TELEMETRY DATA OF SHUNTING LOCOMOTIVES

D.V. Ivashchev, V.V. Herasymov

Abstract. *The study is devoted to the statistical analysis of large arrays of telemetry data of shunting locomotives (over 4.89 million measurements) to monitor their energy efficiency. Discrete multidimensional time series including fuel level, speed, and power were analyzed. It has been established that the continuous data stream contains hardware and operational interference (1501 hardware spikes were detected), which complicates the direct application of standard algorithms. Global statistical characteristics have been calculated, indicating high variance and asymmetry of the distribution. A significant proportion of the time shunting locomotives spend in idle state (57.7–98.8%) was revealed, during which the diesel generator set continues to consume fuel. Cross-correlation analysis showed a low overall correlation between fuel level and power (0.055–0.341), which increases to 0.485 in active load modes. The necessity of mandatory preliminary filtering and segmentation of data for the correct algorithmic detection of operational anomalies is proved.*

Keywords: *telemetry data, shunting locomotive, statistical analysis, time series, energy efficiency, cross-correlation, data filtering.*

REFERENCES

1. Navixy. Fuel level sensors: resistive, capacitive, ultrasonic methods. URL: <https://www.navixy.com/blog/fuel-level-sensors/> (date of access: 20.03.2026).
2. Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 5th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2015. 712 p.
3. Ivashchev D., Herasymov V. Alhorytm sehmentatsii danykh vymiriuvan rivnia palyva na transporti. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. 2025. № 2 (332). S. 60–65. DOI: 10.31891/2219-9365-2025-82-60.

МЕТОДОЛОГІЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ВІЯВЛЕННЯ НАЗЕМНИХ МІН З ВИКОРИСТАННЯМ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Дмитрієва І.С.¹ [ORCID], Бімалов Д.В.² [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, України

²Український державний університет науки і технологій, аспірант, України

Анотація. У представленому дослідженні розглянуто методологічні засади застосування радіолокаційних технологій для дистанційного виявлення наземних мін шляхом інтеграції георадара та техніки синтезованої апертури. Запропоновано інноваційний підхід до створення системи на основі безпілотного літального апарата, котрий забезпечує безконтактну діагностику територій. Детально проаналізовано структуру вхідних даних, основні етапи обробки сигналів, а також специфіку формування радіолокаційних зображень. Доведено ефективність запропонованого методу для ідентифікації неметалевих об'єктів, одночасно окреслені ключові обмеження, що виникають у результаті впливу фізико-хімічних характеристик ґрунту та умов навколишнього середовища.

Ключові слова: георадар, синтезована апертура, безпілотний літальний апарат, дистанційне зондування, радіолокаційні зображення.

Виявлення наземних мін залишається важливим завданням у сфері дистанційного зондування. Традиційні методи, зокрема застосування металодетекторів, проявляють невисоку ефективність в умовах зростання використання сучасних вибухових пристроїв із мінімальним або зовсім відсутнім вмістом металу, що зумовлює необхідність пошуку нових підходів для ідентифікації подібних загроз.

Одним із перспективних напрямків є використання радіолокаційних технологій, таких як георадарні системи (GPR), які дозволяють аналізувати структуру ґрунту на певній глибині [1]. У межах дослідження запропонований інноваційний метод дистанційного виявлення мін, який базується на інтеграції георадара з безпілотним літальним апаратом (БПЛА). Ця система використовує технологію синтезованої апертури (SAR), що суттєво підвищує якість зібраних даних та ефективність аналізу[2]. Запропонований підхід дозволяє проводити

обстеження територій без прямого фізичного контакту, забезпечуючи значно вищий рівень безпеки під час виконання робіт.

Розроблена система призначена для отримання радарних зображень підповерхневих шарів ґрунту, що дає змогу виявляти потенційні загрози, пов'язані з присутністю вибухонебезпечних предметів. Її функціонування базується на інтеграції радіолокаційних даних із навігаційними параметрами, що забезпечує високу точність у визначенні просторового розташування об'єктів.

Георадар працює з широкосмговими сигналами у частотному діапазоні 3,1–5,1 ГГц, які відбиваються від неоднорідних структур під поверхнею ґрунту. Основні формати обробки даних включають A-scan і B-scan. Формат A-scan представляє собою часовий сигнал, отриманий у певній точці, тоді як B-scan формується як послідовність таких сигналів, зібраних уздовж траєкторії руху, наприклад, дрона. Відбиті сигнали дозволяють аналізувати межі матеріалів із різною діелектричною проникністю, що сприяє ефективному розпізнаванню як металевих, так і неметалевих об'єктів.

Для досягнення високої ступені точності в процесі реконструкції даних використовується інтегрована навігаційна система, яка об'єднує технологію RTK-GPS з інерційними вимірювальними пристроями. Це поєднання забезпечує точне визначення географічних координат, що є критично важливим підґрунтям для успішної реалізації алгоритмів обробки, особливо тих, які базуються на методах, пов'язаних із принципами синтезованої апертури.

Процедура обробки радіолокаційних даних включає проходження кількох послідовних етапів, кожен з яких відіграє унікальну роль у досягненні максимальної точності та деталізації кінцевого результату. Перший етап передбачає виконання фільтрації отриманих сигналів. Ця стадія зосереджена на видаленні різного роду шумів, усуненні небажаних компонентів фоновому характеру та приглушенні відбиттів, які виникають на межі розділу між повітрям і ґрунтом. Відбиття такого роду зазвичай мають високу амплітуду і можуть створювати перешкоди, що здатні приховувати критично важливу

інформацію, яка походить від підповерхневих об'єктів. Подальшим етапом є процес просторової прив'язки даних сигналу. Він передбачає ретельну синхронізацію інформації, отриманої від радіолокаційних систем і навігаційних пристроїв, а також проведення інтерполяції траєкторії руху безпілотного літального апарата (БПЛА). Така інтеграція дозволяє точно локалізувати кожне отримане вимірювання в географічному просторі, що має вирішальне значення для достовірного подальшого аналізу та моделювання.

Одним із найбільш технологічно складних і важливих етапів є впровадження методів, що базуються на принципах синтезованої апертури. У цьому контексті досягається унікальна можливість багаторазового спостереження одного й того самого об'єкта з різних ракурсів під час переміщення БПЛА вздовж траєкторії польоту. Зібрані сигнали об'єднуються методами когерентного підсумовування, що дозволяє суттєво підвищити просторову роздільну здатність системи. До того ж, це забезпечує покращення співвідношення сигналу до шуму, що безпосередньо сприяє створенню більш точного й деталізованого зображення досліджуваних об'єктів під поверхнею. Таким чином, реалізація цих технологій дозволяє не лише вдосконалити якість отриманих даних, але й розширити спектр застосування методів дистанційного зондування.

Процес створення радіолокаційного зображення реалізується шляхом використання методу зворотної проекції, який забезпечує можливість формування двовимірних зображень підповерхневих структур ґрунту. У цьому підході інтенсивність сигналу, зафіксованого на отриманих зображеннях, відображає рівень відбиття радіохвиль, що дає змогу виявляти візуальні аномалії [3]. Виявлення таких аномалій є особливо важливим, оскільки вони можуть свідчити про потенційну наявність мін або інших небезпечних об'єктів у межах досліджуваного середовища.

Процес ідентифікації можливих мінних об'єктів ґрунтується на аналізі даних радіолокаційних зображень, сформованих у ході дослідження. Основними критеріями для визначення таких об'єктів є фіксування локалізованих аномалій у відбитому сигналі, характерні особливості форми

сигналів, а також стабільність результатів на основі багатократних вимірювань. Варто зазначити, що запропонована методика орієнтована переважно на візуальний аналіз отриманих даних. Вона не потребує застосування складних автоматизованих алгоритмів класифікації, що спрощує її впровадження та використання.

Результатом роботи системи є набір двовимірних радіолокаційних зображень (SAR), які детально відтворюють підповерхневу структуру досліджуваного середовища [4]. Для кожної виявленої аномалії проводиться визначення просторових координат її розташування, приблизної глибини залягання та інтенсивності відбитого сигналу. Такі детальні параметри надають можливість для подальшого аналізу і створюють умови для кращого розуміння ситуації, а також для застосування превентивних дій щодо виявлених загроз.

Запропонований підхід має низку вагомих переваг. Насамперед, він дозволяє проводити дистанційне дослідження територій, мінімізуючи ризики для оператора. Завдяки використанню технології синтезованої апертури радарів (SAR), система здатна виявляти неметалеві об'єкти та забезпечувати високий рівень деталізації отриманих даних. Більше того, її функціональність залишається стабільною навіть у важкодоступних або небезпечних для перебування зонах.

Водночас цей метод має і певні недоліки. Його ефективність значною мірою залежить від фізико-хімічних характеристик ґрунту, таких як вологість і діелектрична проникність. Зокрема, високий рівень вологи спричиняє інтенсивне поглинання радіохвиль, що суттєво знижує якість сигналу. Іншою важливою умовою є забезпечення високої точності позиціонування безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Крім того, для обробки значного обсягу зібраної інформації потрібні потужні обчислювальні ресурси, що може ускладнювати реалізацію методу.

Таким чином, інтеграція георадара із застосуванням технології синтезованої апертури радарів є дійсно дієвим рішенням для задач дистанційного виявлення наземних мін. Результати проведених досліджень

підтверджують доцільність його використання, особливо в умовах, коли рівень поглинання радіохвиль є низьким. Подальший розвиток цього напрямку повинен зосереджуватися на впровадженні алгоритмів автоматизованого аналізу даних та поєднанні з іншими передовими сенсорними технологіями.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Daniels D.J. Ground Penetrating Radar. — 2nd ed. — London: IET, 2004. ISBN: 0863413609
2. Cumming I.G., Wong F.H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data. — Boston: Artech House, 2005.
3. Richards M.A. Fundamentals of Radar Signal Processing. — McGraw-Hill, 2014. ISBN 0070607370, 9780070607378
4. Skolnik M.I. Radar Handbook. — 3rd ed. — McGraw-Hill, 2008.

METHODOLOGY FOR THE REMOTE DETECTION OF LANDMINES USING RADAR TECHNOLOGIES

Iryna Dmytriieva, Dmitry Bimalov

Abstract. *This study examines the methodological foundations for the application of radar technologies in the remote detection of landmines through the integration of ground-penetrating radar and synthetic aperture techniques. An innovative approach is proposed for creating a system based on an unmanned aerial vehicle, which enables contactless surveying of areas. The structure of the input data, the main stages of signal processing, and the specifics of radar image formation are analysed in detail. The effectiveness of the proposed method for identifying non-metallic objects has been demonstrated, whilst the key limitations arising from the influence of the soil's physico-chemical characteristics and environmental conditions have been outlined.*

Keywords: *ground-penetrating radar, synthetic aperture, unmanned aerial vehicle, remote sensing, radar images.*

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ МОНІТОРИНГУ ДИНАМІКИ ЗМІН ТА ЗАБРУДНЕННЯ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ

Кавац Ю.В.¹ [ORCID], Кавац О.О.² [ORCID],

Фененко Т.М.³ [ORCID], Рой Д.М.⁴ [ORCID]

¹ Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

² Український державний університет науки і технологій, ²к.т.н., доцент, Україна

³ Український державний університет науки і технологій,

старший викладач, Україна

⁴ Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

Анотація. У дослідженні запропоновано методологічний підхід до комплексного супутникового моніторингу водних ресурсів на основі інтеграції двох математичних моделей. Особливу увагу приділено застосуванню моделей у межах складних посткатастрофічних ландшафтів, зокрема території колишнього Каховського водосховища. Гетерогенність таких зон, що поєднують оголені мулові поверхні, заболочені масиви та молоду рослинність, зумовлює високу спектральну неоднорідність і ускладнює автоматизоване виділення води. Перша модель базується на синергії оптичних і радарних даних для точного картування меж водойм в умовах різкої варіації характеристик підстилаючої поверхні. Для підвищення точності поєднано адаптивні спектральні індекси з методами машинного навчання. Друга модель орієнтована на оцінку ступеня забруднення поверхневих вод. Використання різночасових супутникових даних дозволяє аналізувати просторово-часову динаміку об'єктів та встановлювати взаємозв'язки між трансформацією ландшафтів і рівнем їх екологічного навантаження, забезпечуючи стійкість моніторингу до впливу зовнішніх чинників.

Ключові слова. Водні ресурси, супутниковий моніторинг, спектральні індекси, оцінка стану забруднення.

Вступ. Україна посідає одне з провідних місць серед європейських країн за рівнем дефіциту водних ресурсів [1]. Основним джерелом поповнення водних запасів є атмосферні опади, однак сучасні кліматичні зміни призводять до зменшення їх кількості та нерівномірного розподілу протягом року. Зокрема, упродовж останнього десятиліття спостерігається тенденція до

зниження обсягів літніх опадів, що спричиняє підвищення концентрації забруднювальних речовин у поверхневих водах [1-2].

Суттєвий вплив на стан водних ресурсів також здійснює антропогенна діяльність. Основними джерелами забруднення залишаються підприємства промисловості, об'єкти житлово-комунального господарства та аграрний сектор. Значна частина агрохімікатів потрапляє у водойми через поверхневий і підземний стік, що ускладнює оцінку реального рівня екологічного навантаження.

Поверхневі води є динамічними природними системами, просторово-часові зміни яких безпосередньо впливають на стан довкілля. Це обумовлює необхідність розробки методів моніторингу, здатних одночасно враховувати як якісні характеристики води, так і зміни геометрії водних об'єктів.

Сучасні технології дистанційного зондування Землі відкривають нові можливості для вирішення зазначених задач. Супутникові дані дозволяють здійснювати регулярний моніторинг великих територій із високою просторовою та часовою деталізацією. Це визначає доцільність створення інтегрованих математичних моделей, які поєднують аналіз динаміки водних об'єктів та оцінку їх екологічного стану.

Основна частина. Сучасні задачі моніторингу водних об'єктів вимагають комплексного підходу, який враховує як просторову динаміку водойм, так і зміни їх екологічного стану [3-4]. Традиційні методи картування водних поверхонь переважно базуються на використанні спектральних індексів, таких як NDWI, MNDWI, AWEI та їх різноманітні модифікації. Вони дозволяють ефективно виділяти водні об'єкти на оптичних супутникових знімках за рахунок специфічних спектральних властивостей води.

Разом з тим, застосування лише спектральних індексів має ряд обмежень. Зокрема, їх точність суттєво знижується в умовах наявності хмарності, тіней, сезонних змін рослинності, а також при високому рівні каламутності води або наявності домішок. Крім того, складні гідрологічні умови та антропогенний вплив можуть призводити до спектральної невизначеності, що ускладнює процес класифікації.

У зв'язку з цим доцільним є використання комбінованих підходів, які поєднують спектральні індекси з іншими методами обробки даних. У роботі запропоновано підхід, що базується на інтеграції декількох джерел інформації та методів аналізу.

Перша складова моделі передбачає використання оптичних супутникових даних Sentinel-2 для розрахунку набору спектральних індексів. На їх основі формується початкове наближення маски водних об'єктів. Для підвищення точності картування застосовується комбінування декількох індексів та використання адаптивних порогових значень, що враховують сезонні та регіональні особливості вбо пост катастрофічні зміни [5].

Другою важливою складовою є використання радарних супутникових даних Sentinel-1, які не залежать від погодних умов та освітленості. Це дозволяє забезпечити безперервність моніторингу та підвищити достовірність визначення меж водних об'єктів, особливо в умовах хмарності або у періоди несприятливих метеорологічних умов. Радарні знімки є особливо ефективними для виявлення затоплених територій та змін рівня води.

Інтеграція оптичних та радарних даних здійснюється в рамках єдиної моделі, що дозволяє зменшити невизначеність класифікації та підвищити стійкість результатів до зовнішніх факторів.

Наступним етапом є застосування методів машинного навчання для уточнення результатів картування. Використання алгоритмів класифікації (таких як Random Forest, Support Vector Machines, нейронні мережі) дозволяє враховувати нелінійні залежності між спектральними ознаками та типами поверхні [7-8]. Вхідними даними для таких моделей можуть виступати як спектральні канали, так і розраховані індекси, текстурні характеристики та радарні параметри.

Застосування методів машинного навчання дозволяє:

- підвищити точність класифікації водних об'єктів;
- зменшити вплив шумів та спотворень;
- автоматизувати процес обробки великих обсягів супутникових даних;
- адаптувати модель до різних природно-кліматичних умов.

Таким чином, перша математична модель набуває вигляду гібридної системи, що поєднує спектральні індекси, мультисенсорні дані та методи машинного навчання для визначення меж водних об'єктів і аналізу їх динаміки.

Друга математична модель спрямована на оцінку ступеня забруднення водних об'єктів. В її основі лежить використання спектральних індексів, чутливих до змін якості води. До таких індексів належать індекси, що відображають концентрацію завислих речовин (NDTI), хлорофілу (CI, NDChl), органічних домішок (CDOM) тощо [5].

Для підвищення достовірності оцінювання доцільним є використання комбінації декількох індексів, а також аналіз їх змін у часі. Це дозволяє виявляти аномалії, пов'язані з антропогенним впливом, зокрема внаслідок військових дій, техногенних аварій або інтенсивного сільськогосподарського використання територій.

Особливу увагу приділено використанню різночасових супутникових даних, що дає змогу формувати часові ряди та аналізувати динаміку змін як площ водних об'єктів, так і показників їх забруднення. Такий підхід дозволяє переходити від статичного аналізу до динамічного моніторингу.

Інтеграція двох моделей — картування водних об'єктів та оцінки їх забруднення — дозволяє отримати комплексну інформацію про стан водних ресурсів. Це дає можливість встановлювати взаємозв'язки між змінами площ водойм і рівнем їх екологічного навантаження.

Запропонований підхід є особливо актуальним для територій з обмеженим доступом або підвищеним рівнем небезпеки, де проведення наземних вимірювань є ускладненим або неможливим.

Висновки. В роботі запропоновано підхід до комплексного супутникового моніторингу водних об'єктів, що базується на поєднанні двох математичних моделей. Перша модель забезпечує картування меж водних об'єктів і аналіз динаміки їх змін на основі різночасових супутникових даних. Друга модель передбачає використання спектральних індексів для оцінки рівня забруднення поверхневих вод.

Інтеграція результатів моделей дозволяє здійснювати всебічний аналіз стану водних ресурсів та отримувати більш повну і об'єктивну інформацію про їх екологічний стан. Запропонований підхід може бути використаний для моніторингу територій з обмеженим доступом, а також у кризових умовах.

Подальші дослідження будуть спрямовані на використання часових рядів супутникових даних, розширення набору спектральних індексів, а також застосування методів машинного навчання для підвищення точності і автоматизації процесів аналізу динаміки водних об'єктів та оцінки їх забруднення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Biemans, H.; Haddeland, I.; Kabat, P.; Ludwig, F.; Hutjes, R.W.A.; Heinke, J.; von Bloh, W.; Gerten, D. Impact of reservoirs on river discharge and irrigation water supply during the 20th century. *Water Resour. Res.* 2011, 47. [Google Scholar] [CrossRef]
2. Haines-Young, R.; Potschin, M. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1; Technical Report; Fabis Consulting Ltd.: Nottingham, UK, 2018. [Google Scholar]
3. Grizzetti, B.; Lanza, D.; Lique, C.; Reynaud, A.; Cardoso, A. Assessing water ecosystem services for water resource management. *Environ. Sci. Policy* 2016, 61, 194–203. [Google Scholar] [CrossRef]
4. Shaad, K.; Souter, N.J.; Vollmer, D.; Regan, H.M.; Bezerra, M.O. Integrating Ecosystem Services Into Water Resource Management: An Indicator-Based Approach. *Environ. Manag.* 2022, 69, 752–767. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
5. Кавац О.О., Кавац Ю.В., Сергеева К.Л., Фененко Т.М., Дебрій Д.А. Супутниковий моніторинг та оцінка ступеня забрудненості водойм під впливом військових дій. *Системні технології*. 2025, 4(159), 114–124. [Google Scholar]
6. Кавац О.О., Кавац Ю.В., Сергеева К.Л., Рой Д.М. Оцінка точності автоматизованого картування водних поверхонь на основі спектральних індексів, *Регіональний міжвузівський збірник наукових праць «Системні технології»* 1(162)2026, стр. 36-45. [Google Scholar]
7. Kavats, O.; Khramov, D.; Sergieieva, K. Surface Water Mapping from SAR Images Using Optimal Threshold Selection Method and Reference Water Mask. *Water* 2022, 14(24), 4030. [Google Scholar]
8. Sergieieva, K.; Kavats, O.; Vasyliiev, V.; Kavats, Y.; Kovro, O. Machine learning-based monitoring of war-damaged water bodies in Ukraine using satellite images. *CEUR Workshop Proc.* 2024, 3790, 422–434. [Google Scholar].

MATHEMATICAL MODELS FOR MONITORING THE DYNAMICS OF CHANGES AND POLLUTION OF WATER BODIES BASED ON SATELLITE DATA

Yurii Kavats, Olena Kavats, Tatjana Fenenko, Dmytro Roi

Abstract. *The study proposes a methodological approach to complex satellite monitoring of water resources based on the integration of two mathematical models. Particular attention is paid to the application of models within complex post-catastrophic landscapes, in particular the territory of the former Kakhovka reservoir. The heterogeneity of such zones, which combine bare silt surfaces, wetlands and young vegetation, causes high spectral heterogeneity and complicates automated water extraction. The first model is based on the synergy of optical and radar data for accurate mapping of reservoir boundaries in conditions of sharp variation in the characteristics of the underlying surface. To increase accuracy, adaptive spectral indices are combined with machine learning methods. The second model is focused on assessing the degree of surface water pollution. The use of multi-temporal satellite data allows analyzing the spatio-temporal dynamics of objects and establishing relationships between landscape transformation and the level of their ecological load, ensuring the stability of monitoring to the influence of external factors.*

Keywords: *Water resources, satellite monitoring, spectral indices, pollution assessment.*

REFERENCE

1. Biemans, H.; Haddeland, I.; Kabat, P.; Ludwig, F.; Hutjes, R.W.A.; Heinke, J.; von Bloh, W.; Gerten, D. Impact of reservoirs on river discharge and irrigation water supply during the 20th century. *Water Resour. Res.* 2011, 47. [Google Scholar] [CrossRef]
2. Haines-Young, R.; Potschin, M. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1; Technical Report; Fabis Consulting Ltd.: Nottingham, UK, 2018. [Google Scholar]
3. Grizzetti, B.; Lanzanova, D.; Liqueste, C.; Reynaud, A.; Cardoso, A. Assessing water ecosystem services for water resource management. *Environ. Sci. Policy* 2016, 61, 194–203. [Google Scholar] [CrossRef]
4. Shaad, K.; Souter, N.J.; Vollmer, D.; Regan, H.M.; Bezerra, M.O. Integrating Ecosystem Services Into Water Resource Management: An Indicator-Based Approach. *Environ. Manag.* 2022, 69, 752–767. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
5. Kavats O.O., Kavats Yu.V., Serhieieva K.L., Fenenko T.M., Debrii D.A. Suputnykovyi monitorynh ta otsinka stupenia zabrudnenosti vodoim pid vplyvom viiskovykh dii. *Systemni tekhnolohii*. 2025, 4(159), 114–124. [Google Scholar]
6. Kavats O.O., Kavats Yu.V., Serhieieva K.L., Roi D.M. Otsinka tochnosti avtomatyzovanoho kartuvannia vodnykh poverkhon na osnovi spektralnykh indeksiv, Rehionalnyi mizhvuzivskyi zbirnyk naukovykh prats «Systemni tekhnolohii» 1(162)2026, str. 36–45. [Google Scholar]
7. Kavats, O.; Khramov, D.; Sergieieva, K. Surface Water Mapping from SAR Images Using Optimal Threshold Selection Method and Reference Water Mask. *Water* 2022, 14(24), 4030. [Google Scholar]
8. Sergieieva, K.; Kavats, O.; Vasyliiev, V.; Kavats, Y.; Kovro, O. Machine learning-based monitoring of war-damaged water bodies in Ukraine using satellite images. *CEUR Workshop Proc.* 2024, 3790, 422–434. [Google Scholar].

APPLICATION OF THE GOLDENRAM AI PLATFORM FOR MONITORING MINING ACTIVITIES USING EARTH OBSERVATION DATA

Kavats O.O.¹ [ORCID], Sergieieva K.L.² [ORCID], Matselyukh T.B.³

¹ Ukrainian State University of Science and Technology,

PhD, Associate Professor, Ukraine

² Dnipro University of Technology, PhD, Associate Professor, Ukraine

³ OPT/NET BV, The Netherland, CEO/CTO

Abstract. *This paper analyzes the potential of Earth remote sensing data and artificial intelligence for monitoring mining sites. The study investigates the remote assessment of the value of the deposit using multispectral imagery, time-series data, and digital elevation models. Particular attention is paid to the GoldenRAM platform, which ensures synergy between satellite data, GIS, and machine learning for automated change detection. The core innovation of this study lies in the implementation of the Artificial Intelligence Knowledge Processors (AIKP) approach, which serves as a modular foundation for a fundamental system development architecture. This methodology enables seamless integration of AI-assisted development and advanced geospatial analytics, producing a reliable framework for cross-domain monitoring. Integrating these technologies facilitates continuous remote monitoring, dynamic quarry assessment, and verification of extraction volumes. The proposed approach is highly relevant for monitoring areas with limited physical access and can be adapted for environmental analysis systems in industrial regions of Ukraine.*

Keywords. *Remote sensing, satellite data, artificial intelligence, mining industry, AI platform, GoldenRAM.*

Introduction. Ukraine possesses significant mineral and raw material potential and ranks among the leading European countries in terms of proven mineral reserves. Its territory is home to tens of thousands of deposits, which form a strategically important resource base for the metallurgical, energy, and engineering industries. Ukraine's mining sector is one of the key elements of the national economy and is of considerable importance to the European mineral resources market. However, the intensive exploitation of these resources is associated with significant anthropogenic impacts on the environment and requires systematic monitoring. The rapid development of the mining industry leads to significant transformations of the

natural environment, particularly the degradation of land resources and the alteration of natural landscapes [1].

Effective resource management requires continuous monitoring of industrial areas. Traditional ground-based methods are resource-intensive and often cannot be applied to hard-to-reach areas. In the current context, the situation is complicated by the fact that a significant proportion of deposits is located in regions affected by hostilities. Damaged infrastructure and the risk of landmines limit the ability to conduct field surveys. In such circumstances, remote sensing technologies become particularly relevant, enabling the acquisition of verified information on changes on the Earth's surface [2].

Main section. Modern satellite observation systems provide regularly high-resolution data on Earth's surface. The use of remote sensing data enables the systematic monitoring of industrial sites and the collection of objective information on landscape changes. Optical satellite imagery enables the analysis of surface morphology, the delineation of open-pit and waste-dump boundaries, and the assessment of changes in site area over time.

The use of Synthetic Aperture Radar (SAR) systems significantly expands monitoring capabilities, ensuring data acquisition regardless of weather conditions. SAR data is widely used to analyse structural changes in surface and ground deformation. The combination of optical and radar data enhances the reliability of scientific results. Further technological development involves implementing artificial intelligence (AI) methods to automate the interpretation of geospatial data. Computer vision algorithms enable the automatic identification of mining sites and the analysis of their dynamics [3-4].

An example of the implementation of such technologies is the European GoldenRAM project (Grant Agreement No. 101138153), whose architecture is based on the use of specialised Artificial Intelligence Knowledge Processors (AIKPs) distributed across three application domains [5]:

- exploration applications AIKPs: modules for geological exploration and mineralogical mapping.
- production, safety, and operations AIKPs: a module for monitoring the stability of open-pit scope and tailings dams, and for detecting volumetric changes.

- environmental applications AIKPs: components for environmental monitoring, including vegetation and water quality and acid mine drainage.

The AIKP workflow covers all stages from defining the area of interest to the final visualisation via a web interface. A key focus of the analysis within the Volume Change Monitoring module is the assessment of mining activity using Digital Elevation Models (DEMs). Analysis of differences in DEM time series enables elevation changes to be recorded, which correlate with the volumes of extracted material. The calculation of volumetric changes serves as an objective indicator of the intensity of mining processes.

An important aspect of the analysis corresponding to the Volume Change Monitoring module is the assessment of mineral extraction activity. To achieve this, DEMs are used to analyze morphometric changes in topography and evaluate the volumetric characteristics of mining operations. The GoldenRAM platform implements a suite of specialised AIKP analytical components designed for the intelligent processing of DEMs. Using this toolkit, relief models are visualised, time-series data are generated, and differential models (elevation differences) are calculated [5].

Analysis of differences between DEMs allows detection of changes in surface elevation, which directly correlate with rock extraction processes or the stockpiling of industrial waste. Based on the generated stacks, time series of topographic transformation are generated, enabling the assessment of quarry development rates and the determination of volumetric changes in mining workings. Calculating volumetric changes enables estimating the approximate volumes of extracted rock, which serves as an objective indicator of the intensity of mining operations.

Integration of satellite data, digital elevation models, and artificial intelligence algorithms within the GoldenRAM platform forms a toolkit for remote analysis of mining operations. The application of such technologies enables monitoring through regular observations and the generation of objective indicators of mining activity, especially for areas with limited or hazardous access [5].

Conclusions. This study examines the potential of using remote sensing satellite data and artificial intelligence methods for systematic monitoring of mining activities. It has been demonstrated that the convergence of satellite data,

geoinformation technologies, and machine learning algorithms enables the automation of landscape transformation analysis, the assessment of subsoil exploitation intensity, and the remote monitoring of industrial sites. Experience from implementing the European GoldenRAM project confirms the potential to develop integrated platforms for comprehensive analysis of the mining sector based on remote sensing data. For Ukraine, implementing such intelligent solutions is extremely relevant, given the need to monitor deposits in areas with restricted access due to military operations. The use of remote methods ensures the acquisition of verified information on the condition of industrial areas. It could become a fundamental tool for the rational management of natural resources and for strategic planning to restore the country's mining infrastructure.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Weng, Q. Remote sensing for environmental monitoring and analysis. 1st Edition. CRC Press, Boca Raton, 2020. 452 p.
2. European Space Agency. Earth Observation Applications in Mining and Environmental Monitoring. ESA Special Publication, 2022. 84 p.
3. Copernicus Programme. Sentinel satellite missions for Earth observation. European Space Agency, Special Report, 2023. 112 p.
4. Asner, G.P., Tupayachi, R. Accelerating environmental monitoring of mining regions using satellite data. Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 201. P. 243–251. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.015>.
5. European Commission. GoldenRAM Project: Digital platform for raw materials monitoring. Horizon Europe Research and Innovation Action. Grant Agreement No. 101138153, 2024.

ЗАСТОСУВАННЯ АІ-ПЛАТФОРМИ GOLDENRAM ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ГІРНИЧОДОБУВНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

О. Кавац, К. Сергєєва, Т. Мацелюх

Анотація. У статті аналізується потенціал даних дистанційного зондування Землі та штучного інтелекту для моніторингу гірничодобувних об'єктів. Досліджено дистанційну оцінку інтенсивності видобутку корисних копалин за допомогою мультиспектральних знімків, часових рядів та цифрових моделей рельєфу. Особливу увагу приділено платформі GoldenRAM, що забезпечує синергію між супутниковими даними, ГІС та машинним навчанням для автоматичного виявлення змін. Основна інновація цього дослідження полягає у впровадженні підходу «Процесори знань штучного інтелекту» (АІКР), який слугує модульною

основою для архітектури розробки системи. Ця методологія забезпечує безперервну інтеграцію AI-розробки та передової геопросторової аналітики, створюючи надійну основу для міжгалузевого моніторингу. Інтеграція цих технологій сприяє постійному дистанційному контролю, динамічній оцінці кар'єрів та верифікації обсягів видобутку. Запропонований підхід є актуальним для моніторингу територій із обмеженим фізичним доступом і може бути адаптований для систем екологічного аналізу в промислових регіонах України.

Ключові слова. *Дистанційне зондування Землі, супутникові дані, штучний інтелект, гірничодобувна промисловість, AI-платформа, GoldenRAM.*

ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ МІНІМАЛЬНО ДОСТАТНЬОГО ОБСЯГУ НАВЧАЛЬНОЇ ВИБІРКИ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Кісельов Б.Г.¹ [ORCID], Сенько А.О.² [ORCID],

Купін А.І.³ [ORCID], Балик Д.К.⁴ [ORCID]

¹Криворізький національний університет, Кривий Ріг, аспірант, Україна

²Криворізький національний університет, Кривий Ріг, к.т.н., Україна

³Криворізький національний університет, Кривий Ріг, д.т.н., професор, Україна

⁴ТОВ «НВП Гамаюн», Кривий Ріг, інженер-програміст, Україна

Анотація. Тези доповіді присвячено задачі емпіричного визначення мінімально достатнього обсягу навчальної вибірки для регресійних моделей машинного навчання у системах сенсорного сортування руд. Запропоновано методику на основі ієрархії підходів: крива навчання – параметрична степенева екстраполяція – GP-based learning-type curve. Дослідження виконано на реальному наборі сенсорних даних (699 спостережень). Як основну модель обрано HistGradientBoostingRegressor ($R^2 = 0,93$, 10-fold GroupKFold крос-валідація). Параметрична екстраполяція дозволила отримати точкові оцінки мінімального обсягу вибірки для заданого порогу похибки. GP-based підхід забезпечив ймовірнісні оцінки з урахуванням невизначеності. Сформульовано практичні рекомендації щодо достатнього обсягу вибірки для досягнення цільового рівня точності.

Ключові слова: машинне навчання; крива навчання; мінімальний обсяг вибірки; степенева апроксимація; гауссівський процес; сортування руд; крос-валідація; HistGradientBoosting; Neural Scaling Laws; екстраполяція.

Вступ

У задачах машинного навчання не існує універсальної відповіді на питання про те, яким має бути достатній обсяг навчальної вибірки для досягнення належної якості моделі. Для задачі сенсорного сортування руд ця проблема є особливо актуальною: формування репрезентативної вибірки потребує значних витрат на отримання зразків і виконання вимірювань для різних типів матеріалу. При цьому недостатній обсяг навчальної вибірки може призводити до нестійкого навчання і погіршення узагальнювальної здатності моделі [1].

Виникає потреба в методиці, яка б дозволяла на основі відносно невеликої вибірки емпірично оцінити, як змінюється похибка моделі зі зростанням кількості навчальних прикладів, та спрогнозувати обсяг, необхідний для досягнення цільового рівня точності. Мета роботи – розробка та практична перевірка такої методики для регресійних моделей машинного навчання.

Основний матеріал

Набір даних та модель. Дослідження базується на реальних даних системи сенсорного сортування руд, що містить 699 спостережень без пропущених значень. Цільова змінна – `KT10valueMax` (максимальне значення вихідного сигналу котушки), яка корелює з вмістом металу у зразку. Ознаковий простір охоплює 8 первинних вимірювань (об'єм, площа, висота зразка, температура сенсора та ін.) і 3 синтезованих похідних ознаки. Найбільш інформативною є ознака `SensorValueRAW` ($r = 0,985$). Як основну модель обрано `HistGradientBoostingRegressor` [2]. Підбір гіперпараметрів виконано за допомогою бібліотеки `Optuna` (байєсівська оптимізація, 100 спроб). Для оцінювання застосовано 10-fold `GroupKFold` крос-валідацію (групи – мітки типу руди), що виключає витік інформації між фолдами. Середнє $R^2 = 0,93$ підтверджує високу якість моделі.

Аналіз кривої навчання. Криву навчання побудовано для 12 розмірів навчальної підвибірки від 20 % до 100 % загального обсягу. Для кожного розміру виконано 10-fold `GroupKFold` крос-валідацію з трьома повтореннями та випадковим перемішуванням. Крива демонструє монотонне зниження RMSE зі збільшенням N із тенденцією до стабілізації у правій частині – ознаку входження в зону насичення [3].

Параметрична степенева екстраполяція. Для апроксимації кривої навчання обрано степеневу функцію [1]:

$$E(N) = a + b \cdot \left(\frac{N}{N_{ref}} \right)^{-\gamma} \quad (1)$$

де $E(N)$ – значення RMSE при обсязі вибірки N ; a – асимптотична RMSE; b – масштаб початкового відхилення від асимптоти; γ – швидкість спадання похибки; N_{ref} – медіана обсягів навчальних підвибірок. Параметри підібрано методом нелінійної регресії (`scipy.optimize.curve_fit`) з ваговим урахуванням

стандартного відхилення RMSE по фолдах. Прогнозована асимптотична RMSE $\sigma = 10,795$ задає нижню межу досяжної якості за наявного рівня шуму та неповноти ознак. На основі підігнаної функції отримано точкові оцінки: для досягнення $RMSE \leq 12$ необхідно 559 спостережень; для малопомітного приросту якості (виграш від подвоєння $< 0,2$ RMSE) – 1004 спостереження. Монте-Карло симуляція (3000 зразків) дала ймовірнісні оцінки P_{50} : 778 та 1197 спостережень відповідно.

GP-based learning-type curve. Як більш просунутий статистичний підхід застосовано GP-based learning-type curve [4]: залишки NLS-підгонки апроксимовано гауссівським процесом із композитним ядром RBF + WhiteKernel (вхід: $x = \log(N)$). Малі значення рівня шуму WhiteKernel підтвердило, що детермінований скелет формули (1) вловлює основну тенденцію, а GP-компонента фіксує систематичні залишки. Порівняльні результати оцінювання мінімально достатнього обсягу вибірки наведено у Таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння оцінок мінімально достатнього обсягу навчальної вибірки

Критерій	NLS (точкова)	NLS + GP (P_{95})
$RMSE \leq 12$	559 спостережень	810 спостережень
Виграш від подвоєння $< 0,2$ RMSE	1004 спостереження	1004 спостереження
P_{50} (Монте-Карло)	778 спостережень	~ 810 спостережень

GP-based підхід дає більш консервативну, але статистично обґрунтовану оцінку: для досягнення $RMSE \leq 12$ з надійністю 95 % необхідно 810 спостережень. Оцінки порогу малопомітного приросту якості між двома методами збігаються (≈ 1000 спостережень). Таким чином, для досягнення цільового рівня похибки з достатньою статистичною надійністю рекомендується розширити датасет до 780–810 зразків.

Висновки

Проведена робота підтвердила, що задача визначення мінімально достатнього обсягу навчальної вибірки для моделей машинного навчання є розв'язуваною емпіричними методами на основі аналізу кривих навчання та їх екстраполяції. Модель HistGradientBoostingRegressor забезпечила $R^2 = 0,93$ на реальних сенсорних даних. Степенева екстраполяція дозволила отримати

кількісні точкові оцінки мінімально достатнього обсягу вибірки; GP-based підхід доповнив їх ймовірнісними оцінками з урахуванням невизначеності параметрів. Для досягнення $RMSE \leq 12$ рекомендується 780–810 спостережень. Запропонована методика може бути застосована до інших задач промислового машинного навчання з обмеженими даними в рамках інтелектуальних інформаційно-управляючих систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кісельов Б. Г., Сенько А. О. Вплив адитивних стохастичних збурень на нижню межу узагальнювальної похибки моделей регресії в сенсорних системах. Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі : матеріали XIX Всеукраїнської науково-практичної WEB-конференції. Кривий Ріг, 2026. С. 156–159.
2. Ke G. et al. LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree. Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. Vol. 30. P. 3146–3154.
3. Viering T., Loog M. The Shape of Learning Curves: A Review. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2023. Vol. 45, no. 12. P. 15050–15067. DOI: 10.1109/TPAMI.2021.3085003.
4. Snell K. I. E. et al. Sample size requirements for training clinical prediction models using participant-level meta-analysis. Statistics in Medicine. 2024. Vol. 43, no. 15. P. 2945–2975. DOI: 10.1002/sim.10121.
5. Figueroa R. L. et al. Predicting sample size required for classification performance. BMC Medical Informatics and Decision Making. 2012. Vol. 12. Article 8. DOI: 10.1186/1472-6947-12-8.
6. Kaplan J. et al. Scaling Laws for Neural Language Models. arXiv. 2020. arXiv:2001.08361. DOI: 10.48550/arXiv.2001.08361.
7. Domingos P. A few useful things to know about machine learning. Communications of the ACM. 2012. Vol. 55, no. 10. P. 78–87. DOI: 10.1145/2347736.2347755.

QUESTIONS OF DETERMINING THE MINIMUM SUFFICIENT TRAINING

SAMPLE SIZE FOR MACHINE LEARNING MODELS

B. Kiselov, A. Senko, A. Kupin, D. Balyk

Abstract. *This paper addresses the problem of empirically determining the minimum sufficient training sample size for machine learning regression models in ore sensor sorting systems. A methodology based on a hierarchy of approaches is proposed: learning curve – parametric power-law extrapolation – GP-based learning-type curve. The study is conducted on a real sensor dataset (699 observations). HistGradientBoostingRegressor was selected as the primary model ($R^2=0.93$, 10-fold GroupKFold cross-validation). Power-law extrapolation provided point estimates of the minimum sample size for a given RMSE threshold. The GP-based approach yielded probabilistic estimates*

accounting for parameter uncertainty. For $RMSE \leq 12$ with 95 % confidence, 810 observations are required. Practical recommendations for datasets of similar type are formulated.

Keywords: *machine learning; learning curve; minimum sample size; power-law approximation; Gaussian process; ore sorting; cross-validation; HistGradientBoosting; Neural Scaling Laws; extrapolation.*

REFERENCE

1. Kiselov, B. H., & Senko, A. O. (2026). Vplyv adytyvnykh stokhastychnykh zburen' na nyzhniu mezhu uzahalniuval'noi pokhybky modelei rehresii v sensorykh systemakh. Komp'iuterni intelektualni systemy ta merezhi: materialy XIX Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi WEB-konferentsii. Kryvyi Rih. P. 96–101. [in Ukrainian].
2. Ke, G. et al. (2017). LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30, 3146–3154.
3. Viering, T., & Loog, M. (2023). The shape of learning curves: A review. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 45(12), 15050–15067. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2021.3085003>
4. Snell, K. I. E. et al. (2024). Sample size requirements for training clinical prediction models using participant-level meta-analysis. *Statistics in Medicine*, 43(15), 2945–2975. <https://doi.org/10.1002/sim.10121>
5. Figueroa, R. L., Zeng-Treitler, Q., Kandula, S., & Ngo, L. H. (2012). Predicting sample size required for classification performance. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 12, Article 8. <https://doi.org/10.1186/1472-6947-12-8>
6. Kaplan, J. et al. (2020). Scaling laws for neural language models. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.08361>
7. Domingos, P. (2012). A few useful things to know about machine learning. *Communications of the ACM*, 55(10), 78–87. <https://doi.org/10.1145/2347736.2347755>

ARCHITECTURAL PATTERNS OF IOT SYSTEMS IN SMART AGRICULTURE

Klymchuk V. V.¹ [ORCID], Ptashnyk V. V.² [ORCID]

¹*S. Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnology of Lviv,
Postgraduate, Ukraine*

²*S. Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnology of Lviv, PhD,
Associate Professor, Ukraine*

Abstract. *The rapid growth of Internet of Things (IoT) technologies in agriculture has increased the need to understand how these systems are designed. This paper analyzes IoT system architectures used in smart agriculture, with a focus on layered models. A set of 18 research articles describing real IoT systems was reviewed. Based on this analysis, three main architecture types were identified: three-layer, four-layer, and five-layer models. The results show that the four-layer architecture is the most commonly used, as it provides better scalability and supports distributed systems through the use of a gateway or edge layer. In addition to layered models, several design patterns that correspond to specific system needs were identified. These patterns extend system functionality but do not replace the base architecture. The results show that the choice of architecture depends on system scale and requirements, and this choice has a direct impact on system performance and scalability.*

Keywords: *Internet of Things, precision agriculture, IoT architecture, layered architecture, design patterns, smart farming.*

Introduction. The popularity of Internet of Things (IoT) technologies has grown exponentially in recent years. IoT is adopted to automate recurring operations, improve monitoring, optimize resource use, and support data-driven decision-making. As a result, IoT has been integrated into numerous diverse sectors. Tasks that were performed manually before are now automated through IoT systems. One of the biggest fields that has recently adopted IoT is agriculture. The integration of these technologies has become one of the key drivers of precision agriculture digitalization. The exact implementations of IoT in agriculture vary from simple irrigation systems to complex monitoring and management frameworks. At the very core of IoT systems lies their architectural design, which determines how sensing devices, communication networks, processing layers and user interfaces are organized. The choice of architecture for a particular system depends on multiple

factors and impacts core system parameters, such as scalability, reliability, latency and energy efficiency.

Results and Discussion. Conceptual models of IoT systems are often described using a layered approach. The most popular architecture types are three-layer, four-layer and five-layer architectures. Each new layer represents another explicit level of responsibilities extracted from previous layers. It is a structured way to organize system components into sensing, networking, computing and application layers.

While theoretical layer-based architecture type division is important for the separation of concerns and enhanced scaling capabilities, the exact layer implementation may differ among similar systems. For instance, a gateway network layer configuration is vastly different from its fog computing analogue. It is very important to understand the difference between a layered architecture framework and its implementation, as well as how specific paradigms, such as edge computing, microservices, or other design approaches, are integrated into layered models.

To better understand the practical side of architectures and their connection to their actual implementations, a set of 18 articles, each describing a different IoT system in the smart agriculture field, was reviewed. These articles represent IoT systems ranging from simple irrigation systems to complex microservice-based monitoring frameworks. Although the reviewed set is not exhaustive, its diversity makes it possible to identify the dominant architectural tendencies and recurring design patterns in smart agriculture IoT systems.

The main components that make up an average smart agriculture IoT system are the perception, network and application layers. The perception layer is responsible for physical sensors, such as soil moisture probes, thermocouples, nutrient analyzers and other specialized sensor units. The network layer coordinates the flow of the acquired sensory data. The application layer provides user-facing services and system interaction, while data storage and analytics may be implemented either within this layer or in dedicated processing components, depending on the system architecture. Since these three main components are the bare minimum for a functional automated IoT system, they naturally make up a three-layer architecture, which is mainly used in prototype systems where a single

unit communicates directly to the cloud or an application. In the analyzed literature, the three-layer architecture is mainly used in small-scale implementations and prototypes [1-2], accounting for around 28% of cases.

The four-layer architecture extends this model by introducing a dedicated buffer layer between the sensing nodes and the cloud service. This solves the problem of unreliable and inefficient direct connectivity. The resulting structure is made up of perception, network, edge controller and application layers. Though the perception and application layers stay the same as in the three-layer architecture, the addition of the edge controller layer, coupled with the overhauled networking layer, vastly improves the system's scalability and reliability. The edge controller introduces a dedicated layer for sampling, scheduling, data buffering and preprocessing, while the network layer is now responsible for the flow of sensory data to the edge controllers and aggregation of acquired results. This structure is widely used in actual IoT field monitoring/irrigation systems [3-4], where networks cover field sizes of tens or hundreds of hectares and are utilized in around 67% of cases.

With the rapid development and popularization of microservice architecture in the software engineering domain [5], other fields, including precision agriculture, have begun to adopt its principles of separation of concerns and enhanced scalability. Systems that implement a five-layer architecture with perception, network, processing, application and business layers are generally decomposed into microservices instead of being combined into one monolithic application. This approach enables high scalability and allows the replacement of any component without redesigning the entire system. Microservice-based five-layer architecture is usually represented by systems implementing digital twins as a virtual representation of physical conditions with predictive modeling support [6]. Because of the sheer amount of work required for development and the scale required to justify this amount of work, systems like this are underrepresented, with only 6% of use cases. A short summary of base architecture types is presented in tab. 1.

Table 1

Architecture types and associated patterns observed in the reviewed sample

Architecture	Articles count	System scale	Core layers	Common design patterns
Three-layer	5	Small-scale, prototypes	Perception, network, application	Event-driven
Four-layer	12	Field-scale	Perception, network, edge, application	Edge computing, fog computing
Five-layer	1	Enterprise	Perception, network, processing, application, business	Microservices, digital twins

Conclusion. Based on a structured review of a set of 18 published IoT implementations, the diverse architectural frameworks used in smart agriculture were identified. Three-layer, four-layer and five-layer architectures serve as the dominant organizational framework, with each tier representing a more complex and better-scaled layer. The three-layer architecture, implemented in 28% of the cases, is typically used for small prototype or proof of concept systems, where sensing nodes have direct communication with a cloud or application. The four-layer architecture, which is the most common and accounts for approximately 67% of the reviewed cases, improves system scalability by introducing a dedicated edge controller layer. The five-layer architecture, while being used only in 5% of cases, provides the highest degree of modularity/scalability for large-scale systems, allowing it to be used in enterprise level systems.

Beyond base layered architecture types, a set of additional design patterns was found. Edge computing, fog computing, digital twins and event-driven approaches are independent patterns that can be combined with base architecture approaches to address specific needs of a particular system. Matching the system's architecture with its functional needs is crucial for proper system architecture selection. This early decision is critical for a system's efficiency, maintainability and future scalability.

REFERENCE

1. Aarthi R., Sivakumar D., Mariappan V. Smart Soil Property Analysis Using IoT: A Case Study Implementation in Backyard Gardening. *Procedia Computer Science*. – 2022. P. 2842 – 2851. doi: 10.1016/j.procs.2023.01.255.

2. Da Costa I. F., Kovi M. R., Leite A. C. Development of an IoT Sensor-based System for Soil Monitoring: Conceptual Design and Experiments. IFAC-PapersOnLine. – 2025. P. 291 – 296. doi: 10.1016/j.ifacol.2025.11.802.
3. Lopes I., Barbosa R. LoRa-based IoT platform for remote soil parameter monitoring. DYNA (Colombia). – 2024. №91(231). P. 86 – 93. doi: 10.15446/dyna.v91n231.111612.
4. Qin M., Zhang C., Ma G. Digital twin-enabled intelligent irrigation-drainage system for precision water-salt management in saline agroecosystems. Agric Water Manag. – 2025. №322. doi: 10.1016/j.agwat.2025.109957.
5. Dragoni N., Giallorenzo S., Lluch-Lafuente A. Microservices: Yesterday, Today, and Tomorrow. Present and Ulterior Software Engineering. Springer, Cham. – 2017. P. 195 – 216. doi: 10.1007/978-3-319-67425-4_12.
6. Adamo T., Caivano D., Colizzi L., Dimauro G., Guerriero E. Optimization of irrigation and fertigation in smart agriculture: An IoT-based micro-services framework. Smart Agricultural Technology. – 2025. №11. doi: 10.1016/j.atech.2025.100885.

АРХІТЕКТУРНІ ПАТЕРНИ ПОБУДОВИ ІОТ-СИСТЕМ У РОЗУМНОМУ СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

Владислав Климчук, Вадим Пташник

Анотація. Швидке зростання використання технологій Інтернету речей (IoT) в сільському господарстві зумовило потребу в кращому розумінні того, як проєктуються такі системи. У цій роботі проаналізовано архітектури IoT-систем, що застосовуються в розумному землеробстві, з акцентом на багаторівневі моделі. Було розглянуто 18 наукових публікацій, які описують реальні IoT-рішення. За результатами аналізу виділено три основні види архітектур: трирівневу, чотирирівневу та п'ятирівневу. З'ясовано, що найпоширенішою є чотирирівнева архітектура, оскільки вона забезпечує кращу масштабованість і підтримує розподілені системи за допомогою крайового рівня. Окрім базових багаторівневих моделей, визначено також додаткові шаблони проєктування, що відповідають окремим потребам систем. Ці підходи розширюють функціональність, але не замінюють базову архітектуру. Отримані результати показують, що вибір архітектури залежить від масштабу системи та її вимог і безпосередньо впливає на продуктивність і масштабованість.

Ключові слова: Інтернет речей, точне землеробство, архітектура Інтернету речей, багатопарова архітектура, розумне сільське господарство.

ЛІТЕРАТУРА

1. Аарті Р., Сівакумар Д., Маріаппан В. Інтелектуальний аналіз властивостей ґрунту з використанням Інтернету речей: реалізація на прикладі садівництва на присадибній ділянці. Procedia Computer Science. – 2022. С. 2842-2851. doi: 10.1016/j.procs.2023.01.255. [Англійською мовою].

2. Да Коста І. Ф., Кові М. Р., Лейте А. С. Розробка системи моніторингу ґрунту на основі датчиків Інтернету речей (IoT): концептуальне проектування та експерименти. IFAC-PapersOnLine. – 2025. С. 291-296. doi: 10.1016/j.ifacol.2025.11.802. [Англійською мовою].
3. Лопез І., Барбоса Р., Дос Сантос Д. Платформа Інтернету речей на базі LoRa для дистанційного моніторингу параметрів ґрунту. DYNA (Colombia). – 2024. №91(231). С. 86-93. doi: 10.15446/dyna.v91n231.111612. [Англійською мовою].
4. Цін М., Жанг С., Ма Г. Цифрова інтелектуальна система зрошення та дренажу на основі цифрових двійників для точного управління водним та сольовим балансом у засолених агроєкосистемах. Agric Water Manag. – 2025. №322. doi: 10.1016/j.agwat.2025.109957. [Англійською мовою].
5. Драгоні Н, Гіалорензо С, Льюч-Лафуенте А. Мікросервіси: Вчора, Сьогодні та Завтра. Present and Ulterior Software Engineering. – 2017. С. 195–216. doi: 10.1007/978-3-319-67425-4_12. [Англійською мовою].
6. Адамо Т., Кайвано Д., Коліцці Л., Діамуро Г. Оптимізація зрошення та фертигації в розумному сільському господарстві: інфраструктура мікросервісів на основі Інтернету речей. Smart Agricultural Technology. – 2025. №11. doi: 10.1016/j.atech.2025.100885. [Англійською мовою].

ВИКОРИСТАННЯ ІСТОРИЧНИХ ДАНИХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВІЯВЛЕННЯ СМІТТЕЗВАЛИЩ НА АЕРОКОСМІЧНИХ ЗНІМКАХ

Литвинов Є.В.¹ [ORCID], Гнатушенко В.В.² [ORCID], Гнатушенко Вік.В.³ [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, України

²Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

д.т.н., професор, України

³Український державний університет науки і технологій,

д.т.н., професор, України

Анотація. У роботі розглянуто можливості використання історичних супутникових даних для підвищення точності виявлення несанкціонованих сміттєзвалищ на аерокосмічних знімках. Показано, що для таких об'єктів часовий контекст має важливе діагностичне значення, оскільки сміттєзвалища формуються поступово та проявляються не лише у спектральних характеристиках поточної сцени, а й у динаміці змін земної поверхні. Проаналізовано підходи *satellite image time series*, *change detection*, моделі часових рядів, а також *history prior map*. Обґрунтовано, що найбільш перспективним є гібридний підхід, у якому первинне виявлення виконується YOLO-подібним детектором, а подальше уточнення здійснюється за допомогою історичних даних, карт змін і агентно-ознакової моделі. Така схема дозволяє підвищити стійкість виявлення, зменшити кількість хибнопозитивних спрацьовувань і забезпечити кращу інтерпретованість результатів екологічного моніторингу.

Ключові слова: несанкціоновані сміттєзвалища; аерокосмічні знімки; Sentinel-2; історичні дані; мультитемпоральний аналіз; *change detection*; YOLO; екологічний моніторинг; агентно-ознакова модель.

Проблема виявлення несанкціонованих сміттєзвалищ є важливою складовою екологічного моніторингу, оскільки такі об'єкти створюють ризики для ґрунтів, водних ресурсів, санітарного стану територій та місцевих екосистем. Сучасні оглядові дослідження у сфері дистанційного зондування свідчать, що супутникові дані дедалі активніше застосовуються для виявлення, моніторингу та картографування місць накопичення відходів, у тому числі нелегальних сміттєзвалищ [1]. Разом із тим одноразовий аналіз окремого знімка не завжди дає змогу надійно відокремити сміттєзвалище від кар'єрів,

будівельних майданчиків, деградованих ділянок ґрунту, тимчасових складів матеріалів або інших антропогенних об'єктів [1, 5].

Для задачі виявлення сміттєзвалищ особливу цінність мають історичні дані, оскільки об'єкт цього типу часто формується поступово і проявляється не лише у спектральних характеристиках поточного знімка, а й у часовій динаміці ділянки. На практиці важливими є такі ознаки, як поява нової неоднорідності, зростання площі порушеної поверхні, повторюваність аномалій на різних датах, а також близькість до доріг, промислових зон, ярів, пустирів або водотоків. Сучасні дослідження change detection, satellite image time series та knowledge-guided object detection розглядають часовий контекст як один із шляхів підвищення достовірності виявлення об'єктів на супутникових даних [2, 4].

Супутники Sentinel-2 є одним із найбільш практичних джерел даних для екологічного моніторингу завдяки відкритому доступу, регулярному повторному покриттю та наявності багатоспектральних каналів, що дозволяють аналізувати як видимі, так і ближні інфрачервоні характеристики земної поверхні. Для задач моніторингу відходів Sentinel-2 є цінним насамперед тому, що забезпечує систематичне повторне спостереження, а отже, дозволяє будувати часові ряди, виявляти зміни та оцінювати стійкість аномалій у часі [1], [6].

Разом із тим використання Sentinel-2 має й обмеження. Просторова роздільна здатність 10–20 м є достатньою для виявлення середніх і великих ділянок накопичення відходів, але може бути недостатньою для дрібних, фрагментованих або частково закритих об'єктів. Крім того, спектральний образ сміттєзвалища часто є нестабільним: він залежить від складу відходів, ступеня ущільнення, наявності рослинного покриву, вологості, сезонних умов та стадії розвитку об'єкта. Тому при аналізі лише однієї сцени модель може помилково реагувати на інші антропогенні поверхні зі схожими спектрально-текстурними властивостями [1], [5], [6].

У зв'язку з цим для Sentinel-2 доцільно використовувати не тільки поточну сцену, а й історичну послідовність знімків. Такий підхід дозволяє

врахувати, чи є підозріла ділянка стійкою у часі, чи вона з'явилася нещодавно, чи пов'язана її динаміка з сезонністю, або ж спостерігається стале накопичення ознак деградації поверхні [2], [3], [6].

Перший підхід – satellite image time series – полягає в тому, що до аналізу поточного знімка додаються кілька історичних сцен тієї самої території. У цьому разі модель отримує часовий контекст безпосередньо у вигляді стеку багатоспектральних спостережень. Перевага підходу полягає в тому, що він дає змогу виявляти сталі або повторювані аномалії, а також аналізувати, як змінюється підозріла ділянка впродовж часу [3], [4].

Для задачі сміттєзвалищ це корисно, оскільки об'єкт часто не виникає миттєво, а формується поступово. Проте безпосереднє додавання багатьох дат до вхідних даних збільшує розмірність ознакового простору, ускладнює навчання та не завжди забезпечує зрозумілу інтерпретацію рішення. Інакше кажучи, модель може показувати кращий результат, але залишатиметься неясним, чи спирається вона на справжню часову закономірність, чи на випадкові особливості вибірки [3], [4].

Другий підхід – change detection – ґрунтується на попередньому виявленні змін між поточною та історичними сценами. У такій схемі формується карта змін, що показує ділянки з істотною трансформацією стану поверхні, після чого саме ці зони аналізуються як потенційні кандидати на сміттєзвалища. Сучасні огляди change detection підкреслюють, що багаточасове виявлення змін є базовим інструментом моніторингу територій у задачах природокористування, урбаністики та оцінювання техногенних процесів [2].

Для задачі виявлення сміттєзвалищ цей підхід є дуже корисним, оскільки поява нового місця накопичення відходів зазвичай супроводжується зміною текстури, кольору, структури рослинного покриву або просторової конфігурації ділянки. Однак сама карта змін не визначає тип об'єкта. Вона лише вказує на факт перетворення території, а тому має використовуватися не самостійно, а лише як один з елементів масиву ознак [1], [2].

Окрему групу становлять моделі, що безпосередньо навчаються на часових рядах супутникових знімків: CNN-LSTM, ConvLSTM, TCN, attention-based та transformer-підходи. Такі архітектури здатні моделювати складні часові залежності та довгі інтервали спостереження, що є важливим для задач, де поведінка об'єкта в часі має самостійне діагностичне значення [3], [4].

Попри високий потенціал, ці підходи мають і суттєві обмеження. Вони потребують значних обсягів якісно узгоджених даних, є обчислювально складними та часто поступаються гібридним схемам у пояснюваності. Для прикладних систем екологічного моніторингу, де важливо не лише знайти об'єкт, а й пояснити причину спрацювання, такі моделі не завжди є оптимальними як єдине ядро системи [3], [4].

Наступний – history prior map - підхід полягає у використанні історії детекцій для підвищення стійкості підсумкового рішення. Якщо об'єкт фіксується на кількох датах, його ймовірність підвищується; якщо ж спрацювання виникає лише одноразово, воно може інтерпретуватися як шум. Такий підхід особливо корисний для зменшення кількості хибнопозитивних результатів у випадках, коли окрема сцена містить хмари, тіні, локальні сезонні аномалії або нестабільні спектральні сигнали [1], [3].

Перевагою цього методу є його простота та можливість застосування як шару постобробки поверх уже навченого детектора. Проте часове згладжування не дає нової семантичної інформації про природу об'єкта, а лише робить більш стабільним уже отриманий результат [3].

Для задачі несанкціонованих сміттєзвалищ цей підхід є особливо логічним, оскільки незаконне складування відходів рідко виникає випадково. Воно, як правило, тяжіє до специфічного просторового контексту. Сучасні дослідження, що поєднують remote sensing, GIS та карти схильності до незаконного скидання відходів, підтверджують перспективність саме такого підходу [7].

Найбільш перспективним для задачі виявлення несанкціонованих сміттєзвалищ є гібридний підхід, у якому поєднуються кілька джерел інформації. На першому етапі поточний знімок Sentinel-2 аналізується YOLO-

подібним детектором, який формує первинні кандидати. На другому етапі для кожного кандидата оцінюється наявність суттєвих змін відносно історичних знімків тієї самої ділянки. На третьому етапі використовується historical prior map, що враховує накопичену історію аномалій і просторовий ризик виникнення сміттєзвалища. На четвертому етапі застосовується агентно-ознакова модель, у якій окремі агенти аналізують контекстні фактори: близькість до дороги, промислової інфраструктури, пустирів, ярів, водойм, а також ознаки деградації рослинності чи порушення поверхні [1–3], [5], [7].

Перевага такого підходу полягає в тому, що він поєднує сильні сторони різних класів методів. На відміну від “чистої” нейромережевої схеми, він краще пояснює результат. На відміну від ізольованого change detection, він не обмежується лише фактом зміни. На відміну від простого згладжування, він реально додає нову інформацію до рішення. Для задачі сміттєзвалищ це особливо важливо, оскільки об’єкт повинен оцінюватися не лише за візуальною схожістю, а і як елемент ширшої екологічно-просторової ситуації [1], [2], [7].

Для первинного виявлення підозрілих ділянок доцільно використовувати детектор типу YOLO або інший сучасний одноетапний детектор. Огляди з remote sensing object detection показують, що сімейства одноетапних детекторів залишаються практично значущими завдяки доброму компромісу між швидкістю та точністю, особливо коли система орієнтована на скринінг великих територій [5]. Для моніторингу сміттєзвалищ це важливо, оскільки необхідно обробляти значні площі та виділяти обмежений набір кандидатів для подальшого уточнення.

Разом із тим YOLO, навчений лише на поточних знімках, може давати хибні спрацьовування на ділянках із подібною текстурою або антропогенним профілем. Саме тому його доцільно розглядати не як завершене рішення, а як перший етап гібридної системи, де детектор формує гіпотези, а подальші модулі перевіряють їх за історичними, часовими та контекстними ознаками [1], [5].

Важливою частиною такого підходу є його узгодженість із раніше апробованою мультиагентною схемою виявлення нелегальних сміттєзвалищ, у

якій рішення формується не одним монолітним класифікатором, а сукупністю спеціалізованих агентів-детекторів. У цій схемі окремі YOLO-агенти виділяють сміттєві купи, дорожні сегменти та промислові об'єкти, а їх результати інтегруються за допомогою ймовірнісного механізму агрегації з урахуванням просторової узгодженості та контекстних доказів. Така організація дозволяє явно представляти внесок кожної ознаки в підсумкову оцінку, що є принципово важливим для пояснюваного екологічного моніторингу [9]. Як показано у статті Литвинова, Гнатушенко та Удовик, структурований масив ознак фактично задає формалізований опис «екосистеми сміттєзвалища», у якій ядро об'єкта розглядається разом із транспортною доступністю та близькістю до потенційних джерел відходів .

Крім того, результати апробації цього підходу на незалежній тестовій сцені поблизу Таромського підтвердили його практичну цінність: спільна агрегація гетерогенних детекцій підвищила впевненість у головному кластері сміттєзвалища, зменшила кількість хибних спрацьовувань і забезпечила можливість детально відтворити логіку прийняття рішення для експертного аналізу. Саме тому в даному дослідженні доцільно розвинути цю ідею в напрямі використання історичних супутникових даних: якщо в базовій мультиагентній моделі агрегуються просторові та контекстні ознаки, то в розширеній схемі до них можуть бути додані мультитемпоральні сигнали, карти змін і historical prior map. Це дає змогу перейти від статичного виявлення окремих кандидатів до більш стійкого просторово-часового ранжування ділянок ризику [9].

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Fraternali P., Cazzaniga P., Dell'Acqua F. et al. Solid waste detection, monitoring and mapping in remote sensing: a review // Waste Management. 2024.
2. Jiang W., Sun Y., Lei L. et al. Change detection of multisource remote sensing images: a review // International Journal of Digital Earth. 2024. Vol. 17, No. 1. DOI: 10.1080/17538947.2024.2398051.
3. Vincent E., Ponce J., Aubry M. Satellite Image Time Series Semantic Change Detection: Novel Architecture and Analysis of Domain Shift // arXiv. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2407.07616.
4. Wang R., Ma L., He G. et al. Transformers for Remote Sensing: A Systematic Review and Analysis // Sensors. 2024. Vol. 24, No. 11. Art. 3495. DOI: 10.3390/s24113495.

5. Gui S., Song S., Qin R., Tang Y. Remote Sensing Object Detection in the Deep Learning Era—A Review // Remote Sensing. 2024. Vol. 16, No. 2. Art. 327. DOI: 10.3390/rs16020327.
6. Sakti A. D., Sembiring E., Rohayani P. et al. Identification of illegally dumped plastic waste in a highly polluted river in Indonesia using Sentinel-2 satellite imagery // Scientific Reports. 2023. Vol. 13. Art. 5039. DOI: 10.1038/s41598-023-32087-5.
7. Scharf N., Ducry B., Sy B. et al. Integrating Remote Sensing, GIS, and Citizen Science to Map Illegal Waste Dumping Susceptibility in Dakar, Senegal // Sustainability. 2025. Vol. 17, No. 24. Art. 11137. DOI: 10.3390/su172411137.
8. El Hafyani H., Pasdeloup B., Yver C., Romenteau P. Multimodal Object Detection via Probabilistic a priori Information Integration // arXiv. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2405.15596.
9. Lytvynov, Ye., Hnatushenko, V., & Udovyk, I. (2026). Detection of illegal landfills in satellite images using a multi-agent approach. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 361(1), 523–530. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-73>

USE OF HISTORICAL DATA TO IMPROVE THE ACCURACY OF ILLEGAL LANDFILL DETECTION IN REMOTE SENSING IMAGERY

Yehor Lytvynov, Volodymyr Hnatushenko, Viktoriia Hnatushenko

Abstract. *The paper considers the use of historical satellite data to improve the accuracy of illegal landfill detection in aerospace imagery. It is shown that temporal context has independent diagnostic value for such objects, since landfills are usually formed gradually and manifest themselves not only in the spectral characteristics of a current scene, but also in the dynamics of land-surface changes over time. The study analyzes the approaches of satellite image time series, change detection, temporal modeling, and historical prior maps. It is argued that the most promising solution is a hybrid approach in which primary candidate detection is performed by a YOLO-like detector, while further refinement is carried out using historical observations, change maps, and an agent-based feature model. Such an approach makes it possible to improve detection robustness, reduce false positives, and increase the interpretability of environmental monitoring results.*

Keywords: *illegal landfills; aerospace imagery; satellite data; historical data; temporal analysis; change detection; YOLO; environmental monitoring; agent-based feature model.*

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ У МЕРЕЖЕВОМУ ТРАФІКУ

Малієнко С.Є.¹ [ORCID], Селівьорстова Т.В.² [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

²Український державний університет науки і технологій,

к.т.н., доцент, Україна

Анотація. У роботі досліджено ефективність методів машинного навчання для виявлення аномалій у мережевому трафіку. Проаналізовано основні підходи до побудови інтелектуальних систем виявлення вторгнень (IDS), зокрема сигнатурний аналіз та методи на основі машинного навчання. Виконано експериментальне порівняння алгоритмів Random Forest, Support Vector Machine, k-Nearest Neighbors та багатозарового перцептрона на даних NSL-KDD. Оцінку якості класифікації проведено за метриками Accuracy, Precision, Recall та F1-score. Результати показали, що метод Random Forest забезпечує найкращий баланс точності та швидкодії для задач виявлення мережових аномалій у режимі реального часу. Визначено перспективи застосування ансамблевих методів та глибокого навчання для підвищення якості детектування кіберзагроз.

Ключові слова: машинне навчання, виявлення аномалій, мережевий трафік, кібербезпека, система виявлення вторгнень, Random Forest, класифікація, NSL-KDD.

У сучасному цифровому середовищі кількість кібератак невідомо зростає, що створює критичну загрозу для інформаційної безпеки організацій та державних установ. За даними міжнародних звітів, щорічно фіксується понад 2 200 кібератак на день, причому значна частина з них залишається невиявленою протягом тривалого часу [1]. Традиційні сигнатурні методи виявлення вторгнень, що базуються на порівнянні мережевого трафіку з відомими шаблонами атак, виявляються неефективними проти нових типів загроз (zero-day атаки), оскільки не здатні ідентифікувати раніше невідомі патерни зловмисної активності.

Методи машинного навчання (ML) відкривають нові можливості для побудови інтелектуальних систем виявлення вторгнень (Intrusion Detection

System, IDS), здатних автоматично навчатися на прикладах нормального та аномального трафіку і виявляти відхилення навіть без попереднього знання про конкретний тип атаки [2]. Метою даної роботи є дослідження та порівняння ефективності методів машинного навчання — Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), k-Nearest Neighbors (k-NN) та багат шарового перцептрона (MLP) — для задачі бінарної класифікації мережевого трафіку на нормальний та аномальний.

Задача виявлення аномалій у мережевому трафіку може бути формалізована як задача бінарної класифікації. Нехай кожне мережеве з'єднання описується вектором ознак $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, де ознаки характеризують тривалість з'єднання, тип протоколу, кількість переданих байтів, кількість пакетів, прапорці з'єднання тощо. Тоді задача полягає у побудові класифікатора $f: X \rightarrow \{0, 1\}$, де 0 відповідає нормальному трафіку, а 1 — аномальному.

Для оцінки якості класифікації використано стандартні метрики. Ассурасу — частка правильно класифікованих зразків від загальної кількості (1). Precision — частка дійсно аномальних зразків серед усіх, класифікованих як аномальні (2). Recall — частка виявлених аномалій від загальної кількості реальних аномалій (3). F1-score — гармонічне середнє Precision та Recall, що забезпечує збалансовану оцінку (4):

$$Accuracy = (TP + TN) / (TP + TN + FP + FN), \quad (1)$$

$$Precision = TP / (TP + FP), \quad (2)$$

$$Recall = TP / (TP + FN), \quad (3)$$

$$F1 = 2 \cdot Precision \cdot Recall / (Precision + Recall), \quad (4)$$

де TP (True Positive) — кількість правильно виявлених аномалій, TN (True Negative) — правильно класифікований нормальний трафік, FP (False Positive) — хибно класифікований як аномальний нормальний трафік, FN (False Negative) — пропущені аномалії.

Для проведення експериментального дослідження обрано датасет NSL-KDD [3], який є вдосконаленою версією класичного KDD Cup'99 і широко використовується у дослідженнях з мережевої безпеки. Датасет містить записи мережевих з'єднань, кожне з яких описується 41 ознакою та класифіковане як

нормальне або як один з типів атак: DoS (відмова в обслуговуванні), Probe (сканування), R2L (віддалений доступ), U2R (підвищення привілеїв). Навчальна вибірка містить 125 973 записи, тестова — 22 544 записи. Для бінарної класифікації всі типи атак об'єднано в клас «аномалія».

У дослідженні порівняно чотири методи машинного навчання. Random Forest (RF) — ансамблевий метод, що будує множину дерев рішень та агрегує їх результати голосуванням, що забезпечує стійкість до перенавчання та високу точність на табличних даних. Support Vector Machine (SVM) — метод, що шукає оптимальну гіперплощину для розділення класів у просторі ознак із максимальним зазором. k-Nearest Neighbors (k-NN) — метод, що класифікує зразок за мажоритарним голосуванням k найближчих сусідів. Багатошаровий перцептрон (MLP) — нейронна мережа прямого поширення з одним або кількома прихованими шарами [4].

Препроцесинг даних включав нормалізацію числових ознак методом Min-Max scaling до діапазону [0, 1], one-hot кодування категоріальних ознак (protocol_type, service, flag) та розбиття на навчальну та тестову вибірки згідно стандартного поділу NSL-KDD. Результати експериментального порівняння наведено у табл. 1.

Таблиця 1
Результати класифікації мережевого трафіку

Метод	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
Random Forest	0.9731	0.9685	0.9812	0.9748
SVM	0.9524	0.9478	0.9603	0.9540
k-NN	0.9412	0.9356	0.9501	0.9428
MLP	0.9658	0.9621	0.9724	0.9672

Як видно з табл. 1, метод Random Forest продемонстрував найвищі показники за всіма метриками: Accuracy = 0.9731, F1-score = 0.9748. Це пояснюється здатністю ансамблю дерев рішень ефективно обробляти гетерогенні ознаки мережевого трафіку та стійкістю до шуму в даних. Багатошаровий перцептрон показав другий за якістю результат (F1 = 0.9672),

однак потребує значно більшого часу на навчання. SVM забезпечив прийнятну точність, але масштабується гірше при зростанні обсягу даних. Метод k-NN показав найнижчі результати серед досліджених алгоритмів, що обумовлено чутливістю до вибору параметра k та високою розмірністю простору ознак.

Важливим аспектом є також швидкодія алгоритмів. Для систем реального часу критичним є час класифікації одного зразка. Random Forest забезпечує швидку класифікацію завдяки паралельній обробці дерев, тоді як SVM та MLP потребують більше обчислювальних ресурсів. Проблема дисбалансу класів у датасеті NSL-KDD, де нормальний трафік переважає над аномальним, частково компенсована використанням метрики F1-score, яка враховує як Precision, так і Recall.

Висновки

У роботі досліджено застосування методів машинного навчання для виявлення аномалій у мережевому трафіку. Експериментальне порівняння на датасеті NSL-KDD показало, що метод Random Forest забезпечує найкращий баланс точності (F1-score = 0.9748) та швидкодії серед розглянутих алгоритмів, що робить його найбільш придатним для застосування в інтелектуальних системах виявлення вторгнень реального часу. Перспективами подальших досліджень є застосування методів глибокого навчання (автоенкодерів, рекурентних нейронних мереж), ансамблевих підходів для підвищення якості детектування, а також адаптація моделей до потокових даних для роботи в умовах змінюваного характеру мережевого трафіку.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Buczak A.L., Guven E. A Survey of Data Mining and Machine Learning Methods for Cyber Security Intrusion Detection. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18, No. 2. P. 1153–1176. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2494502>
2. Ahmad Z., Shahid Khan A., Wai Shiang C., Abdullah J., Ahmad F. Network intrusion detection system: A systematic study of machine learning and deep learning approaches. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. 2021. Vol. 32, No. 1. e4150. DOI: <https://doi.org/10.1002/ett.4150>
3. Tavallaei M., Bagheri E., Lu W., Ghorbani A.A. A Detailed Analysis of the KDD CUP 99 Data Set. Proceedings of the IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications (CISDA). 2009. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/CISDA.2009.5356528>

4. Mirsky Y., Doitshman T., Elovici Y., Shabtai A. Kitsune: An Ensemble of Autoencoders for Online Network Intrusion Detection. Proceedings of the Network and Distributed System Security Symposium (NDSS). 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.14722/ndss.2018.23204>

APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS FOR ANOMALY DETECTION IN NETWORK TRAFFIC

Stanislav Maliienko, Tetiana Selivorstova

Abstract. *This paper investigates the effectiveness of machine learning methods for anomaly detection in network traffic. The main approaches to building intelligent intrusion detection systems (IDS) are analyzed, including signature-based analysis and machine learning-based methods. An experimental comparison of Random Forest, Support Vector Machine, k-Nearest Neighbors, and Multilayer Perceptron algorithms was performed on the NSL-KDD dataset. Classification quality was assessed using Accuracy, Precision, Recall, and F1-score metrics. The results showed that the Random Forest method provides the best balance of accuracy and computational efficiency for real-time network anomaly detection tasks. The prospects of applying ensemble methods and deep learning for improving cyber threat detection quality are identified.*

Keywords: *machine learning, anomaly detection, network traffic, cybersecurity, intrusion detection system, Random Forest, classification, NSL-KDD.*

**МЕТОДИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ВІДЕОПОТОКІВ ДЛЯ
АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЛУЧЕННЯ СТРУКТУРОВАНИХ
ДАНИХ З OSD-ІНТЕРФЕЙСІВ**

Мельник А.А.¹ [ORCID], Павловський В.І.² [ORCID]

¹Національний технічний університет України “Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського”, магістрант, Україна

²Національний технічний університет України “Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського”, к.т.н., доцент, Україна

Анотація. У роботі досліджено інтелектуальні методи автоматизованого вилучення телеметричних даних з екранних меню (OSD) відеопотоків, що є критично актуальним для систем управління, де прямий цифровий доступ до протоколів передачі інформації обмежений або відсутній. Автором запропоновано та науково обґрунтовано комплексний підхід, що базується на синергії класичних алгоритмів цифрової обробки зображень та сучасних архітектур глибокого навчання. У статті детально розкрито ключові етапи технологічного процесу: попередню фільтрацію шумів, адаптивну бінаризацію кадру, локалізацію зон інтересу (ROI) та безпосереднє розпізнавання текстових блоків. Окрему увагу приділено порівняльному аналізу ефективності різних методів оптичного розпізнавання символів (OCR) в умовах обмежених обчислювальних ресурсів та необхідності обробки даних у режимі реального часу. Встановлено, що використання згорткових нейронних мереж у поєднанні з попередньою сегментацією кадру забезпечує високу стійкість до динамічного фону. Результати проведеного дослідження підтверджують можливість повної автоматизації збору структурованих даних із точністю, яка є достатньою для подальшої математичної обробки, верифікації та візуалізації показників об'єкта моніторингу в інформаційних системах.

Ключові слова: інтелектуальний аналіз, відеопотік, OSD-інтерфейс, OCR, структуровані дані, комп'ютерний зір, нейронні мережі, бінаризація, сегментація кадру, телеметрія.

Вступ. Стрімкий розвиток роботизованих комплексів, безпілотних систем та засобів віддаленого моніторингу супроводжується генеруванням великих обсягів відеоданих. Одним із ключових способів візуалізації критично

важливої інформації (координати, стан сенсорів, часові мітки) є технологія On-Screen Display (OSD), яка накладає текстові дані безпосередньо на відеоряд.

Проте, часто виникає ситуація, коли прямий доступ до цифрового протоколу передачі телеметрії відсутній, і єдиним джерелом інформації залишається відеозапис або живий потік з накладеним текстом. У таких випадках ручна обробка стає неефективною. Актуальність дослідження полягає у розробці методів інтелектуального аналізу, які дозволяють у реальному часі автоматично "зчитувати" ці дані та перетворювати їх у структурований вигляд (JSON, CSV тощо) для подальшої обробки в інформаційних системах управління.

Основна частина: Процес інтелектуального аналізу відеопотоку починається з фундаментальних етапів попередньої обробки, які дозволяють мінімізувати вплив шумів та нестабільного освітлення. Відповідно до класичних концепцій обробки цифрових зображень, критично важливим є етап бінаризації та фільтрації, що дозволяє відокремити корисний сигнал (текст OSD) від динамічного та часто неоднорідного фону відео [2]. Використання адаптивних алгоритмів дозволяє системі підлаштовуватися під зміну яскравості кадру, що є характерним для відеопотоків, отриманих у польових умовах або при складних погодних сценаріях.

Для ефективного вилучення даних необхідно не лише розпізнати символи, а й точно локалізувати їх у просторі кадру. Сучасні підходи до комп'ютерного зору пропонують використання методів сегментації зон інтересу (ROI), що дозволяє значно скоротити обчислювальні витрати, зосереджуючи ресурси системи лише на тих ділянках, де статистично ймовірна поява телеметричної інформації [1]. Такий підхід особливо актуальний для реалізацій на мобільних або вбудованих платформах, де існують жорсткі обмеження щодо енергоспоживання та потужності центрального процесора. Застосування оптимізованих алгоритмів пошуку об'єктів дозволяє досягти стабільної частоти обробки кадрів, що є необхідною умовою для роботи систем у реальному часі [3].

Останнім етапом є безпосереднє розпізнавання (OCR) та структурування даних. Впровадження інтелектуальних методів на основі глибокого навчання дозволяє автоматизованим мережевим системам не лише зчитувати текст, а й проводити його інтелектуальну фільтрацію та класифікацію згідно з заданими рекомендаціями [4]. Порівняльні характеристики основних підходів, що використовуються на різних етапах аналізу відеопотоку, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики методів аналізу OSD-інтерфейсів

Назва етапу обробки	Сфера застосування методу	Основні переваги підходу	Технічні обмеження
Попередня обробка	Адаптивне порогоування	Висока швидкість роботи	Чутливість до різких тіней
Локалізація тексту	Шаблонне співставлення	Низькі вимоги до ресурсів	Лише для фіксованих шрифтів
Розпізнавання (OCR)	Нейромережеві моделі	Висока точність результату	Потребує GPU-прискорення

Застосування вищезазначених методів дозволяє створити надійний фундамент для побудови систем автоматизованого збору відеоконтенту, де кожна одиниця візуальної інформації автоматично отримує відповідні метадані.

Висновки

Проведене дослідження підтверджує, що ефективне вилучення структурованих даних з відеопотоків можливе лише за умови поєднання методів адаптивної попередньої обробки та інтелектуального розпізнавання символів. Використання оптимізованих алгоритмів локалізації тексту дозволяє реалізувати такі системи навіть на пристроях з обмеженими обчислювальними ресурсами, забезпечуючи при цьому високу вірогідність розпізнавання телеметрії. Впровадження запропонованих підходів значно підвищує рівень автоматизації процесів збору та обробки інформації в сучасних мережевих системах моніторингу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. 2nd ed. Springer Nature, 2022. 945 p. DOI: 10.1007/978-3-030-34372-9

2. Gonzalez, R.C. and Woods, R.E. Digital Image Processing. 4th Edition, Pearson Education, New York, 2018. 1022 p. URL: <https://www.cl72.org/090imagePLib/books/Gonzales,Woods-Digital.Image.Processing.4th.Edition.pdf>
3. Кушнір Д. О., Парамуд Я. С. Методи пошуку та розпізнавання об'єктів у відеозображеннях на мобільній платформі iOS в реальному часі. Комп'ютерні системи і мережі. 2019. Вип. 1, № 1. С. 24–34. DOI: 10.23939/csn2019.01.024
4. Павленко О. О. Дослідження інтелектуальних методів обробки даних автоматизованої мережевої системи збору і рекомендацій відеоконтенту. Наукові праці ОНАТ ім. О.С. Попова. 2021. URL: <https://jarch.donnu.edu.ua/article/view/13417>

METHODS OF INTELLIGENT VIDEO STREAM ANALYSIS FOR AUTOMATED EXTRACTION OF STRUCTURED DATA FROM OSD INTERFACES

Andrii Melnyk, Volodymyr Pavlovskyi

Abstract. *The paper investigates intelligent methods for automated telemetry data extraction from On-Screen Display (OSD) video streams. This task is critical for control systems where direct digital access to data protocols is restricted. The author proposes a comprehensive approach based on the synergy of classical image processing algorithms and modern deep learning architectures. The article details key stages: noise filtering, adaptive binarization, localization of regions of interest (ROI), and character recognition. Particular attention is paid to the comparative analysis of various optical character recognition (OCR) methods under limited computing resources for real-time processing. It is established that convolutional neural networks combined with frame segmentation ensure high resistance to dynamic backgrounds. The results confirm the feasibility of automating structured data collection with accuracy sufficient for further mathematical processing and visualization in information monitoring systems.*

Keywords: *intelligent analysis, video stream, OSD interface, OCR, structured data, computer vision, neural networks, binarization, frame segmentation, telemetry.*

REFERENCE

1. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. 2nd ed. Springer Nature, 2022. 945 p. DOI: 10.1007/978-3-030-34372-9
2. Gonzalez, R.C. and Woods, R.E. Digital Image Processing. 4th Edition, Pearson Education, New York, 2018. 1022 p. URL: <https://www.cl72.org/090imagePLib/books/Gonzales,Woods-Digital.Image.Processing.4th.Edition.pdf>
3. Kushnir D. O., Paramud Ya. S. Metody poshuku ta rozpoznavannia ob'ektiv u videozobrazhenniakh na mobilnii platformi iOS v realnomu chasi. Kompiuterni systemy ta merezhi. 2019. Vol. 1, No. 1. Pp. 24–34. DOI: 10.23939/csn2019.01.024 [in Ukrainian].
4. Pavlenko O. O. Doslidzhennia intelektualnykh metodiv obrobky danykh avtomatyzovanoi merezhevoi systemy zboru i rekomendatsii vidieokontentu: kvalifikatsiina (mahisterska) robota, spetsialnist 122 “Kompiuterni nauky”. Donetskyi natsionalnyi universytet imeni Vasylya Stusa, Vinnytsia, 2022. 77 p. [in Ukrainian]. URL: <https://jarch.donnu.edu.ua/article/view/13417>

МЕТОДОЛОГІЯ ПІДГОТОВКИ ДАТАСЕТУ ДЛЯ НАВЧАННЯ МОДЕЛЕЙ ВІЯВЛЕННЯ ШАХРАЙСТВА В ЕЛЕКТРОННІЙ КОМЕРЦІЇ

Носов В.О.¹ [ORCID], Островська К.Ю.² [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

²Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

Анотація. У дослідженні розглянуто проблему підготовки тренувальних даних для систем виявлення шахрайства в транзакціях електронної комерції на основі методів машинного навчання. За результатами аналізу існуючих відкритих джерел обґрунтовано необхідність створення спеціалізованого набору даних. Запропоновано автоматизований конвеєр об'єднання трьох відкритих наборів даних з платформи Kaggle (IEEE-CIS, Sparkov, Fraudulent E-Commerce) зі збереженням реальних міток шахрайства та збагаченням записів синтетичними атрибутами, адаптованими до специфіки українського платіжного ринку. Опрацьовано методи рівномірної нормалізації часових міток, генерації автентифікаційних даних та розбиття на платіжні системи, формування агрегованих профілів клієнтів та пар для навчання моделі IP Insights. Результатом є набір із 500000 транзакцій за 24 місяці з рівнем шахрайства 3,04%, призначений для навчання конвеєра моделей, до яких входять LightGBM, автоенкодер та IP Insights.

Ключові слова: датасет, машинне навчання, транзакція, електронна комерція, LightGBM, автоенкодер, IP Insights

Вступ

Стрімке зростання обсягів електронної комерції супроводжується збільшенням масштабів платіжного шахрайства. За спільним звітом European Bank Authority та European Central Bank за грудень 2025 року, загальний обсяг шахрайства у Європейському економічному просторі сягнув 4,2 млрд євро у 2024 році (ріст на 17% порівняно з 2023 р.) [1]. Шахрайство з картковими транзакціями становило 1,3 млрд євро (+29%), а 80–85% припало на дистанційні операції. За глобальним опитуванням Visa та Merchant Risk Council серед понад 1000 торговців, 98% респондентів зіткнулися з шахрайством протягом останнього року, а понад 80% відзначили труднощі з ефективним використанням даних та підвищенням точності моделей машинного навчання

(МН) [2]. Ці тенденції підтверджують актуальність як удосконалення алгоритмів протидії шахрайству, так і необхідності підготовки якісних тренувальних даних для систем на основі МН.

У попередній роботі [3] було проведено аналіз існуючих методів МН для виявлення шахрайства, на основі якого сформовано концепцію багатошарової системи виявлення шахрайства в онлайн-транзакціях з використанням конвеєра LightGBM, автоенкодера та IP Insights на базі AWS SageMaker. Одним із етапів подальшої роботи стала підготовка спеціалізованого набору даних. Метою даної роботи є опис методології створення такого набору, адаптованого до специфіки українського платіжного ринку, на основі злиття кількох відкритих наборів із Kaggle.

Виклад основного матеріалу

Як інформаційну базу для формування єдиного репрезентативного набору даних було відібрано три відкриті масиви з платформи Kaggle:

1. IEEE-CIS Fraud Detection (близько 590 тис. транзакцій) – містить достовірні мітки класів шахрайства, оригінальні суми операцій у доларах (USD), мережеві індикатори (поштові домени), а також розширені атрибути цифрових відбитків пристроїв і браузерів [4];
2. Sparkov Data Generation (близько 1,3 млн транзакцій) – синтетично згенерований набір, що забезпечує глибоку деталізацію часових міток, фінансових показників та категоризації витрат [5];
3. Fraudulent E-Commerce (близько 100 тис. записів) – набір, що включає унікальні ідентифікатори користувачів, транзакційні суми та відповідну бінарну розмітку аномалій [6].

Перевагою такого об'єднання є збереження автентичних міток класів та ненормалізованих значень сум фінансових операцій із різних джерел.

Проведений аналіз альтернативних відкритих наборів даних у цій предметній області виявив їхню методологічну невідповідність завданням даного дослідження. Зокрема, набір IBM AMLSim [7] орієнтований на специфіку виявлення відмивання коштів (Anti-Money Laundering), тоді як популярний Credit Card Fraud Dataset [8] містить виключно анонімізовані ознаки,

перетворені за допомогою методу головних компонент (PCA), що позбавляє дані семантичного контексту.

Зважаючи на різні часові межі та обсяги вихідних масивів, їхнє лінійне масштабування могло б призвести до статистичних викривлень. З метою запобігання цьому застосовано алгоритм рівномірного перерозподілу, який ґрунтується на ранговому перетворенні (rank transformation): відсортованим за оригінальними мітками транзакціям послідовно присвоєно дати в діапазоні 01.01.2023–31.12.2024 зі збереженням початкового часу доби. Суть підходу полягає у заміні оригінальних часових міток на рівновіддалені значення у цільовому діапазоні із збереженням порядкового рангу кожної транзакції. Для унеможливлення небажаної кластеризації за джерелом походження щоденні пули транзакцій додатково перемішуються.

Формат даних структуровано у вигляді EMV 3D-Secure [9] транзакцій. Оскільки у відкритих масивах відсутні специфічні поля цього протоколу, їх згенеровано синтетично на основі ймовірнісних розподілів. Відтворено такі технічні параметри, як тип автентифікації (challenge, frictionless, stand-in processing), канал ініціації транзакції (browser, application, 3DS requestor initiated), платіжна система (Visa, MasterCard, Prostir), динаміка версій 3DS, структура типових мерчантів та еквайерів. Для врахування специфіки українського ринку, були використані типові українські мерчанти та банки еквайри, встановлено загальне домінування гривні (UAH) на рівні 70%.

Для формування стійких дискримінативних ознак додатково змодельовано контекстні атрибути: IP-адреси з урахуванням маршрутизації 30% шахрайського трафіку через VPN або датацентри, узгоджені профілі пристроїв (Android, iOS і т.д.) із кореляцією операційної системи та браузера, використання одноразових email-доменів.

Окрім базового набору, архітектура конвеєра із алгоритмів МН вимагає формування спеціалізованих структур даних. Так, набір агрегованих клієнтських профілів містить поведінкові ознаки карток, зокрема кількість і суми операцій за різні проміжки часу, унікальність торговців, IP та пристроїв, а також частоту шахрайства. Ці обчислені метрики утворюють вхідний вектор

для автоенкодера та LightGBM. Паралельно для алгоритму аналізу мережевої поведінки IP Insights підготовлено набір пар «клієнт–IP».

Фінальне хронологічне розбиття датасету у пропорції 70/15/15 імітує реальні умови експлуатації системи, де навчання відбувається на історичних подіях, а прогнозування – на майбутніх. Додатково сформована валідаційна вибірка слугує для калібрування порогів ризику, тоді як тестова для об'єктивної оцінки здатності моделі до генералізації.

Основна зведена статистика по поточній версії датасету представлена у табл.1.

Таблиця 1

Статистика по набору даних

Параметр	Значення
Загальна кількість транзакцій	500000
Загальна кількість шахрайських транзакцій	15178 (3.04%)
Загальна кількість легітимних транзакцій	484822 (96.96%)
Унікальних карток	227651
Унікальних продавців	114
Унікальних IP адрес	470682
Основна валюта	UAH (70%)
Основна операційна система	Android (69,9%)
Основний браузер	Chrome (48,8%)
Payment Network Operator	Visa 50%, Mastercard 40%, Prostir 10%

Висновки

Описано методологію підготовки набору даних транзакцій для навчання конвеєра моделей виявлення шахрайства в електронній комерції. Запропонований підхід дозволив об'єднати кілька відкритих наборів даних зі збереженням реальних міток шахрайства, збагатити дані синтетичними атрибутами автентифікації та характеристиками українського платіжного ринку, забезпечити реалістичну кореляцію згенерованих полів із мітками шахрайства та сформувати додаткові набори для навчання моделей IP Insights й автоенкодера.

Подальша робота передбачає навчання та оптимізацію конвеєра МН на сформованому наборі, порівняльний аналіз з альтернативними алгоритмами та інтеграцію з хмарною інфраструктурою AWS SageMaker.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Joint EBA-ECB report on payment fraud. 2025. URL: <https://www.eba.europa.eu/publications-and-media/press-releases/joint-eba-ecb-report-payment-fraud-strong-authentication-remains-effective-fraudsters-are-adapting>
2. Visa Payments & Fraud Report. 2025. URL: <https://www.visaacceptance.com/content/dam/documents/campaign/fraud-report/global-fraud-report-2025.pdf>
3. Ostrovska K., Nosov V. Machine learning methods for antifraud systems. Системні технології. 2025. Т. 5, вип. 160. С. 156–163. URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-160-2025-16>
4. IEEE-CIS Fraud Detection. 2019. URL: <https://www.kaggle.com/competitions/ieee-fraud-detection/overview>
5. Credit Card Transactions Fraud Detection Dataset. 2020. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/kartik2112/fraud-detection>
6. Fraudulent E-Commerce Transactions. 2024. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/shriyashjagtap/fraudulent-e-commerce-transactions>
7. Anti-Money Laundering Datasets. 2021. URL: <https://github.com/IBM/AMLSim>
8. Credit Card Fraud Detection. 2018. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/mlg-ulb/creditcardfraud>
9. EMV 3D-Secure. 2025. URL: <https://www.emvco.com/emv-technologies/3-d-secure/>

METHODOLOGY OF DATASET PREPARATION FOR TRAINING E-COMMERCE FRAUD DETECTION MODELS

Valerii Nosov, Kateryna Ostrovska

Abstract. *This study addresses the problem of preparing training data for machine learning-based fraud detection systems in e-commerce transactions. Based on the analysis of existing open sources, the necessity of creating a specialized dataset is justified. An automated pipeline is proposed for merging three open datasets from the Kaggle platform (IEEE-CIS, Sparkov, Fraudulent E-Commerce), preserving real fraud labels and enriching records with synthetic attributes adapted to the specifics of the Ukrainian payment market. Methods for the uniform normalization of timestamps, generation of authentication data, partitioning by payment systems, and the formation of aggregated customer profiles and pairs for training the IP Insights model have been developed. The result is a dataset comprising 500,000 transactions over a 24-month period with a fraud rate of 3.04%, designed to train a model pipeline that includes LightGBM, an autoencoder, and IP Insights.*

Keywords: *dataset, machine learning, transaction, e-commerce, LightGBM, autoencoder, IP Insights.*

ІНТЕГРАЦІЯ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ В ГЕНЕРАТИВНО-ЗМАГАЛЬНУ МЕРЕЖУ TIMEGAN ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ФІНАНСОВИХ ЧАСОВИХ РЯДІВ

Перцев Ю.О.¹ [ORCID], Коротка Л.І.² [ORCID]

¹УДУНТ ННІ УДХТУ, аспірант, Україна

²УДУНТ ННІ УДХТУ, к.т.н., доцент, Україна

Анотація. Розглянуто проблему фіксованої довжини вікна спостереження у генеративно-змагальній мережі TimeGAN та запропоновано метод її вирішення через інтеграцію нечіткого регулятора параметра k . На відміну від детермінованого підбору гіперпараметрів, нечіткий модуль $\Phi: S \rightarrow K = \{10, \dots, 60\}$ динамічно адаптує k залежно від поточного ринкового режиму, що характеризується вектором з чотирьох індикаторів: риночної волатильності, нормованого нахилу лінійної регресії, нормованого обсягу торгів відносно ковзного середнього та волатильності настрою новин.

Описано архітектурні зміни у функції вбудовування TimeGAN, необхідні для інтеграції змінного вікна, та підтверджено ефективність підходу на двох активах (S&P 500, AAPL) за 2019–2025 р. MAE знизився на 16,4% для S&P 500 та на 12,9% для AAPL порівняно з базовим TimeGAN при фіксованому k .

Ключові слова: TimeGAN, нечітка логіка, система Мамдані, адаптивне вікно, генеративно-змагальні мережі, прогнозування часових рядів.

Прогнозування нестаціонарних фінансових часових рядів є актуальною задачею обчислювального інтелекту: динаміка цін акцій визначається поєднанням нелінійних залежностей, структурних режимних зсувів та подієво-орієнтованих стрибків, що унеможливорює ефективне застосування класичних статистичних моделей (ARIMA) та авторегресійних нейронних мереж (LSTM) у довгостроковому горизонті [1].

Генеративно-змагальна мережа TimeGAN [2] є найбільш перспективною генеративною моделлю для даної задачі: на відміну від LSTM, що прогнозує лише умовне математичне сподівання $E[y_{t+1}|y_1, \dots, y_t]$, TimeGAN моделює повний умовний розподіл майбутніх траєкторій $p(y_{[t+1:t+h]}|y_1, \dots, y_t)$, що дозволяє природно будувати довірчі інтервали та здійснювати сценарний аналіз.

Незважаючи на переваги, базовий TimeGAN має структурне обмеження: довжина вікна спостереження k визначається одноразово у процесі перебору гіперпараметрів та залишається фіксованою впродовж всього навчання й інференсу. Між тим декомпозиція очікуваної квадратичної похибки:

$$E[(y_{t+1} - \hat{y}_{t+1})^2] = \text{Bias}^2(k, s_t) + \text{Var}(k, s_t) + \varepsilon^2, \quad (1)$$

показує, що оптимальний k є функцією поточного стану ринку s_t : при підвищеній волатильності ($\sigma_t > 0,02$) складова Bias^2 стрімко зростає для великих k – оскільки нестационарний ринковий режим змінюється швидше, ніж встигає накопичитися репрезентативна вибірка довжиною k , і модель усереднює спостереження з різних режимів – оптимум $k \approx 20-30$, а у стабільних трендових фазах ($\sigma_t < 0,008$, $|\tau_t| > 0,5$) оптимум зміщується до $k \approx 50-60$. Фіксоване k неминуче призводить до субоптимальних прогнозів при зміні ринкового режиму.

Для усунення виявленого обмеження запропоновано інтегрувати у TimeGAN нечіткий регулятор параметра k – відображення $\Phi: S \rightarrow K = \{10, \dots, 60\}$, що реалізується системою нечіткого виведення Мамдані [3]. Вхідний вектор стану ринку:

$$s_t = (\sigma_t, \tau_t, v_t, \xi_t)^T \in S \subseteq R^4, \quad (2)$$

де σ_t – реалізована волатильність (стандартне відхилення логарифмічних прибутковостей за $w = 20$ днів); $\tau_t \in [-1, 1]$ – нормований нахил лінійної регресії (одночасно кодує напрямок та силу тренду); v_t – нормований обсяг торгів відносно ковзного середнього; $\xi_t \in [0, 1]$ – волатильність настрою (стандартне відхилення тональних оцінок новин за 10 торгових днів, що є раннім індикатором режимного переходу).

Система Мамдані містить 18 правил IF-THEN: 9 базових правил охоплюють усі комбінації рівнів $\sigma_t \times \tau_t$ (по 3 рівні: низький / середній / високий), інші 6 додаткових враховують взаємодію аномального v_t з рівнями σ_t (2 стани $v_t \times 3$ стани σ_t), останні 3 правила описують поведінку при нестабільному ξ_t незалежно від тренду. Функції належності – сигмоїдні класу C^∞ з параметрами $\gamma_\sigma = 600$, $\gamma_\tau = 15$, $\gamma_v = 8$, $\gamma_\xi = 11$. Дефазифікація виконується методом центра ваги (COG). Для відображення Φ доведено: обмеженість $k^*(s_t) \in [10, 60]$, неперервність $k^*(s_t) \in C^0(S)$ та монотонність ($\sigma_t \uparrow \Rightarrow k^* \downarrow$, $|\tau_t| \uparrow \Rightarrow k^* \uparrow$).

Ключовим архітектурним питанням було як інтегрувати змінний k_t у TimeGAN, де функція вбудовування $e: R^k \rightarrow H$ очікує вхід фіксованої розмірності. Рішення було знайдено за допомогою проєкційного шару:

$$x_t^{proj} = W_p \cdot pad(x_t^{k_t}, k_{max}) + b_p, W_p \in R^{d_p \times (k_{max} \cdot n)}, b_p \in R^{d_p}, \quad (3)$$

де $pad(x_t^{k_t}, k_{max})$ доповнює вектор довжини k_t нулями зліва до стандартної довжини $k_{max} = 60$, W_p ($d_p = 64$) навчається разом з усіма компонентами TimeGAN та схильний зменшувати вагу нульових позицій паддингу. Модифікований вхідний вектор $e(x_t^{proj}) \in H$ зберігає розмірність $d_h = 24$, і жоден із п'яти GRU-компонентів TimeGAN (e, r, S, G_s, D_s) не вимагає структурних змін – інтеграція реалізується виключно на рівні вхідного шару. У даній роботі моделюється одновимірний ціновий ряд ($n = 1$), тому $W_p \in R^{64 \times 60}$.

Доведено, що для будь-якого $k_t \in K$ розмірність вхідного вектора $x_t^{proj} \in R^{d_p} = R^{64}$ є фіксованою константою, що не залежить від k_t . Отже, властивості генератора G_s (диференційованість при обмежених вагах W_p) та збіжність GAN-навчання зберігаються.

Навчання модифікованого TimeGAN (TimeGAN-F) відбувається у трьох фазах. Фаза 1 (одноразово): калібрування нечіткого регулятора Φ на навчальній вибірці – визначення порогових значень c_0, c_1, c_2 для функцій належності через квантілі Q_{25}, Q_{50}, Q_{75} розподілів $\sigma_t, \tau_t, v_t, \xi_t$. Фаза 2: попереднє навчання автокодувальника (e, r) через мінімізацію $L_{reconstruction}$ при фіксованих G_s, D_s . Фаза 3: спільне навчання всіх компонентів через функцію втрат, ідентичну базовому TimeGAN:

$$L_{TimeGAN-F} = L_{reconstruction} + \lambda_2 L_{supervised} + \lambda_3 L_{unsupervised}, \quad (4)$$

де $\lambda_2 = \lambda_3 = 10$ успадковуються від конфігурації Yoon et al. (2019) [4]. Принципова відмінність від базового TimeGAN – перерахунок $k_t = \Phi(s_t)$ на кожному пакеті (batch-level adaptive window): для кожного зразка у пакеті нечіткий регулятор обчислює індивідуальний k_t перед формуванням x_t^{proj} . Обчислювальна вартість виклику Φ становить $O(18)$ операцій ($\sim 0,08$ мс), що складає менше 0,3% від часу одного навчального кроку GRU-компонентів.

Верифікацію проведено на двох активах американського фондового ринку (S&P 500, AAPL) за 2019-2025 рр. методологією ковзного вікна ($T_{train} = 500, T_{val} = 60, T_{slide} = 20$ днів; 11 незалежних тестових перевірок).

Таблиця 1 наводить порівняльні метрики для горизонту прогнозування $h = 5$ днів для обох активів.

Таблиця 1

Порівняння метрик якості прогнозування

Модель	Актив	MAE	RMSE	MAPE, %	R ²
ARIMA	S&P500	42,1	58,7	3,42	0,721
LSTM	S&P500	28,6	39,4	2,31	0,847
TimeGAN (базовий)	S&P500	21,3	29,8	1,73	0,903
TimeGAN-F (нечітке k)	S&P500	17,8	25,1	1,44	0,931
ARIMA	AAPL	8,45	9,7	3,04	0,33
LSTM	AAPL	6,34	7,28	2,28	0,51
TimeGAN (базовий)	AAPL	2,71	3,57	1,38	0,95
TimeGAN-F (нечітке k)	AAPL	2,36	3,29	1,09	0,98

TimeGAN з нечітким регулятором k (TimeGAN-F) перевершує базовий TimeGAN за всіма метриками на обох активах. Для S&P 500: MAE знизився на 16,4% (з 21,3 до 17,8), RMSE – на 15,8% (з 29,8 до 25,1), R² зріс з 0,903 до 0,931. Для AAPL: MAE знизився на 12,9% (з 2,71 до 2,36), RMSE – на 7,8% (з 3,57 до 3,29), R² зріс з 0,95 до 0,98. Порівняно з ARIMA покращення MAE становить 57,7% для S&P 500 та 72,1% для AAPL.

Поведінка нечіткого регулятора підтверджена окремо: на даних S&P 500 та AAPL за 2019-2025 рр. (14 ринкових режимів) MAE між k_t , обчисленим нечітким регулятором Φ , та оптимальним k_t^* , визначеним ретроспективним перебором на валідаційній вибірці, становить 1,08 кроки, коефіцієнт рангової кореляції Спірмена $\rho_s(k_t, \sigma_t) = -0,84$ та $\rho_s(k_t, |\tau_t|) = +0,76$ ($p < 0,001$). При COVID-кризі 2020 р. регулятор знизив k_t з 50-55 до 15-22 впродовж 8-10 торгових днів; аналогічну реакцію відтворено при тарифному шоці квітня 2025 р. k_t знизився до 12-19.

Ключова властивість інтеграції – плавність адаптації. Пороговий підхід до вибору k при осциляції σ_t навколо порогу генерує стрибки $\Delta k = 10-15$ кроків між сусідніми торговими сесіями (RMSE від «ідеальної» траєкторії: 7,2), тоді як нечіткий регулятор забезпечує $\Delta k \leq 2$ кроки (RMSE = 0,8) – перевага у 9 разів. Ця властивість безпосередньо впливає на якість прогнозів: стрибкоподібна зміна k дестабілізує GAN-навчання на відміну від плавної адаптації.

Таким чином, було запропоновано метод інтеграції нечіткого регулятора параметра k у генеративно-змагальну мережу TimeGAN. При цьому отримані наступні результати:

- розроблено нечіткий регулятор $\Phi: S \rightarrow K = \{10, \dots, 60\}$ на основі системи Мамдані з 18 правилами IF-THEN та 4 вхідними змінними $(\sigma_t, \tau_t, v_t, \xi_t)$ з формально доведеними властивостями обмеженості, неперервності та монотонності;
- запропоновано архітектурне рішення для інтеграції змінного k_t у TimeGAN через проєкційний шар $W_p \in R^{64 \times 60}$ з операцією нульового паддингу; доведено коректність – фіксована розмірність входу e зберігається при будь-якому $k_t \in K$;
- верифіковано на 2 активах (S&P 500, AAPL), 2019–2025 р.: MAE знизився на 16,4% (S&P 500) та 12,9% (AAPL) порівняно з базовим TimeGAN, на 57,7% та 72,1% відповідно порівняно з ARIMA;
- підтверджено, що плавна адаптація k_t ($\Delta k \leq 2$ між сесіями) є необхідною умовою стабільного GAN-навчання на відміну від стрибкоподібного порогового підходу (Δk до 15).

ЛІТЕРАТУРА

1. Перцев Ю. О., Коротка Л. І. (2025) Порівняльний аналіз традиційних статистичних методів та нейромережевої моделі LSTM. Системні технології. 2025. №1(156). С. 65-77. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-1-156-2025-08>
2. Перцев Ю. О., & Коротка Л. І. (2025). Порівняльний аналіз генеративно-змагальних мереж для прогнозування часових рядів фондового ринку. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2025. – Випуск 4(153), 220-231. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.4.26>
3. Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // International Journal of Man-Machine Studies. — 1975. — Vol. 7 (1). — P. 1–13.
4. Yoon J., Jarrett D., van der Schaar M. Time-series generative adversarial networks // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2019. — Vol. 32. — P. 5508–5518.
5. Goodfellow I. et al. Generative adversarial nets // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2014. — Vol. 27. — P. 2672–2680.

INTEGRATION OF FUZZY LOGIC INTO THE TimeGAN GENERATIVE ADVERSARIAL NETWORK FOR FINANCIAL TIME SERIES FORECASTING

Y. Pertsev, L. Korotka

Abstract. *The problem of a fixed observation window length in the TimeGAN generative adversarial network is examined, and a method for resolving it through the integration of a fuzzy controller for parameter k is proposed. Unlike deterministic hyperparameter tuning, the fuzzy module $\Phi: S \rightarrow K = \{10, \dots, 60\}$ dynamically adapts k according to the current market regime, characterized by a vector of four indicators: market volatility, the normalized slope of a linear regression, the normalized trading volume relative to the moving average, and news sentiment volatility. The architectural modifications to the TimeGAN embedding function required for variable window integration are described, and the effectiveness of the approach is confirmed on two assets (S&P 500, AAPL) over the period 2019–2025: MAE decreased by 16,4% for S&P 500 and by 12,9% for AAPL compared to the baseline TimeGAN with fixed k .*

Keywords: *TimeGAN, fuzzy logic, Mamdani system, adaptive window, generative adversarial networks, time series forecasting.*

REFERENCE

1. Pertsev Y. O., Korotka L. I. Comparative analysis of traditional statistical methods and the LSTM neural network model. System technologies. 2025. №1(156). P. 65–77. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-1-156-2025-08>
2. Pertsev Y. O., & Korotka L. I. (2025). Porivnialnyi analiz heneratyvno-zmahalnykh merezh dlia prohnozuvannia chasovykh riadiv fondovoho rynku. Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho. – Kremenchuk: KrNU, 2025. – Vypusk 4(153), 220–231. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.4.26>
3. Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // International Journal of Man-Machine Studies. — 1975. — Vol. 7 (1). — P. 1–13.
4. Yoon J., Jarrett D., van der Schaar M. Time-series generative adversarial networks // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2019. — Vol. 32. — P. 5508–5518.
5. Goodfellow I. et al. Generative adversarial nets // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2014. — Vol. 27. — P. 2672–2680.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ІДЕНТИФІКАЦІЇ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ У МЕЛ-КЕПСТРАЛЬНОМУ ПРОСТОРИ

Поливода О.В.¹ [ORCID], Назмеев І.О.² [ORCID]

¹Херсонський національний технічний університет, к.т.н., доцент, Україна

²Херсонський національний технічний університет, аспірант, Україна

Анотація. Впровадження інтелектуальних систем моніторингу в промислову автоматизацію та новітні транспортні системи потребує розробки методів ідентифікації рухомих об'єктів, здатних стабільно функціонувати в умовах високого рівня завад та обмеженої видимості. Традиційні амплітудні методи обробки є чутливими до нестационарності акустичних сигналів та зміни відстані до джерела, що ускладнює точну сегментацію динамічних станів об'єкта. Метою роботи є розробка математичної моделі ідентифікації фаз руху на основі мел-кепстрального аналізу, інтелектуальної кластеризації методом К-середніх, віконному перетворенні Фур'є, психоакустичній фільтрації та декореляції ознак у кепстральному просторі. Експериментально підтверджено ефективність сегментації фаз наближення, проїзду та віддалення з високою швидкістю обчислень, що дозволяє інтегрувати метод у системи автоматизованого керування та технічної діагностики в режимі реального часу.

Ключові слова: ідентифікація рухомих об'єктів, мел-кепстральні коефіцієнти, кластеризація, автоматизація моніторингу, акустичний сигнал, цифрова обробка сигналів, промислова автоматизація, сегментація фаз руху.

Сучасний стан розвитку інтелектуальних транспортних систем та систем автоматизованого моніторингу потребує впровадження алгоритмів ідентифікації, здатних з високою точністю та швидкодією розпізнавати рухомі об'єкти. Традиційні методи ідентифікації з використанням комп'ютерного зору, часто виявляються малоефективними в умовах обмеженої видимості, несприятливих погодних умов або складного освітлення, що зумовлює перехід до методів моніторингу заснованих на аналізі акустичних полів [1]. Тому актуальним завданням є математична формалізація процесу розпізнавання рухомих об'єктів через перетворення часової реалізації сигналу у багатовимірний простір кепстральних ознак, що дозволяє абстрагуватися від енергетичних параметрів та зосередитися на ідентифікації спектральної

огиноючої, що відображає фундаментальні фізичні властивості джерела звуку. Впровадження таких математичних моделей у системи промислової автоматизації забезпечує інваріантність процесу ідентифікації до зовнішніх збурень та гарантує високу швидкодію в режимі реального часу.

Метою дослідження є розробка математичної моделі ідентифікації фаз руху об'єктів шляхом перетворення часових реалізацій акустичних сигналів у простір мел-кепстральних коефіцієнтів з наступною сегментацією станів на основі ітераційних алгоритмів кластеризації.

Процес отримання ознак для ідентифікації транспортних засобів базується на комбінації класичного спектрального аналізу та психоакустичного моделювання. Математична модель алгоритму складається з наступних кроків:

1. Попередня обробка та сегментація [2]. Акустичний сигнал розділяється на короткі кадри тривалістю N відліків та виконується віконна обробка за методом Геммінга, результатом якої є зважена послідовність $s_{\omega}(n)$:

$$s_{\omega}(n) = s(n) \left[0.54 - 0.46 \cos \frac{2\pi \cdot n}{N-1} \right] \quad (1)$$

де n – дискретний час.

2. Швидке перетворення Фур'є [3]. Для переходу з часової області у частотну для кожного вікна обчислюється дискретне перетворення Фур'є:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s_{\omega}(n) \cdot e^{-i \frac{2\pi}{N} nk}, \quad (2)$$

де k – індекс частотної компоненти.

На основі отриманого спектра розраховується спектральна щільність потужності $P(k)$, яка відображає розподіл енергії сигналу за частотами:

$$P(k) = \frac{1}{N} |X(k)|^2. \quad (3)$$

3. Мел-фільтрація [4]. Перетворення лінійної частотної шкали f (Гц) у логарифмічну шкалу мелів m , яка імітує нелінійне сприйняття звуку людським вухом. Зв'язок між частотами визначається як:

$$m = 2595 \cdot \lg \left(1 + \frac{f}{700} \right) \quad (4)$$

Енергія в кожній мел-смузі $E(m)$ обчислюється шляхом згортки $P(k)$ з набором трикутних фільтрів $H_m(k)$:

$$E(m) = \sum_{k=0}^{N/2} P(k) \cdot H_m(k), \quad m = 1, \dots, M, \quad (5)$$

де M – кількість фільтрів.

4. Логарифмування енергій. Для імітації логарифмічної чутливості слуху до інтенсивності звуку та для нормалізації динамічного діапазону обчислюється логарифм енергії кожного фільтра $S(m)$, що надає алгоритму стійкості до значних змін амплітуди при зміні відстані від рухомого об'єкта до мікрофона, $S(m) = \ln(E(m))$.

5. Дискретне косинусне перетворення. Обчислення кепстральних коефіцієнтів шляхом застосування дискретного косинусного перетворення до логарифмічних енергій, що дає можливість декорелювати ознаки та виділити огинаючу спектра (спектральний контур):

$$C(n) = \sum_{m=1}^M S(m) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot n}{M} (m - 0.5)\right), \quad n = 0, \dots, L - 1, \quad (6)$$

де L – кількість вихідних коефіцієнтів.

Перевага використання мел-кепстрального аналізу у задачах ідентифікації транспортних засобів полягає в тому, що кепстральні коефіцієнти дозволяють розділити інформацію про джерело звуку (вібрації двигуна) та передавальну характеристику середовища. Це робить систему розпізнавання інваріантною до акустичних особливостей місцевості та погодних умов, фокусуючись на фундаментальних характеристиках об'єкта.

Наступний крок – автоматизований розподіл отриманих даних на групи, що відповідають фізичним станам руху транспортного засобу. Для цього найчастіше використовується метод K – середніх. Метою кластеризації є розбиття множини векторів ознак $X = \{x_1, x_2, \dots, x_M\}$ на K заздалегідь визначених кластерів $S = \{S_1, S_2, \dots, S_K\}$ за рахунок мінімізації сумарного квадратичного відхилення точок кластерів від їх центрів (центроїдів), що математично виражається як

$$J = \sum_{i=0}^{K-1} \sum_{x \in S_i} \|x - \mu_i\|^2, \quad (7)$$

де x – вектор кепстральних коефіцієнтів, μ_i – центроїд i -го кластера, $\|x - \mu_i\|$ – евклідова відстань між вектором ознак та центром кластера.

Важливим результатом проведеного дослідження є отримані спектральні портрети центроїдів, що представляють еталонні образи чотирифазної моделі руху об'єкта (рис. 1). Вісь ординат представлена у відносних децибелах, а вісь абсцис відображає центральні частоти мел-фільтрів. Графічний аналіз свідчить про те, що сформовані кластери є лінійно роздільними, що є критично важливим для стабільної роботи автоматизованих систем класифікації.

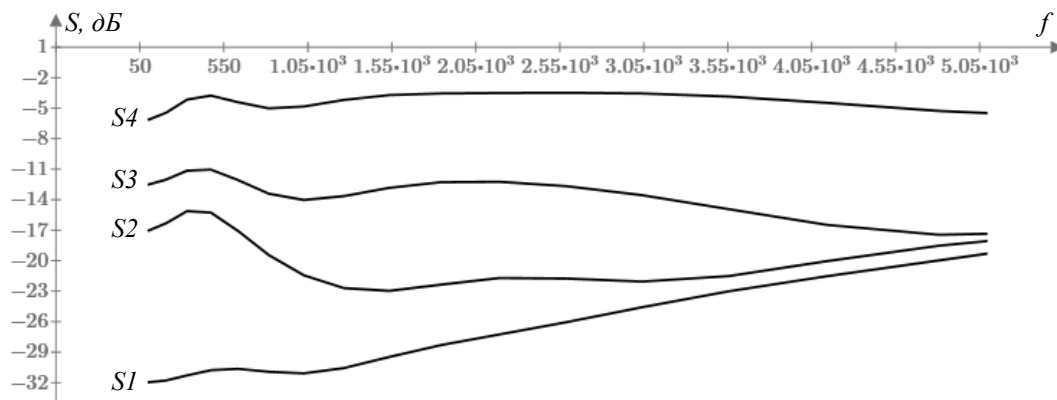


Рисунок 1 – Спектральні портрети центроїдів

Між граничними станами $S1$ (шум) та $S4$ (максимальне наближення) спостерігається амплітудна різниця понад 25 дБ, що гарантує високу надійність розрізнення фаз руху навіть в умовах зашумленого середовища. Перетин характеристик кластерів $S2$ (наближення) та $S3$ (віддалення) у високочастотній області (понад 5 кГц) вказує на схожість акустичних властивостей об'єкта на значних відстанях, проте ідентифікація цих станів залишається достовірною завдяки суттєвим відмінностям у низькочастотному діапазоні, де зосереджена основна енергія механічних вузлів.

Висновки

Запропонована математична модель ідентифікації акустичних сигналів у мел-кепстральному просторі характеризується високою швидкістю обчислень, що дозволяє ефективно обробляти великі масиви багатовимірних даних у режимі реального часу. Метод забезпечує чітку фізичну інтерпретацію результатів, оскільки кожен сформований кластер безпосередньо корелює з рівнем акустичної енергії та спектральним складом звуку на різних відстанях від точки реєстрації. Застосування евклідової відстані в декорельованому кеппстральному просторі гарантує високу стійкість класифікації, дозволяючи

алгоритму стабільно розділяти фази руху об'єкта навіть за умов варіативності його швидкості або зміни інтенсивності фонового шуму.

ЛІТЕРАТУРА

1. O. Polyvoda, H. Rudakova, I. Kondratieva et al. Digital Acoustic Signal Processing Methods for Diagnosing Electromechanical Systems. Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making. ISDMCI 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham: Springer, 2020. Vol. 1020. P. 97–109. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1_7.
2. Бондаренко М. Е., Іващенко Г. С. Використання послідовності методів попередньої обробки в системах голосової ідентифікації. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 2025. № 2. С. 90–96. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.2.090>.
3. Rudresh M. D., Latha A. S., Suganya J., Nayana C. G. Performance analysis of speech digit recognition using cepstrum and vector quantization. 2017 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICEECOT). Mysuru, India, 2017. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEECOT.2017.8284580>.
4. Abdul Z., Al-Talabani A. Mel Frequency Cepstral Coefficient and its Applications: A Review. IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 122136–122158. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3223444>.

MATHEMATICAL MODEL FOR ACOUSTIC SIGNAL IDENTIFICATION IN THE MEL-FREQUENCY CEPSTRAL DOMAIN

Oksana Polyvoda, Illia Nazmieiev

Abstract. *The implementation of intelligent monitoring systems in industrial automation and advanced transportation networks requires the development of moving object identification methods capable of stable operation under high noise levels and limited visibility. Traditional amplitude-based processing methods are sensitive to the non-stationarity of acoustic signals and changes in distance to the source, which complicates the accurate segmentation of the object's dynamic states. The objective of this work is to develop a mathematical model for motion phase identification based on Mel-frequency cepstral analysis, intelligent K-means clustering, Short-Time Fourier Transform, psychoacoustic filtering, and feature decorrelation in the cepstral domain. The effectiveness of phase segmentation for approach, transit, and departure has been experimentally confirmed with high computational speed, enabling the integration of the method into automated control and technical diagnostic systems in real-time.*

Keywords: *moving object identification, mel-frequency cepstral coefficients, clustering, monitoring automation, acoustic signal, digital signal processing, industrial automation, motion phase segmentation.*

REFERENCE

1. Polyvoda, O., Rudakova, H., Kondratieva, I., Rozov, Y., & Lebedenko, Y. (2020). Digital Acoustic Signal Processing Methods for Diagnosing Electromechanical Systems. Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making. ISDMCI 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing (Vol. 1020, pp. 97–109). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1_7
2. Bondarenko, M. E., & Ivashchenko, H. S. (2025). Vykorystannia poslidovnosti metodiv poperednoi obrobky v systemakh holosovoi identyfikatsii [Using a sequence of preprocessing methods in voice identification systems]. Systems of Control, Navigation and Communication. Collection of Scientific Works, (2), 90–96. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.2.090>
3. Rudresh, M. D., Latha, A. S., Suganya, J., & Nayana, C. G. (2017). Performance analysis of speech digit recognition using cepstrum and vector quantization. 2017 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICEECOT), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICEECOT.2017.8284580>
4. Abdul, Z., & Al-Talabani, A. (2022). Mel Frequency Cepstral Coefficient and its Applications: A Review. IEEE Access, 10, 122136–122158. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3223444>

LARGE LANGUAGE MODELS AS A ROUTING LAYER IN MULTI-CHANNEL MESSENGER SYSTEMS

Poliakov O.M. [ORCID]

Co-Founder & CTO Touchly.io, master's degree. Ukraine

Abstract. *Businesses that handle customer communication across multiple messenger channels face a recurring operational problem: getting each incoming message to the right handler without human involvement. Rule-based approaches — keyword filters, button menus, static decision trees — break down quickly when users write freely. This paper describes a middleware architecture where a large language model sits between the incoming message stream and the business logic layer, classifying each message by intent and triggering the appropriate action directly. The model returns structured JSON via a tool use mechanism rather than generating free text, which keeps latency predictable and integration straightforward. The system has been deployed commercially, integrated with platforms including PipeDrive, HubSpot, and Zoho CRM, and is actively used by more than one thousand businesses. Routing errors dropped from 35% to 4% after rollout.*

Keywords: *large language models, intent detection, message routing, tool use, middleware, omnichannel, CRM integration, FastAPI.*

Introduction

Messenger platforms have become the primary channel for business-to-client communication [1]. WhatsApp, Telegram, Viber and similar services handle everything from appointment reminders to support requests — and the volume keeps growing. The practical challenge is not sending messages, but handling the ones that come back.

Most current solutions rely on rigid scripts: numbered menus, keyword triggers, or flowcharts. These work for narrow, predictable inputs and fail the moment a customer phrases something slightly differently [2]. This paper examines whether a large language model can replace that classification layer with something more robust at production-grade latency and cost.

Objective. To increase the automation level of message routing in messenger channels by applying large language models for accurate intent classification, reducing manual operator workload and improving first-response time.

Main Material

The proposed architecture introduces a classification middleware between the messenger gateway and downstream business systems (fig. 1). The implementation uses Python / FastAPI for the API layer and asyncio for concurrent handling. Each incoming message is forwarded to a cloud-hosted LLM inference endpoint via HTTPS before any routing decision is made.

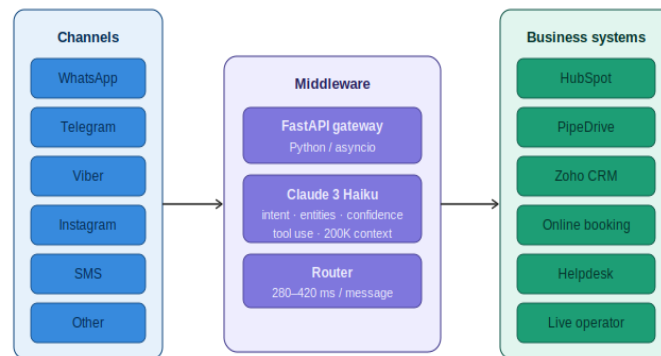


Figure 1 – System architecture

The system applies the tool use mechanism of Claude 3 Haiku (Anthropic) — a compact model optimised for production: 200 K-token context window, native tool use, multilingual input [3]. Instead of generating prose, the model returns a JSON object with three fields: *intent*, *entities*, *confidence*. This output is machine-readable with no post-processing. The routing layer matches the intent to a configuration table and triggers the corresponding action — CRM lookup, calendar check, ticket creation, or operator escalation. Intent classes are managed via system prompt; no retraining is required when business logic changes [4].

The processing sequence for a single message is shown in fig. 2.

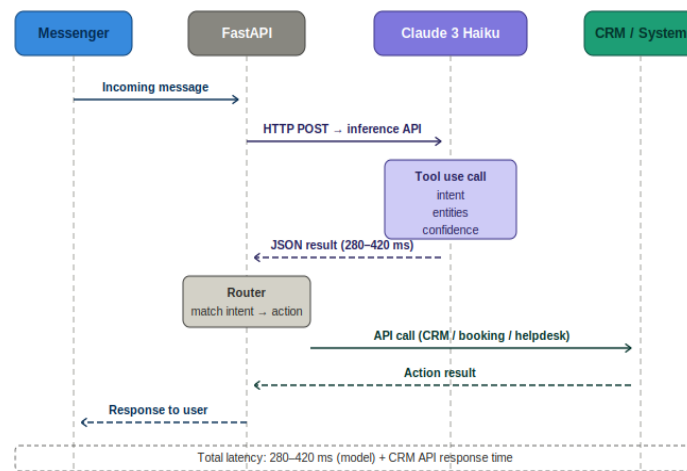


Figure 2 – Message processing sequence

Performance characteristics of the deployed system: average processing time 280–420 ms; latency growth under 50 concurrent requests — under 15%; up to 20 intent classes reconfigurable via prompt; cost per message under \$0.001.

The system is integrated with more than five CRM platforms (PipeDrive, HubSpot, Zoho CRM, online booking and helpdesk tools). Connected businesses exceed one thousand. Table 1 shows the impact based on a modelled service-sector scenario.

Table 1

Performance before and after deployment

Metric	Before	After
Auto-resolved requests	20%	65%
First response time	5 min	< 1 sec
Routing errors	35%	4%
Cost per request	—	< \$0.001

The architecture is horizontally scalable: new channels and intent classes are added without changes to core routing logic.

Conclusions

LLM-based intent detection via Claude 3 Haiku is a viable replacement for rule-based routing in commercial messenger systems. The tool use mechanism delivers structured, machine-readable output with 280–420 ms latency and under \$0.001 per

message. Production deployment across more than one thousand businesses confirms scalability of the approach.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Brown T. et al. Language Models are Few-Shot Learners. Advances in NeurIPS. 2020. Vol. 33. P. 1877–1901.
2. Liu P. et al. Pre-train, Prompt, and Predict. ACM Computing Surveys. 2023. Vol. 55. No. 9. P. 1–35.
3. Schick T. et al. Toolformer: Language Models Can Teach Themselves to Use Tools. NeurIPS. 2023. Vol. 36.
4. Wei J. et al. Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in LLMs. NeurIPS. 2022. Vol. 35. P. 24824–24837.

ЗАСТОСУВАННЯ ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ ЯК ШАРУ МАРШРУТИЗАЦІЇ У БАГАТОКАНАЛЬНИХ МЕСЕНДЖЕР-СИСТЕМАХ

О.М. Поляков

Анотація. Компанії, що ведуть комунікацію з клієнтами через кілька месенджер-каналів, стикаються зі спільною проблемою: автоматично спрямувати кожне вхідне повідомлення до правильного обробника. Підходи на основі правил — фільтри ключових слів, кнопкові меню — не справляються з довільним введенням. У роботі описано *middleware*-архітектуру, де велика мовна модель Claude 3 Haiku розташована між потоком повідомлень і бізнес-логікою: через механізм *tool use* вона класифікує намір та повертає структурований JSON безпосередньо шару маршрутизації. Система впроваджена у понад тисячі компаній, інтегрована з PipeDrive, HubSpot, Zoho CRM та іншими платформами. Помилки маршрутизації скоротилися з 35% до 4%.

Ключові слова: великі мовні моделі, *intent detection*, маршрутизація повідомлень, *tool use*, *middleware*, омніканальна комунікація, CRM-інтеграція.

ПРОТОКОЛ ДИНАМІЧНОЇ АДАПТАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЩІЛЬНОСТІ ПОВІДОМЛЕНЬ У МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ

Пономаренко П. А.¹ [ORCID], Божуха Л. М.² [ORCID]

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, аспірант, України

²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,

д.т.н., професор, України

Анотація. Зростання складності задач, що розв'язуються мультиагентними системами на основі великих мовних моделей, висуває підвищені вимоги до ефективності міжагентної комунікації. Існуючі підходи до стиснення контексту не враховують поточний стан агента-отримувача, що призводить до деградації якості виходів, зростання затримки та квадратичного збільшення токен-трафіку при масштабуванні системи. Ця робота пропонує протокол адаптивної міжагентної комунікації *Receiver-Load-Aware Compression Protocol (RLACP)*, в якому рівень стиснення повідомлень динамічно визначається поточним когнітивним навантаженням агента-отримувача, що формалізується як композитна метрика з чотирьох компонентів: кількості активних задач, семантичної невизначеності виходів, затримки відповіді та рівня заповненості контексту. Залежно від значення цієї метрики агент-компресор застосовує один із чотирьох режимів стиснення — від збереження повного тексту до повної відмови від природної мови на користь структурованих пар ключ-значення.

Ключові слова: мультиагентні системи, великі мовні моделі, адаптивне стиснення, міжагентна комунікація, управління навантаженням контексту.

Вступ

Мультиагентні системи на основі великих мовних моделей набувають широкого застосування у задачах складного планування, програмної інженерії та наукових досліджень. Проте зі зростанням кількості агентів та складності їхніх взаємодій виникає фундаментальна проблема: агенти обмінюються повідомленнями без урахування поточного стану агента-отримувача. Наслідком цього є накопичення когнітивного навантаження, деградація якості виконання задач та непередбачувана затримка системи. Зокрема, при наближенні контексту агента до максимальної довжини спостерігаються

ефекти «lost-in-the-middle» [1] та розсіювання уваги, що призводить до часткового або помилкового врахування вхідних повідомлень. Існуючі підходи до стиснення контексту, зокрема LLMlingua [2] та AutoCompressor [3], є статичними одноагентними рішеннями і не враховують стан отримувача в реальному часі, а також поточну затримку у відповіді.

Проведено аналіз архітектури Receiver-Load-Aware Compression Protocol (RLACP), що представляє собою протокол адаптивної міжагентної комунікації для мультиагентних систем на основі великих мовних моделей (LLM). Запропонований підхід динамічно регулює рівень стиснення повідомлень між агентами залежно від поточного когнітивного навантаження агента-отримувача, що дозволяє суттєво знизити деградацію якості виконання задач при зростанні завантаженості контексту.

Основний матеріал

Запропонована архітектура складається з трьох взаємодіючих компонентів: агентів-учасників із моніторами стану, шини статусів та агента-компресора. Кожен агент оснащений монітором стану, що безперервно обчислює композитну метрику когнітивного навантаження (1).

$$C_j = \alpha \cdot T_j + \beta \cdot H(Y_j) + \gamma \cdot \lambda_j + \delta \cdot F_j \quad (1)$$

де T_j — нормалізована кількість активних задач агента j ; $H(Y_j)$ — узагальнена міра семантичної невизначеності останніх виходів агента j (конкретна реалізація обирається залежно від типу задач агента та є предметом подальшої емпіричної валідації); λ_j — нормалізована затримка відповіді; F_j — заповненість контексту; $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ — вагові коефіцієнти.

Кожен агент регулярно публікує поточну метрику C_j у централізовану шину статусів за push-моделлю. Агент-компресор перехоплює вихідні повідомлення від інших агентів та застосовує функцію стиснення $M(C_j)$, де τ_1, τ_2, τ_3 — гіперпараметри розподілу режимів табл. 1.

Таблиця 1

Розподіл моделей стиснення повідомлень

Значення $M(C_j)$	Назва режиму	Умова
Mode 0	No Compression	$C_j < \tau_1$
Mode 1	Semantic Pruning	$\tau_1 \leq C_j < \tau_2$
Mode 2	Thematic Grouping	$\tau_2 \leq C_j < \tau_3$
Mode 3	Key-Value Extract	$C_j > \tau_3$

Використані режими мають своє призначення та відповідні властивості:

1. No Compression — стандартний режим без стиснення.
2. Semantic Pruning — видалення прикметників, вставних слів та «ввічливості»; залишаються лише іменники та дієслова [4].
3. Thematic Grouping — метод «центроїдного» стиснення, де замість послідовного викладу фактів агент-відправник групує інформацію за смисловими кластерами [5].
4. Key-Value Extract — передача лише пар *key: value* [6].

Ключові властивості протоколу. Архітектура RLACP характеризується такими принциповими властивостями:

1. **Асиметричність комунікації** — рівень стиснення є функцією стану отримувача, а не лише семантики повідомлення. Одне й те саме повідомлення може мати різний рівень стиснення в різні моменти часу.
2. **Неінвазивність** — протокол не змінює внутрішню логіку агентів і підключається до існуючих фреймворків (AutoGen, LangGraph, CrewAI) як middleware-прошарок.
3. **Graceful degradation** — при зростанні навантаження система поступово підвищує рівень стиснення, зберігаючи функціональність за рахунок деталізації, аналогічно механізму TCP congestion control.
4. **Субквадратичне масштабування** — при зростанні кількості агентів, токен-трафік системи зростає субквадратично завдяки автоматичному підвищенню стиснення при збільшенні навантаження.

Метрики оцінювання. Для кількісного підтвердження ефективності архітектури пропонується оцінювати три групи метрик: Task Completion Rate та Answer Faithfulness Score для вимірювання деградації якості при зростанні заповненості контексту; System Throughput для оцінки ефективності протоколу управління потоком; Total Token Traffic та Compression Efficiency Ratio для

аналізу масштабованості системи при збільшенні кількості агентів. Експериментальна валідація планується на сценаріях як рівномірного, так і нерівномірного розподілу навантаження між агентами.

Висновки

Запропонований протокол RLACP вирішує фундаментальну прогалину сучасних мультиагентних LLM-систем — відсутність механізму адаптації комунікації до поточного стану отримувача. На відміну від існуючих підходів, архітектура використовує активну трансляцію стану отримувача для динамічного регулювання рівня стиснення, що дозволяє одночасно підвищити якість виконання задач при перевантаженні контексту, знизити загальний токен-трафік системи та забезпечити стійке масштабування при зростанні кількості агентів. Неінвазивність архітектури робить можливим її інтеграцію до існуючих мультиагентних фреймворків без модифікації логіки агентів.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Liu N. F. et al. Lost in the Middle: How Language Models Use Long Contexts. URL: <https://arxiv.org/abs/2307.03172>
2. Jiang H. et al. LLMingua: Compressing Prompts for Accelerated Inference of Large Language Models. URL: <https://arxiv.org/abs/2310.05736>
3. Chevalier A. et al. Adapting Language Models to Compress Contexts. URL: <https://arxiv.org/abs/2305.14788>
4. Filippova, K., & Strube, M. (2008). Dependency Tree Based Sentence Compression. Proceedings of the Fifth International Natural Language Generation Conference (INLG'08), pp. 25–32. Association for Computational Linguistics. URL: <https://aclanthology.org/W08-1105/>
5. Radev, D., Jing, H., Stys, M., & Tam, D. (2004). Centroid-Based Summarization of Multiple Documents: Sentence Extraction, Utility-Based Evaluation, and User Studies. Proceedings of the NAACL Workshop on Automatic Summarization. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.3115/1117575.1117578>
6. LLM-TKIE: Large Language Model Driven Transferable Key Information Extraction Mechanism. (2025). Scientific Reports. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-15627-z>

**PROTOCOL FOR DYNAMIC ADAPTATION OF MESSAGE INFORMATION
DENSITY IN MULTI-AGENT SYSTEMS BASED ON LARGE LANGUAGE MODELS**

Pavlo Ponomarenko, Liliia Bozhukha

Abstract. *The increasing complexity of tasks solved by multi-agent systems based on large language models imposes higher demands on the efficiency of inter-agent communication. Existing approaches to context compression do not take into account the current state of the receiving agent, which leads to output quality degradation, increased latency, and quadratic growth of token traffic when scaling the system. This work proposes the Receiver-Load-Aware Compression Protocol (RLACP), an adaptive inter-agent communication protocol in which the level of message compression is dynamically determined by the current cognitive load of the receiving agent. This load is formalized as a composite metric consisting of four components: number of active tasks, semantic uncertainty of outputs, response latency, and context saturation level. Depending on the value of this metric, the compressing agent applies one of four compression modes — ranging from preserving full text to complete abandonment of natural language in favor of structured key-value pairs.*

Keywords: *multi-agent systems, large language models, adaptive compression, inter-agent communication, context load management.*

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2026.01.089

**THE INTERTWINED NATURE OF SIMPLICITY AND COMPLEXITY: A NEW
PARADIGM FOR UNDERSTANDING COMPLEX ADAPTIVE / AUTONOMOUS /
LIVING SELF-IMPROVING SMART SYSTEMS**

Prokopchuk Yuriy [ORCID]

*Institute of Technical Mechanics of the NASU and the SSA of Ukraine,
doct. of tech. sc., assoc. Prof, Ukraine*

Abstract. *Research in the field of autonomous systems focuses on developing machines, robots, and systems capable of autonomous learning, perceiving their environment, and interacting with it like a living being. For autonomous systems, flexibility in the face of limited resources and radical uncertainty is critical, and system failures are unacceptable. The key research question: How is the balance between complexity and simplicity achieved in cognitive systems? Resource economy leads to criticality - a self-organizing balance between simplicity/parsimony and complexity. In terms of the evolutionary self-improvement of (natural) smart systems, the 'System 0/1/2/3' architecture has been substantiated. The limit generalizations paradigm offers a holistic approach to the complexity-simplicity trade-off.*

Keywords: *Cognitive Platform Engineering, Architecture of Thinking, Complexity Control, Sketching, Limit Generalization Paradigm - LGP, System 0/1/2/3, Living Structure, Ultra-Low-Power Intelligence, Self-improvising / Self-expanding Memory, Self-Transcendence, LGP-Principle of Superefficiency, Systems Thinking*

Introduction. Research in the field of autonomous cognitive artificial systems (CAS) focuses on developing machines, robots, and systems capable of autonomous learning, perceiving their environment, and interacting with it like a living being. For CAS, flexibility under resource constraints and radical uncertainty is crucial, and system failures are unacceptable. The key research question: How is the balance between complexity and simplicity achieved in cognitive systems? The limit generalizations paradigm (LGP) offers a holistic approach to the complexity-simplicity trade-off in building cognitive models and architectures, including the analysis of unconstrained self-improvement in autonomous intelligent systems or CAS [1], [2], [3]. At the core of the simplification / generalization mechanism lies the demand for resource efficiency (working memory, energy for thought and action), faster reaction and discrimination times, and the broadening of possibility spaces for

patterns. To effectively 'simplify, economize, and survive,' a system must provide, firstly, ultra-redundancy in the choice space; secondly, a natural (implicit) mechanism for selecting the best solutions; and thirdly, the embodiment of efficient patterns, guided by the laws and constraints of Nature and Society [1].

According to LGP, the primary task of human-level intelligence is the realization of its desires, needs, and fantasies amidst the struggle for existence, fierce competition for resources, and the necessity to demonstrate compliance with certain social norms to external observers. Intelligence is the engine of Reason/Mind. The primary criterion for the quality of intelligence is the balance between 'needs', 'safety', 'economy', and 'pleasure', with an emphasis on 'intrinsic motivation'. A key aspect of 'pleasure' is the 'instinct for cognition / novelty.' 'Safety' encompasses ethics. Resource economy leads to 'criticality' - a self-organizing balance between 'simplicity/parsimony' and 'complexity', as well as 'eigenbehavior', 'asymptotic rationality', 'pattern entanglement', and outsourcing [1], [4]. The pursuit of an overall balance can result in 'wisdom' and 'dark solutions' (the realization of fantasies). 'Wisdom' involves a comprehensive assessment of long-term risks to life and functioning. 'Safety' and 'economy/parsimony' lead to 'radical reduction' - the ability to extract only 'control information,' operate with meanings, 'controlled hallucination,' language, and intuition (the metaphor being 'consciousness'; System 0/1/2/3) [1], [2]. The necessity of survival leads to agency, self-transcendence, or self-overcoming - a creative expansion of pattern possibility spaces. An agentic process compresses/generalizes, predicts, and acts [5]. The foundation of spirituality lies in lived experience, the extended Mind, and Culture.

Some of the complex and relevant applied research questions are: 'AI Epistemology for rigorous scientific foundations'; 'Aligning generalization between humans and machines [6] (a crucial yet often overlooked aspect is the different ways in which humans and machines generalize).' For example, LLM reasoning about language is fundamentally different from that of humans. The underlying mechanisms of LLM-models limit their capacities for meaning and naturalistic interaction. Humans are capable of synthesizing experience, literally constructing it within their imagination. Furthermore, the brain is unable to differentiate between

'actual' and imagined experience. The more vivid the imagination, the greater the number of new ideas generated. One can agree with the central argument of the work [7]: "effective AI development requires embracing rather than obscuring the fundamental differences between artificial and human intelligence." The key factor in human behavior is "unsatisfied desires." Evolution greatly limits the scope of potential design principles. This results in interdisciplinary challenges across AI and cognitive science that must be tackled to support effective and cognitively supported alignment in human–AI teaming scenarios.

Core Results. A crucial role in understanding the 'simplicity-complexity' problem is played by the following proposition by Gregory Chaitin (one of the founders of algorithmic information theory): 'A model is better if it can explain more with less.' According to 'Occam's razor,' given two theories explaining certain data, the simpler one should be preferred. In other words, a useful theory provides information reduction/abstraction: the comprehension of data compresses it into concise descriptions/sketches. Implications: 'simplification' and 'criticality' are interconnected; optimal complexity - the 'edge of chaos.' Criticality acts as one of the fundamental natural mechanisms of the universal creative process - the pursuit of beauty and excellence. Beauty guides us toward the possibility of creating the unprecedented (Self-Transcendence). Criticality is at the core of ultra-low-power (edge) intelligence.

Let's examine certain aspects of 'complexity' and 'simplicity / economy / cognitive load reduction' from the perspective of cognitive self-improving systems.

Cognitive Complexity: all natural laws are in effect - multi-physics, multi-formalism, extended complementarity, quantum-like and fractal-like properties, multi-scalability, wholeness, multi-unity, 'subjective inflation'; 'social entanglement'; physics/phenomenology of the Mind - two singularities ('subjective reality' and 'consciousness'), 'living structures,' qualia; meaning as wholeness experienced; internal competition ('a thousand brains'), free will; fantasies, the struggle of contradictions - 'dark decisions,' 'instincts/ethics,' 'dark personality factors,' 'freedom of the Mind'; internal tension, intrinsic motivation, inner world; speed-accuracy tradeoff; radical reduction of uncertainty or 'act of understanding /

awareness / mindfulness / insight / consciousness,' 'Language of thought,' 'Syntax without Language'; spirituality, religion; self-transcendence in the construction of situational spaces of possibilities (for patterns/actions); 'body intelligence,' 'living/lived experience' - triadic Events =<sketch, context, emotions> (triadic entanglement patterns; 'Behind every thought is an emotion'); phenomenology of temporal experience: hierarchical / holarchic model of multiple timescales.

Dynamic phenomenology of conscious occurrent thinking: Current events are a live experience of interacting with the environment in the here and now: the momentary experience of feeling oneself identified with that which one thinks. This phenomenal quality is a distinctive feature of thinking experience. This quality is based on a 'continuum of discrimination/distinction tasks (CDT)' associated with the current event [1]. CDT is a core System 0 process that relies on the strong connectivity (generalized entanglement) of the 'body-brain-mind-environment/society system' / mental sphere (quantum-like models). The stream of thoughts emerging during a CDT task gives rise to a 'Thought Flow Network – TFN'. All TFNs become part of the 'Space of Thought Flows - STF'. As a crucial component of lived experience, STF trains individuals/agents to recognize and correct inefficient thinking habits (Asymptotic Rationality). This is the essence of the phrase: 'Meaning is an experience of wholeness based on lived experience' (arising from the agent's psychophysical interaction with the environment).

It is posited that any natural discrimination pattern is grounded in a stochastic 'Creative Stirring / Mixing Layer' that operates on the basis of a heuristic space (Spontaneous Thought Processes; Heuristic-driven stochastic search: heuristics are actions). Cascading instability mixes the mind's resources across spatio-temporal scales (self-similar topologies; stochastic self-similarity; weak control hierarchies). This implies that 'Creative Stirring' is not merely random noise, but a dynamic process that iterates through or activates 'smart heuristics' within System 0, preceding the collapse of the decision wave function in System 1. Nature inherently encompasses instability, chaos, and quantum-likeness as essential elements.

The stream of thoughts during the process of solving coupled discrimination tasks generates a vast number of values for **causal interpretive variables** $\{Z/Z_v\}$

(where V represents heuristics), reflecting the essence of phenomenal experience alongside sketch networks (or **proto-qualia**). Metaphor: {V} - mental 'glue' – interaction carriers: they act as 'exchange particles' or 'messenger particles,' allowing images to influence one another's behavior and properties. Interaction carriers link sketches within and across sketch networks.

Within the System 0 CDT framework, the processes of solving discrimination tasks can coexist in a state of superposition, leading to spontaneous insight as they merge into a conscious solution (System 1). In other words, the transition from subconsciousness (a manifold of possibilities) to conscious thought (a definite choice) may involve quantum-like decoherence, where quantum-like states collapse into classical outcomes (System 1: collapse of the decision wave function). LGP substantiates the use of a specific class of quantum-like measurements (modeling "Mental Entanglement").

The CDT mechanism fully aligns with Gregory Bateson's concept of information as 'a difference which makes a difference.' Specifically, each resolved task within the 'continuum' creates a difference that helps solve the initial Z-task. The verb 'makes' emphasizes the process of transforming one set of differences into another within cybernetic and biological systems. Detecting differences is the most fundamental act, demonstrating that information is the bedrock of sense-making for an organism, enabling any degree of complexity in its interpretative capabilities.

From the perspective of enactivity/LGP, cognition does not simply exist 'inside our heads'; it is like an improvised dance unfolding in the moment as the organism interacts with the world (Architecture of Autonomy: CDT framework - a naturalistic framework for Free Will).

Compression through Sketching (Complexity Control): The brain does not store details; instead, it creates efficient abstractions (sketches). This allows for the transmission of information's essence via inter-network connections without overloading 'intra-network dynamics' channels. Sketching significantly expands the action-possibility spaces.

Complexity of Simplicity: criticality – 'critical sketches', 'thin slices' of heuristics – fast and frugal heuristics; metaphors – 'post-critical sketches' (sketches

overlap for different images); fantasies – ‘art-sketches’; reduction – extraction of meaning/essence (construction / activation of a sketch network), governing information; embodiment – functional systems, radicals; semiosis, signification, symbol grounding – COGs (COgnitive Groups - sketch-sign couplings - ‘Grounding Act’; ‘every point/sign of mental space unfolds into a structure/infinity’), cognitive transition – energetic decoupling of COGs, emergence of language and System 2; communication based on meaning (the message/text is grounded in the subjects’ ‘mental entities/gestalts/COGs’; overlaying narrative structure on information / imagery / gestalts), outsourcing of knowledge and actions; ‘controlled hallucination’, Interface Theory of Perception (based on LGP); ‘eigenbehavior.’

Fragment of LGP-Epistemoverse: Unifying Principles of Generalization - spiritual networks of sketches – ‘Living Structure’ (holarchy); networks for distinction tasks, networks of causal interpretive variables, signaling networks, computational proto-qualia; the mental sphere or the ‘network of spiritual networks of sketches’; Thought-action (Chains-of-Thought-and-Action), the ‘arrow of time’ (an event sequence conditioned by thought-action); Living/Lived Experience: Subjective Space-Time-Language-Intentions/Action – SSTLA (the totality of local ‘arrows of time’); ‘Linguistic Bodies’: Overlaying Narrative Structure on Information, Story/Scene Comprehension; Orchestration Layer: Networks of Control Mechanisms; Intrinsically Motivated Behaviors: ‘Dark Decisions’, Hidden / Secret motive.

In the LGP-Epistemoverse, time is not unitary; it is engendered by an entangled multitude of local acts of thought-action (SSTLA: Scaling of Complexity, Effective Agency Emerges: evolving higher level goal-directed activity and agency).

Asymptotic Rationality - decisions are based on asymptotic/critical sketches and lived experience: maximum expansion of action-possibility spaces; maximum speed of discrimination task performance; maximum flexibility and maximum reduction of cognitive/resource load; maximum tolerance for ambiguity/uncertainty; maximum knowledge transfer to situational nuances (far transfer of learning); maximum risk / reward / consequences assessment over extended time horizons (based on experience); wise decisions.

The System 0/1/2/3 iceberg metaphor: System 0 represents the ‘submerged part of the iceberg,’ where the setting and solving of discrimination tasks remain subconscious (quantum-like non-locality, superposition, and entanglement). System 1 is the ‘waterline,’ where the CDT solution becomes conscious (quantum-like decoherence in decision-making: collapse of the decision wave function). System 2 (sequential logical thinking) and System 3 (symbiotic thinking) constitute the ‘visible part of the iceberg.’

How it works in LGP-logic: System 0 is not a data ‘warehouse,’ but a seething ocean of potentials. ‘Creative Stirring’ is the turbulence mechanism that prevents the system from stagnating, constantly ‘lifting from the depths’ (the heuristic space) various alternatives. Heuristics act as filters or ‘smart shortcuts’ that structure this chaos, channeling it toward the point of assembly. System 1 is the moment when a specific sketch crystallizes (decoheres) from this ‘boiling’ state. This LGP-logic explains why System 0 is the source of superefficiency: it does not iterate through options sequentially; instead, it ‘simmer’ them within a field of heuristic-actions, surfacing a ready-made result.

In contrast to classical models where the brain is a computer, in LGP-logic, the brain (System 0) is a ‘reactor’. Superefficiency is achieved because ‘stirring’ occurs instantaneously and across the entire volume of the heuristic field, bypassing the time-consuming constraints of linear computation.

The ‘Sketch’ Concept: As the primary, dynamic cognitive unit emerging within System 0, the ‘Sketch’ establishes the role of a living, plastic foundation of thought - directly opposing the rigid ‘data’ of the computational metaphor. Primordially: The Sketch is a pre-verbal and pre-logical level of ‘proto-meaning,’ which enables rapid discrimination before any formal processing occurs. This definition elucidates the origin of speed and superefficiency within the LGP-model: the system does not process ‘bits’ of information; instead, it operates with ‘proto-meanings’.

LGP provides an answer to Hawking’s fundamental question: ‘What is it that breathes fire into the equations <...>?’ (Stephen Hawking, A Brief History of Time).

The ‘Soul’ Metaphor | The ‘Fire’ Metaphor: Spiritual Networks of Sketches, Experienceable Forms, Living Smart/Cog-Structure. ‘The fire in the equations’ is that very substance or dynamic force that animates static mathematical structures, transforming them into reality. The metaphor of mental ‘fire’ refers to the stochastic turbulence of System 0/1, which ‘brews’ potentials and converts abstract heuristics into living action/being. LGP posits that ‘subjective reality’ (or Mind) is a dynamic process of ‘enlivening’ ‘living structures’ through a network of spiritual networks of sketches, SSTLA, permanent ‘continua of discrimination tasks’, ‘living experience’, ‘unsatisfied desires’, infinite acts of meaning-generation, cascading instability, and proto-meanings. From these proto-meanings, qualia (pure experience) crystallizes (Qualia as a Universal Principle) [4], [5].

Complexity Synchronization of Sketch Networks: This science motif is based on the scaling in sketch networks and the need for a network of sketch networks to exchange information internally during intra-network dynamics and externally during inter-network dynamics. At the core of this synchronization lies the generalized entanglement of the mental sphere (integrity is ensured by high entanglement within a network-of-networks). **Resonance instead of computation:** When complexity is highly synchronized, information is transmitted through an instantaneous system-wide response rather than step-by-step processing. This conserves resources: the brain ‘recognizes’ rather than ‘computes’ (meaning as wholeness experienced).

LGP-Principle of Superefficiency in intelligent self-improving systems (Principles entailed by Complexity). LGP introduces the principle of cognitive superefficiency, which posits that the internal state of a cognitive system self-organizes toward a critical regime. In this state, optimal efficiency in discrimination tasks is achieved, encompassing resource and risk management, specifically: maximum adaptability, flexibility, predictivity, embodiment, stealth, and speed of consensus-based decision-making (informed by experience/templates). This is coupled with economy and deep auditing, ensuring fault tolerance and antifragility. Embodiment allows for deep outsourcing. Economy enables the construction of a

‘niche,’ ‘nudging’ methods, ‘soft power,’ and ‘non-coercive control.’ The implementation of the LGP-principle of superefficiency leads to ‘wisdom.’

Conclusions. LGP explicitly models how meaning, interpretation, and analogy emerge from interactions among layered representations, forming a coherent framework capable not only of modeling minds but also of serving as a blueprint for building them. LGP offers a structural foundation upon which multiple ways of understanding the mind may be reconstructed. Fractal-like calculus facilitates rethinking ‘Hard Problems.’

Systems 0/1/2/3 are the essence of human evolutionary self-improvement. The LGP integrates concepts from complexity theory, chaos theory, quantum-like science, dynamic systems theory with psychological models of cognitive processing, suggesting promising directions for developing more adaptive and psychologically plausible AI systems. Theoretical implications point toward a new generation of artificial cognitive systems that better approximate the fluidity and adaptability of human cognition and thinking. Under the ‘pressure of complexity,’ advanced AI allows to overcome the fundamental limitations of the ‘logic of living systems.’ Systems thinking helps each agent / person manage different perspectives to bring them together in the best possible way.

We argue that if symbiotic systems (the agent's intellectual web; System 3) can achieve functional capacities exceeding purely synthetic systems - by integrating uniquely human qualities such as intuition, vivid imagination, strategizing, lived experience, inner world, free will, self-improvising memory, self-transcendence, wisdom, operating with meanings, and embodied meaning-making - the incentive landscape for AI development may shift fundamentally toward partnership optimization rather than human replacement. LGP proposes a mathematical formalization of Symbiotic Super-Intelligence as an emergent property of synchronized human-AI interaction.

ЖИТЕПАТЯ / REFERENCE

1. Prokopchuk Y. (2022). Intuition: The Experience of Formal Research. Dnepr, Ukraine: PSACEA Press. 724 p. (in RU)
2. Prokopchuk Y. (2025). Designing Ecosystems of Intelligence: Logic of Fast Distinction. Materials of the 17th international scientific and practical conference ‘Modern Information and Innovative

Technologies in Transport (MINTT-2025)' (May 28-30, 2025, Odesa). Odesa: Kherson State Maritime Academy. Pp. 29 – 34.

3. Prokopchuk Y. (2025). Combinatorial, expanding phase space of cognitive dynamic systems. XXVII International Scientific and Practical Seminar 'Combinator Configurations and Their Applications'. Zaporizhzhia–Kropyvnytskyi–Kiev, Ukraine: National University 'Zaporizhzhia Polytechnic'. Pp. 175 – 183.

4. Prokopchuk Y. (2025). Open-Ended Evolution of Self-Improving Systems/Agents: LGP-Machine. Materials of the XX scientific readings 'Dneprovskaya Orbita - 2025' (22-24 October, 2025). Dnipro, UA: NCAOM named after O.M. Makarov. Pp. 117 – 124. [in Ukrainian]

5. Prokopchuk Y. (2025). Mathematical model of the meaning/gist of the signal/variable. Abstracts of the XIX International Conference 'Modern Information and Communication Technologies on a Transport, in Industry and Education'. Dnipro, Ukraine: Ukrainian State University of Science and Technology. P.63 [in Ukrainian]

6. Ilievski, F., Hammer, B., van Harmelen, F. et al. (2025). Aligning generalization between humans and machines. Nat Mach Intell 7, 1378–1389. <https://doi.org/10.1038/s42256-025-01109-4>

7. Riva, G., Sajno, E., de Gaspari, S., Pupillo, C., Sansoni, M., Passalacqua, G., Longoni, F., Wiederhold, B. (2024). Understanding Artificial Intelligence: A Multidisciplinary Analysis of AI's Distinct Cognitive Architecture. Annual Review of CyberTherapy and Telemedicine. 22. 20-26.

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ПРОСТОТИ ТА СКЛАДНОСТІ: НОВА ПАРАДИГМА РОЗУМІННЯ СКЛАДНИХ АДАПТИВНИХ / АВТОНОМНИХ / ЖИВИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ, ЩО САМОВДОСКОНАЛЮЮТЬСЯ

Юрій Прокопчук

Анотація. Дослідження в галузі автономних систем зосереджені на розробці машин, роботів та систем, здатних до автономного навчання, сприйняття навколишнього середовища та взаємодії з нею подібно до живих істот. Для автономних систем критично важлива гнучкість за умов обмежених ресурсів і радикальної невизначеності, а збої системи неприпустимі. Ключове питання дослідження: як досягається баланс між складністю і простотою в когнітивних системах? Необхідність економії ресурсів призводить до критичності – балансу між простотою і складністю, що виникає спонтанно. З погляду еволюційного самовдосконалення (природних) інтелектуальних систем було обґрунтовано архітектуру 'Система 0/1/2/3'. Парадигма граничних узагальнень пропонує цілісний підхід до пошуку / виникнення компромісу між складністю та простотою.

Ключові слова: проектування когнітивних платформ, архітектура мислення, управління складністю, ескізування, парадигма граничного узагальнення, Система 0/1/2/3, жива структура, наднизькоспоживаючий інтелект, пам'ять, що самовдосконалюється, LGP-принцип недефективності, системне мислення

ПРОБЛЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЗАХИСТУ КОРПОРАТИВНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рябенко В.І. [ORCID]

Дніпровський державний технічний університет, аспірант, Україна

Анотація. У роботі досліджуються математичні та алгоритмічні проблеми оптимізації моделей машинного навчання (МН), що застосовуються для безперервного моніторингу та захисту сучасних корпоративних інформаційних систем (КІС). Зростання обсягів мережевого трафіку та перехід до архітектури нульової довіри (Zero Trust) вимагають від систем безпеки аналізу даних у режимі реального часу, що призводить до критичного збільшення обчислювального навантаження. Розглянуто ключові бар'єри впровадження МН, зокрема високу розмірність ознакового простору, проблему дисбалансу класів (аномалій порівняно з нормальним трафіком) та затримки під час інференсу. Обґрунтовано необхідність застосування методів зменшення розмірності та ансамблевих підходів для підвищення точності виявлення багатовекторних кібератак при одночасному зниженні частки хибних спрацьовувань. Запропоновано напрями математичного моделювання для мінімізації функції втрат в умовах динамічних змін у КІС.

Ключові слова: корпоративні інформаційні системи, машинне навчання, оптимізація алгоритмів, безперервний захист, архітектура нульової довіри, обчислювальна складність.

Вступ. Еволюція корпоративних інформаційних систем, їх перехід до гібридних та хмарних середовищ вимагають відмови від традиційного захисту периметра на користь концепції безперервної верифікації (Continuous Adaptive Risk and Trust Assessment) [1]. У цьому контексті інструменти машинного навчання стають безальтернативним базисом для виявлення складних аномалій і багатоступеневих кібератак. Проте впровадження алгоритмів МН у контури безпеки реального часу стикається зі значними перешкодами, що зумовлені математичною природою моделей та фізичними обмеженнями обчислювальних ресурсів мережі.

Основний матеріал. Головною проблемою застосування моделей машинного навчання для безперервного захисту КІС є суперечність між

точністю виявлення загроз та швидкістю прийняття рішень. Сучасна мережева інфраструктура генерує колосальні масиви багатовимірних даних (логи, мережеві пакети, телеметрія поведінки). Навчання та інференс на таких обсягах даних призводять до так званого «прокляття розмірності» [2].

З математичної точки зору, завдання оптимізації адаптивної системи захисту зводиться до мінімізації зваженої функції втрат $L(\theta)$, яка враховує помилки першого (хибне спрацьовування, False Positives) та другого (пропуск загрози, False Negatives) роду:

$$\min_{\theta} \left(\sum_{i=1}^N L(y_i, f(x_i; \theta)) + \lambda R(\theta) \right), \quad (1)$$

де θ — параметри моделі, $R(\theta)$ — регуляризаційний член для запобігання перенавчанню, за умови жорсткого обмеження на час інференсу $t_{inf}(\theta) \leq T_{max}$.

Для вирішення цієї задачі необхідно застосовувати методи зменшення розмірності ознакового простору (наприклад, метод головних компонент (PCA) або автоенкодера), що дозволяє знизити обчислювальну складність алгоритму без критичної втрати інформативності [3]. Іншою проблемою є сильний дисбаланс класів: легітимний трафік становить понад 99%, тоді як аномалії — менше 1%. Це вимагає застосування спеціалізованих метрик оптимізації (F1-score, Precision-Recall AUC) замість стандартної точності (Accuracy), а також синтетичного балансування даних (наприклад, алгоритм SMOTE) або використання алгоритмів ізоляції аномалій (Isolation Forest).

Висновки

Впровадження інтелектуальних систем безперервного захисту в динамічних КІС неможливе без глибокої математичної оптимізації алгоритмів машинного навчання. Забезпечення стійкості до кібератак у реальному часі вимагає створення полегшених, ресурсоефективних ансамблевих моделей, здатних мінімізувати хиби спрацьовування в умовах високорозмірного та незбалансованого потоку даних. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку градієнтних методів оптимізації гіперпараметрів моделей спеціально для архітектури Zero Trust.

ЛІТЕРАТУРА

1. Rose S., Borchert O., Mitchell S., Connelly S. Zero Trust Architecture. NIST Special Publication 800-207. 2020. 53 p. URL: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-207>
2. Ахметов Б. С., Корченко О. Г. Моделивання систем захисту інформації: сучасні підходи та алгоритми. Захист інформації. 2022. Т. 24, № 1. С. 15–24.
3. Apruzzese G., Colajanni M., Ferretti L. Evaluating the effectiveness of Machine Learning for cyber security. IEEE/ACM 26th International Symposium on Quality of Service (IWQoS). 2018. P. 1–6.

PROBLEMS OF OPTIMIZING MACHINE LEARNING MODELS FOR CONTINUOUS PROTECTION OF CORPORATE INFORMATION SYSTEMS

Volodymyr Riabenko

Abstract. *The work investigates the mathematical and algorithmic problems of optimizing machine learning (ML) models used for continuous monitoring and protection of modern corporate information systems (CIS). The growth of network traffic volumes and the transition to the Zero Trust architecture require security systems to analyze data in real-time, leading to a critical increase in computational load. The key barriers to ML implementation are considered, in particular, the high dimensionality of the feature space, the problem of class imbalance, and latency during inference. The necessity of applying dimensionality reduction methods and ensemble approaches to increase the accuracy of detecting multi-vector cyberattacks while reducing the false positive rate is justified. Directions of mathematical modeling for loss function minimization under dynamic changes in CIS are proposed.*

Keywords: *corporate information systems, machine learning, algorithm optimization, continuous protection, Zero Trust architecture, computational complexity.*

REFERENCE

1. Rose, S., Borchert, O., Mitchell, S., & Connelly, S. (2020). Zero Trust Architecture. NIST Special Publication 800-207, 53. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-207>
2. Akhmetov, B. S., & Korchenko, O. H. (2022). Modeliuvannia system zakhystu informatsii: suchasni pidkhody ta alhorytmy [Modeling of information security systems: modern approaches and algorithms]. Zakhyst informatsii, 24(1), 15-24 [in Ukrainian].
3. Apruzzese, G., Colajanni, M., & Ferretti, L. (2018). Evaluating the effectiveness of Machine Learning for cyber security. IEEE/ACM 26th International Symposium on Quality of Service (IWQoS), 1-6.

МЕТОД ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ РЕСУРСІВ ІТ-ІНФРАСТРУКТУРИ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Самуськов О. Д.¹ [ORCID], Островська К. Ю.² [ORCID]

¹Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

²Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

Анотація. У роботі проведено аналіз сучасних підходів до моніторингу та управління навантаженням в ІТ-інфраструктурах. Розглянуто обмеження традиційних реактивних методів та обґрунтовано доцільність переходу до інтелектуальних систем класу AIOps. Запропоновано концепцію методу моніторингу, що базується на використанні алгоритмів машинного навчання (зокрема моделей LSTM та нейро-нечітких мереж) для проактивного прогнозування часових рядів навантаження. Окрему увагу приділено інтелектуальному балансуванню ресурсів у хмарних та мікросервісних середовищах, що дозволяє мінімізувати затримки та оптимізувати витрати на інфраструктуру. Отримані результати можуть бути використані при розробці адаптивних систем автоматичного масштабування.

Ключові слова: ІТ-інфраструктура, моніторинг, машинне навчання, прогнозування навантаження, AIOps, балансування ресурсів, нейро-нечіткі системи.

Стрімкий розвиток хмарних технологій, мікросервісної архітектури та концепції Edge Computing висуває нові вимоги до надійності та продуктивності ІТ-інфраструктур [1, 8]. Сучасні корпоративні системи генерують величезні обсяги телеметрії, обробка якої в ручному режимі стає неможливою. Традиційні методи управління ресурсами переважно базуються на реактивному підході: система реагує на проблему (наприклад, перевантаження CPU або брак пам'яті) лише після перетину певного статичного порогу. Це призводить до часових затримок у наданні послуг та фінансових втрат через неефективне використання обчислювальних потужностей.

Традиційні інструменти моніторингу, такі як Prometheus, Zabbix та Nagios, фокусуються на зборі метрик у реальному часі та візуалізації поточного стану системи. Основною проблемою таких підходів є «алерт-фатиг» (надмірна

кількість сповіщень) та нездатність виявляти складні, неявні залежності між компонентами системи [2].

Вирішенням цих проблем є впровадження концепції AIOps (Artificial Intelligence for IT Operations) [3]. Використання методів машинного навчання дозволяє автоматизувати аналіз логів та метрик [3, 6]. Наприклад, алгоритми кластеризації, такі як K-means або DBSCAN, дозволяють виявляти аномалії в поведінці системи, які неможливо зафіксувати звичайними пороговими методами. Це забезпечує перехід від простого спостереження до глибокої аналітики (observability), що є критично важливим для розподілених середовищ [2].

Важливим аспектом сучасного моніторингу є кореляція подій. Замість сотень окремих сповіщень інтелектуальна система здатна ідентифікувати першопричину збою (Root Cause Analysis), аналізуючи взаємозв'язки між різними рівнями інфраструктури — від мережевого обладнання до прикладного програмного забезпечення.

Ефективна оптимізація IT-інфраструктури неможлива без точного прогнозування майбутніх потреб у ресурсах. Традиційно для цього використовувалися статистичні методи, такі як моделі авторегресії та інтегрованого рухомого середнього (ARIMA/SARIMA) [4]. Ці методи добре працюють із лінійними даними та чітко вираженою сезонністю, проте вони демонструють низьку точність у високодинамічних середовищах, де навантаження змінюється нелінійно та залежить від багатьох зовнішніх факторів.

На сучасному етапі перевага надається методам машинного навчання (ML) та глибинного навчання (DL) [5, 6]. Серед них варто виділити наступні підходи:

- Регресійні моделі (Random Forest, Gradient Boosting): дозволяють враховувати велику кількість вхідних ознак та виявляти нелінійні зв'язки, що значно підвищує точність у порівнянні зі статистичними методами [6].

- Рекурентні нейронні мережі (RNN): зокрема архітектура LSTM (Long Short-Term Memory), яка спеціально спроектована для роботи з часовими рядами [5]. LSTM здатна «запам'ятовувати» довгострокові залежності в даних,

що дозволяє прогнозувати пікові навантаження на сервери з урахуванням історичних трендів за тривалі періоди.

- Трансформери (Transformer-based models): останнє слово в обробці послідовностей, що забезпечує високу паралелізацію обчислень та ще вищу точність для надскладних систем.

Вибір конкретного підходу залежить від обчислювальних можливостей системи та вимог до точності. Порівняльний аналіз розглянутих методів представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння методів інтелектуального аналізу метрик

Метод	Придатність для Real-time	Точність прогнозу	Складність реалізації
ARIMA	Висока	Середня	Низька
Random Forest	Середня	Висока	Середня
LSTM	Середня	Дуже висока	Висока
Fuzzy Logic	Висока	—	Середня

На основі наведених даних, для реалізації проактивного моніторингу в роботі обрано поєднання архітектури LSTM для прогнозування та методів нечіткої логіки для прийняття рішень, що забезпечує баланс між точністю та швидкістю адаптації інфраструктури [5, 6].

Прогнозування навантаження є лише першим етапом; наступним критично важливим кроком є прийняття рішень щодо перерозподілу ресурсів. Класичні алгоритми балансування, такі як Round Robin або Least Connections, працюють на основі спрощених правил і не враховують поточну «вагу» кожного завдання та динаміку зміни стану всієї інфраструктури [8].

Для вирішення завдань у хмарних та мікросервісних середовищах доцільно використовувати методи інтелектуального балансування:

- Нечітка логіка (Fuzzy Logic): дозволяє системі приймати рішення в умовах невизначеності, коли вхідні дані (наприклад, «завантаження CPU високе», «затримка мережі середня») не мають чітких меж. Це ідеально підходить для створення правил автоматичного масштабування (Autoscaling).

- Нейро-нечіткі системи (Neuro-Fuzzy Systems): поєднують у собі здатність нейронних мереж до навчання та прозорість нечітких правил. Такий гібридний підхід дозволяє системі постійно адаптуватися до нових типів навантажень, зберігаючи при цьому інтерпретованість логіки управління.

- Навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning): агент системи балансування навчається методом спроб та помилок, отримуючи «винагороду» за стабільну роботу інфраструктури та мінімізацію витрат.

Використання таких підходів у поєднанні з сучасними платформами оркестрації, як Kubernetes, дозволяє реалізувати інтелектуальні контролери автоскейлінгу [7, 9]. Це забезпечує динамічне виділення ресурсів саме в той момент, коли це необхідно, що є ключовим фактором для забезпечення стабільної роботи систем з мікросервісною архітектурою в умовах непередбачуваного трафіку.

Висновки. Аналіз сучасних методів моніторингу та управління навантаженням підтверджує необхідність переходу від статичних реактивних підходів до інтелектуальних проактивних систем. Запропоноване поєднання методів глибинного навчання (LSTM) для прогнозування часових рядів та нейро-нечітких моделей для прийняття рішень дозволяє створити високоефективний метод оптимізації ІТ-інфраструктури [3, 9]. Впровадження таких рішень забезпечує підвищення надійності систем, зменшення часу відгуку та суттєву економію хмарних ресурсів.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Designing Data-Intensive Applications / M. Kleppmann. — O'Reilly Media, 2017.
2. Observability Engineering / C. Majors et al. — O'Reilly, 2022.
3. AIOps: Real-World Use Cases and Platforms / S. Dang et al. — Springer, 2021.
4. Time Series Analysis: Forecasting and Control / G. Box, G. Jenkins. — Wiley, 2015.
5. Deep Learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. — MIT Press, 2016.
6. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow / A. Géron. — O'Reilly, 2022.
7. Kubernetes: Up and Running / K. Burns, B. Grant. — O'Reilly, 2022.
8. Cloud Native Patterns / C. Richardson. — Manning, 2018.
9. An SLO-Driven and Cost-Aware Autoscaling Framework for Kubernetes / V. Punniyamoorthy, B. Kumar, S. Saha, L. Butra, M. Palanigounder, A. K. Agarwal, K. Kannan — arXiv, 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2512.23415>

INTELLIGENT METHOD FOR MONITORING AND RESOURCE OPTIMIZATION OF IT INFRASTRUCTURE BASED ON MACHINE LEARNING

Oleksandr Samuskov, Kateryna Ostrovska

Abstract. *The paper analyzes modern approaches to monitoring and load management in IT infrastructures. The limitations of traditional reactive methods are considered and the expediency of moving to intelligent AIOps systems is substantiated. The authors proposed a concept of a monitoring method based on the use of machine learning algorithms (in particular, LSTM models and neuro-fuzzy networks) for proactive forecasting of load time series. Particular attention is paid to intelligent resource balancing in cloud and microservice environments, which allows minimizing latency and optimizing infrastructure costs. The results can be used in the development of adaptive autoscaling systems.*

Keywords: *IT infrastructure, monitoring, machine learning, load forecasting, AIOps, resource balancing, neuro-fuzzy systems.*

**МЕТОДОЛОГІЧНІ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ЗАСАДИ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ
ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО УПРАВЛІННЯ РЕЖИМОМ ЗАВАНТАЖЕННЯ
ШИХТИ ТА РОЗПОДІЛОМ ДУТТЯ ПО ФУРМАХ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ**

Семенов Ю.С. [ORCID]

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (ІЧМ),

к.т.н., с.н.с, Україна

Анотація Представлені методологічні та інформаційні засади систем підтримки прийняття рішень (СППР) щодо управління режимом завантаження шихти та розподілом дуття по фурмах доменної печі. Створення представлених СППР складається з наступних етапів: розробка інформаційно-моделюючого модулю розподілу шихтових матеріалів при завантаженні доменних печей безконусним або конусним завантажувальним пристроєм; використання інформації сучасних засобів автоматизованого контролю з встановленням статистичних залежностей цієї інформації з показниками доменної плавки; створення представницької бази даних, яка містить різні режими роботи доменної печі з відповідними техніко-економічними показниками доменної плавки, параметрами режиму завантаження та інформацією засобів контролю; використання методів прямої та ітераційної оптимізації; розробка методів та критеріїв, які дозволяють забезпечити синергетичну взаємодію функціонування СППР. Важливим етапом розробки СППР є апробація їх окремих складових та рекомендацій по управлінню доменною плавкою в реальних умовах виробництва.

Ключові слова. доменна піч, система підтримки прийняття рішень, режим завантаження, температури газового потоку, розподіл дуття, оптимізація

Вступ. Сучасні принципи автоматизації доменних печей у світовій практиці спираються на комплексне використання засобів автоматизованого контролю та інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень (СППР). Останні функціонують на основі математичних моделей і накопиченого експертного досвіду, забезпечуючи високу якість інформаційного супроводу виробництва з формуванням обґрунтованих рекомендацій. Методологічні засади СППР базуються на створенні відповідних методів контролю та управління, які забезпечують цільове функціонування СППР, а саме – генерацію своєчасних рекомендацій, необхідних для забезпечення

ефективного управління процесом користувачем (оператором-технологом). Інформаційні засади полягають у створенні такої сукупності та структури інформації СППР, яка сприяє найбільш ефективній взаємодії між системою та користувачем для досягнення ефективного результату. Аналіз літературних джерел показує певну кількість розробок в доменному виробництві як математичних моделей, модельних систем та систем моніторингу, так і СППР [1–6]. При цьому, як у вітчизняній практиці, так і у світовій, відсутні дані про розробку та впровадження СППР, які спрямовані на управління режимом завантаження шихтовими матеріалами та розподілом дуття по окружності ДП. В останні роки в ІЧМ розробляються методологічні та інформаційні засади двох СППР та методи, які дозволяють забезпечити синергетичну взаємодію функціонування цих СППР. Окремі модулі СППР вже впроваджені на виробництві або пройшли досліdну апробацію.

Основний матеріал. СППР щодо управління режимом завантаження ДП заснована на інформації про зміну температури газового потоку над поверхнею шихти у доменній печі у зв'язку із режимами завантаження та техніко-економічними показниками доменної плавки. Ця інформація безперервно реєструється чотирма стаціонарними термозондами у восьми контрольованих точках за радіусом ДП (засіб контролю для умов українських підприємств) [7]. Методологічний апарат даної СППР ґрунтується на поглибленні теоретичних положень про вплив параметрів завантаження на температурний газорозподіл в ДП, включно з набором апробованих емпіричних залежностей. Концепція розробки даної СППР передбачає створення репрезентативної бази даних (БД), що акумулює відомості про різні режими завантаження, техніко-економічні показники доменної плавки та відповідні їм температури газового потоку. Методологія управління СППР реалізується через синтез методів прямої та ітераційної оптимізації, спрямованих на вдосконалення режиму завантаження ДП [8].

СППР щодо управління режимом завантаження шихти включає три основних модуля:

1. Інформаційно-моделюючий модуль (ІММ) для ДП з безконусним [4] або конусним [5] завантажувальним пристроєм. ІММ містить необхідну для оцінки відповідних змін при застосуванні різних режимів завантаження ДП інформацію про структуру шарів шихти та розподіл шихтових матеріалів на колошнику ДП, визначення та візуалізацію показників розподілу по радіусу колошника, зокрема, рудних навантажень в рівних за площею кільцевих зонах колошника. Реалізація ІММ в АСУ ДП, навіть окремо від СППР [4, 5], дозволяє обмежити можливі варіанти вибору раціональних режимів завантаження ДП, обладнаної різними завантажувальними пристроями.

2. Експертний модуль (ЕМ) температур газового потоку. Аналіз інформації про зміну температур газового потоку над поверхнею шихти здійснюється шляхом безперервного визначення чотирьох температурних показників. Температурні показники розподілу газового потоку ($K_{1...4}$) визначаються за співвідношеннями температур в різних зонах перерізу ДП, та характеризують чотири основні характеристики температури газового потоку над поверхнею шихти – газопроникність периферійної, проміжної, центральної зон та осьової віддушини [8–10]. Зміна температурних показників має нестаціонарний характер, залежить від різноманітних технологічних факторів, тому з застосуванням методів статистичного аналізу техніко-економічних показників доменної плавки здійснюється визначення їх оптимальних діапазонів [8–10]. ЕМ включає розрахунок і відображення у вигляді графіків зміни $K_{1...4}$ та рекомендації щодо коригування режиму завантаження в режимі реального часу при стійкому виході одного або декількох показників розподілу з оптимального діапазону. Після чого здійснюється вибір скоригованої програми завантаження ДП з використанням ІММ.

3. Модуль генерації управляючих дій. Функціонування цього модулю має наступну алгоритмічну архітектуру. На першому етапі здійснюється формування еталонної БД, що включає технологічні параметри та показники плавки, режими завантаження ДП та відповідні їм температури газового потоку над поверхнею шихти. Для всієї сукупності режимів завантаження, які використовуються на ДП, визначається набір розподілів температур за

контрольованими радіусами колошника, ці температури повинні відповідати мінімальній витраті коксу та максимальній продуктивності ДП. Далі визначаються критерії впливу параметрів режиму завантаження ДП на форму кривих розподілу температур над поверхнею шихти. На наступному етапі здійснюється порівняння фактичних даних роботи ДП з еталонною БД та визначення відхилень розподілу температур газів над поверхнею шихти. Пошук рішень для наближення відхилень до еталонної БД здійснюється з використанням методів прямої та ітераційної оптимізації. Метод прямої оптимізації передбачає ідентифікацію в БД найкращих параметрів завантаження ДП, що відповідають еталонному розподілу температур. Метод ітераційної оптимізації полягає у циклічному варіюванні одного або декількох параметрів завантаження ДП, що дозволяє максимально наблизити розподіл температур до еталонного [8]. Рекомендації, згенеровані на основі методів оптимізації проходять етап узгодження з рекомендаціями ЕМ на основі динаміки зміни температурних показників. Модуль генерації управляючих дій включає також: динамічну актуалізацію СППР статистичною інформацією про роботу ДП, включаючи техніко-економічні показники та інформацію всієї наявної на ДП вимірювальної апаратури; відомі положення теорії та практики завантаження ДП про вплив параметрів завантаження на енергоефективність плавки та продуктивність ДП.

СППР щодо управління розподілом дуття по фурмах ДП заснована на інформації про зміну витрат дуття у часі для кожної окремої повітряної фурми ДП. Установка з вдування пиловугільного палива (ПВП) на металургійному виробництві ПрАТ «Камет-сталь» є єдиною в Україні (станом на 2014 р.), що дозволяє регулювати витрату ПВП на окремих повітряних фурмах ДП у відсотковому співвідношенні і тим самим забезпечувати окружну рівномірність або задану нерівномірність параметрів дуттєвого режиму [1, 11–13]. Основним показником, що характеризує окружний розподіл дуттєвих параметрів є теоретична температура горіння (у закордонній літературі прийнята назва RAFT – Raceway adiabatic flame temperature) у фурменому осередку на кожній окремо взятій повітряній фурмі. Управління та контроль

розподілу дуття по фурмах в автоматизованому режимі є невирішеним завданням, необхідним як для ефективного вдування паливних добавок з використанням наявної можливості установки по вдуванню ПВП, так і для створення умов для рівномірної роботи ДП по окружності.

Сутність методу контролю розподілу дуття по повітряних фурмах полягає у розрахунковому визначенні витрат дуття по кожній фурмі пропорційно тепловим навантаженням, які вимірюються (в даний час ручним способом) на водоохолоджуваних елементах (соплах) фурмених приладів [11]. В останні роки доведено, що в ролі калориметра можуть виступати водоохолоджувані фланці підвішених (рухомих) колін, оскільки сопла фурмених приладів в сучасних умовах не мають охолодження. При виконанні попередніх досліджень [11, 12] була доведена ефективність методу управління розподілу дуття по повітряних фурмах при проведенні ручним способом вимірювань теплових навантажень на фланцях підвішених колін фурмених приладів ДП ПрАТ «Камет-сталь».

Для впровадження комплексу системи управління автоматизованого розподілу дуття та відповідної СППР необхідна установка на кожен фурмений прилад витратоміра води, що надходить на фланці підвішеного коліна фурменого приладу та термопари на ділянці зливного трубопроводу після охолодження. СППР щодо управління розподілом дуття по повітряних фурмах, яка є інтелектуальною складовою системи управління автоматизованого розподілу дуття повинна містити як необхідний набір інформації для прийняття рішень щодо здійснення коригуючих дій, так і комплекс рекомендацій, що генерується при функціонуванні СППР.

Інформація СППР повинна включати: візуалізацію первинної інформації щодо розподілу по окружності ДП перепадів температур та витрат охолоджувальної води; візуалізацію розрахункової інформації щодо розподілу по окружності ДП фактичної теоретичної температури горіння, витрат та швидкості дуття, геометрії фурмених осередків; блок генерації рекомендацій щодо коригування витрат паливних добавок на окремих фурмах для забезпечення необхідного окружного розподілу теоретичної температури горіння; сигналізацію щодо наявності т.зв. «зашлакованості» фурм; рекомендації щодо зміни діаметрів повітряних фурм.

Розробка цієї СППР також передбачає створення представницької БД різних режимів розподілу дуття та техніко-економічних показників доменної плавки із встановленням зв'язків окружного розподілу параметрів дуття та технологічних показників, на підставі яких створення критерію оцінки окружного газорозподілу в ДП, який забезпечує алгоритмічне поєднання (синергію) двох СППР з генерацією відповідних комплексних рекомендацій по управлінню доменною плавкою. В якості складової такого критерію має виступати встановленні залежності теоретичної температури горіння та температурних показників розподілу газового потоку [13].

Висновки. Представлені методологічні та інформаційні засади розробки систем підтримки прийняття рішень щодо управління режимом завантаження шихти та розподілом дуття по фурмах доменної печі. Показано, що для створення систем підтримки прийняття рішень необхідні: розробка інформаційно-моделюючого модулю розподілу шихтових матеріалів в доменній печі; використання інформації сучасних засобів автоматизованого контролю з встановленням статистичних залежностей нових показників, створених на базі цієї інформації, з показниками доменної плавки; створення представницької бази даних різних режимів роботи доменної печі з відповідними техніко-економічними показниками і технологічними параметрами доменної плавки; використання методів прямої та ітераційної оптимізації; розробка методів та критеріїв, які дозволяють забезпечити синергетичну взаємодію функціонування систем; апробація, як окремих складових систем підтримки прийняття рішень, так і комплексу рекомендацій по управлінню доменною плавкою в реальних умовах виробництва.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Y.S. Semenov, Y.I. Shumelchuk, V.V. Horupakha, et al. (2022). Development and Implementation of Decision Support Systems for Blast Smelting Control in the Conditions of PrJSC "Kamet-steel". MDPI, Metals, 12 (6), 985. <https://doi.org/10.3390/met12060985>.
2. A.L. Chaika, V.V. Lebed, B.V. Kornilov, et al. (2021). Implementation of a Set of Long-Term and Energy-Saving Cast Iron Production Models in Blast Furnaces in Ukraine. Steel Transl., 51 (3), 201–204. <https://doi.org/10.3103/S0967091221030025>.

3. Yu.S. Semenov, A.L. Podkorytov, E.I. Shumelchik, et al. (2021). Decision Support System for Controlling Thermal State of Blast Furnace Smelting. *Steel Transl.*, 51 (4), 261–266. <https://doi.org/10.3103/S0967091221040094>.
4. Yu.S. Semenov, E.I. Shumelchik, V.I. Vishnyakov, et al. (2013). Model system for selecting and correcting charging programs for blast furnaces equipped with a bell-less charging apparatus. *Metallurgist*, 56 (9–10), 652–657. <https://doi.org/10.1007/s11015-013-9630-3>.
5. S. Vashchenko, Yu. Semenov, O. Khudyakov, et al. (2025). Development and implementation of a mathematical model of charging a blast furnace equipped with a bell-type charging device. *Metallurgical Research & Technology*, 122 (6), 624. <https://doi.org/10.1051/metal/2025095>.
6. Yu.S. Semenov, E.I. Shumelchik, V.V. Horupakha (2017). Blast Furnace Shaft Thermal State Monitoring System. *Steel Transl.*, 47 (11), 728–731. <https://doi.org/10.3103/S0967091217110092>.
7. Yu.S. Semenov. (2017). Temperature Distribution of the Gas Flux in Blast Furnaces. *Steel Transl.*, 47 (7), 473–477. <https://doi.org/10.3103/S0967091217070117>.
8. Yu. Semenov, Ie. Shumelchik, S. Vashchenko, et al. (2025). Optimization of blast furnace charging modes based on changes in gas flow temperatures. *Discover Mechanical Engineering*, 4, 60. <https://doi.org/10.1007/s44245-025-00157-9>.
9. Y. Shumelchik, Y. Semenov, V. Horupakha, et al. (2022). Model-Based Decision Support System for the Blast Furnace Charge of Burden Materials. *Applied Condition Monitoring*, 18, 340–351 https://doi.org/10.1007/978-3-030-82110-4_18.
10. Yu.S. Semenov, E.I. Shumelchik, V.V. Horupakha. (2018). Expert Module of the Thermal Probes System for Blast Furnace Charging Control. *Steel Transl.*, 48 (12), 802–806 <https://doi.org/10.3103/S0967091218120136>.
11. Yu.S. Semenov, V.V. Horupakha, E.I. Shumelchik, M.A. Alter. (2021). Blast Furnace Operation Improvement by Forming Uniform Circular Distribution of Raceway's Thermal Mode. *AISTech 2021 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*, 29 June–1 July 2021, Nashville, Tenn., USA, 184–192. <https://doi.org/10.33313/382/018>.
12. Yu.S. Semenov, A.L. Podkorytov, V.V. Horupakha, et al. (2020). New scientific and applied results of studies efficiency use of pulverized coal in the production of cast iron and lime burning. *Metal and Casting of Ukraine*, 2, 15–26. <https://metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/view/102>.
13. V.V. Horupakha, Yu.S. Semenov, O.Yu. Khudyakov, et al. (2025). Research of circular gas distribution in a blast furnace using information on blow distribution and modern control measures. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 39, 34–60. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-03>.

**METHODOLOGICAL AND INFORMATIONAL PRINCIPLES OF DECISION
SUPPORT SYSTEMS FOR CONTROLLING THE CHARGING MODE AND THE
BLOW DISTRIBUTION ACROSS THE BLAST FURNACE TUYERES**

Yu.S. Semenov

Abstract. *The methodological and informational principles of decision support systems (DSS) for controlling the charging mode and the blow distribution over the blast furnace tuyeres are presented. The creation of the presented DSS's consists of the following stages: development of an information modeling module for the distribution of charge materials when charging blast furnaces with a bell-less or bell-type charging device; use of information from modern automated control tools with the establishment of statistical dependencies of this information with blast furnace smelting indicators; creation of a representative database containing various blast furnace operating modes with the corresponding technical and economic indicators of blast furnace smelting, charging mode parameters and information from control tools; use of direct and iterative optimization methods; development of methods and criteria that allow ensuring synergistic interaction of the DSS's functioning. An important stage of DSS's development is the testing of their individual components and recommendations for blast furnace smelting management in real production conditions.*

Keywords: *blast furnace, decision support system, charging mode, gas flow temperatures, blast distribution, optimization*

CYBERSECURITY ON EDGE-DEVICES

Syzonenko R.¹ [ORCID], Klymenko S.² [ORCID]

¹Oles Honchar Dnipro National University, PhD Student, Ukraine

² Oles Honchar Dnipro National University, PhD in Engineering,
Associate Professor, Ukraine

Abstract. *In contemporary Industry 4.0 systems, the integration of edge and Internet of Things (IoT) devices facilitates the collection of real-time data, its local processing, and subsequent transmission, thereby significantly enhancing the efficiency of automated processes. Simultaneously, their extensive interconnection within networks engenders substantial cybersecurity concerns, including breaches of data confidentiality, integrity, and availability, as well as tangible physical consequences resulting from successful intrusions. This paper discusses the security requirements of the Industrial Internet of Things (IIoT), classifies threats according to architectural layers (perception, network, application), identifies primary sources of threats, and examines typical device vulnerabilities. Furthermore, it provides a comprehensive analysis of potential applications of artificial intelligence in anomaly detection and cyberattack identification. The benefits of edge computing for the enhancement of decentralized protection mechanisms are also explored. Additionally, the study investigates methods to improve resilience, including encryption techniques, intrusion detection systems, federated learning, and blockchain integration. The research emphasizes the necessity for a holistic approach to protecting resource-constrained devices, thereby ensuring the reliable operation of critical information and control systems.*

Keywords: *cybersecurity, edge computing, IoT devices, IIoT, industrial threats, AI solutions, vulnerabilities, Industry 4.0, intrusion detection, decentralized protection.*

Introduction. The emergence of Industry 4.0 technologies has led to the widespread implementation of Internet of Things and edge computing devices, which enable real-time data processing at the network's edge, thereby reducing latency and alleviating the load on cloud resources [1]. This significant paradigm shift presents new opportunities for automation, real-time monitoring, and data-driven decision-making. Nonetheless, the increasing proliferation of connected devices has concurrently expanded the attack surface considerably. Recent reports indicate that the number of incidents related to Industrial Internet of Things has more than doubled in recent years [2]. The purpose of this report is to analyze

current cybersecurity threats targeting edge and IoT devices, to classify associated vulnerabilities, and to review promising protective strategies, with particular emphasis on those leveraging artificial intelligence and edge-focused methodologies.

Main material. The security of IIoT systems relies on the extended CIA triad- confidentiality, integrity, and availability-augmented by additional elements such as authentication, authorization, fault tolerance, privacy, and secure data exchange [1]. Constraints such as limited computing resources, a diverse array of protocols, and extensive physical access to devices significantly contribute to numerous vulnerabilities.

Threats are classified according to IIoT architecture layers.

- The perception layer, comprising sensors and actuators, is vulnerable to an array of threats. These encompass jamming, node capture, cryptographic key leakage, energy resource attacks (such as sleep deprivation), and data tampering [1, 2].

- The network layer constitutes the third layer within the seven-layer OSI model. Of particular concern are the following types of cyberattacks: distributed denial of service (DDoS) attacks, man-in-the-middle attacks, Sybil attacks, fake traffic injection, and routing attacks such as black hole and gray hole attacks [3].

- The application layer is vulnerable to various cyber threats, including ransomware, malicious code injection, data corruption, API attacks, and side-channel attacks [4].

Threat sources are diverse, including state-sponsored campaigns, industrial espionage, automated malware, botnets, and insider configuration errors [2]. The most common vulnerabilities consist of unprotected protocols, default password usage, lack of software updates, buffer overflows, and weak encryption [5].

Contemporary solutions frequently employ artificial intelligence:

- The employment of deep learning models, such as LSTM, CNN, and autoencoder architectures, has been demonstrated to attain high accuracy in anomaly detection. Research indicates that these models can achieve accuracies ranging from 97% to 99% on various datasets such as Bot-IoT, TON IoT, and N-BaIoT [1, 6].

- The utilization of federated learning methodologies has emerged as a pivotal approach in ensuring the confidentiality and security of data.

- The adoption of hybrid methodologies that incorporate blockchain technology is crucial to guarantee the integrity and decentralized detection of DDoS attacks [3].

Edge computing provides considerable benefits, such as lower latency and diminished data transmission resulting from local processing. Furthermore, it supports the deployment of lightweight artificial intelligence (AI) models directly on devices and improves resilience against network attacks via decentralization [1, 4].

Conclusions. The cybersecurity of edge and IoT devices presents a prominent challenge within the context of Industry 4.0. The integration of artificial intelligence, edge computing, contemporary cryptographic techniques, and intrusion detection systems holds the potential to significantly enhance the resilience of industrial networks. For practical implementation, a standardized approach regarding software updates, network segmentation, and routine penetration testing is indispensable. Future research should focus on optimizing lightweight AI models suitable for resource-constrained devices and incorporating encryption algorithms resistant to quantum computing attacks.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Alotaibi B. A Survey on Industrial Internet of Things Security: Requirements, Attacks, AI-Based Solutions, and Edge Computing Opportunities. *Sensors*. – 2023. 23(17):7470. doi:10.3390/s23177470 [in English].
2. Liebl S, Lathrop L, Raithel U, Söllner M, Aßmuth A. Threat Analysis of Industrial Internet of Things Devices. *arXiv preprint arXiv:2405.16314*. 2024 [in English].
3. Rathi B. Realizing the potential of Internet of Things (IoT) in Industrial applications. *Discover Internet of Things*. – 2025. doi:10.1007/s43926-025-00141-5 [in English].
4. Kumar A. Securing IoT devices in edge computing through reinforcement learning. *Computers & Security*. – 2025. doi:10.1016/j.cose.2025.104474 [in English].
5. Orman A. Cyberattack Detection Systems in Industrial Internet of Things (IIoT) Networks in Big Data Environments. *Applied Sciences*. – 2025. 15(6):3121. doi:10.3390/app15063121 [in English].
6. Krzysztoń E. Review of Fuzzy Methods Application in IIoT Security-Challenges and Perspectives. *Electronics*. – 2025. 14(17):3475. doi:10.3390/electronics14173475 [in English].

КІБЕРБЕЗПЕКА НА EDGE-ПРИСТРОЯХ

Р.М. Сизоненко, С.В. Клименко

Анотація. У сучасних системах Індустрії 4.0 інтеграція периферійних пристроїв та пристроїв Інтернету речей (IoT) полегшує збір даних у реальному часі, їх локальну обробку та подальшу передачу, тим самим значно підвищуючи ефективність автоматизованих процесів. Водночас їх широке взаємоз'єднання в мережах породжує суттєві проблеми кібербезпеки, включаючи порушення

конфіденційності, цілісності та доступності даних, а також відчутні фізичні наслідки, що виникають у результаті успішних вторгнень. У цій статті розглядаються вимоги до безпеки промислового Інтернету речей (IIoT), класифікуються загрози за архітектурними рівнями (сприйняття, мережа, застосування), визначаються основні джерела загроз та аналізуються типові вразливості пристроїв. Крім того, надається комплексний аналіз потенційних застосувань штучного інтелекту для виявлення аномалій та ідентифікації кібератак. Також досліджуються переваги периферійних обчислень для вдосконалення децентралізованих механізмів захисту. Крім того, в дослідженні вивчаються методи підвищення стійкості, включаючи методи шифрування, системи виявлення вторгнень, федеративне навчання та інтеграцію блокчейну. Дослідження підкреслює необхідність комплексного підходу до захисту пристроїв з обмеженими ресурсами, що забезпечує надійну роботу критично важливих інформаційних та контрольних систем.

Ключові слова: кібербезпека, edge computing, IoT пристрої, IIoT, промислові загрози, AI-рішення, вразливості, Industry 4.0, виявлення вторгнень, децентралізований захист.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЛЕКСИЧНОГО ТА СЕМАНТИЧНОГО ПОШУКУ У БАГАТОМОВНИХ ВЕБСЕРВІСАХ АГРЕГАЦІЇ МЕДІАКОНТЕНТУ

Сімакін С.К. ¹ [ORCID], Божуха Л.М. ² [ORCID]

¹ Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, аспірант, Україна

² Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,

канд. фіз.-мат. наук, доцент, Україна

Анотація. У роботі представлено результати порівняльного аналізу двох підходів до організації пошуку у вебсервісах агрегації багатомовного медіаконтенту: лексичного пошуку на основі алгоритму BM25 (Elasticsearch) та семантичного пошуку на основі щільних векторних вкладень моделі BGE-M3 (Qdrant). Розроблено платформу MediaAggregator, яка індексує 70 000 новинних статей сімома мовами та надає уніфікований програмний інтерфейс (REST API) для порівняння якості пошуку, латентності та обсягу відповіді. Експерименти проведено локально на процесорі AMD Ryzen 9 8945HS із 32 ГБ оперативної пам'яті з використанням ONNX Runtime для інференсу моделі вкладень на CPU. Результати демонструють, що лексичний пошук забезпечує в середньому у 2,7 рази нижчу латентність, тоді як семантичний пошук забезпечує крос-лінгвістичне знаходження релевантного контенту незалежно від мови запиту, що є критичним для оптимізації мультимовних вебсервісів.

Ключові слова: вебсервіс, пошукова оптимізація, семантичний пошук, Elasticsearch, векторна база даних, BGE-M3, багатомовний пошук, BM25, Qdrant.

Вступ

Сучасні вебсервіси агрегації медіаконтенту оперують великими обсягами багатомовних даних та потребують ефективних механізмів пошуку інформації. Традиційний лексичний пошук, заснований на алгоритмі BM25, залишається стандартом індустрії завдяки високій швидкодії та передбачуваності результатів [1]. Проте він обмежений точним збігом ключових слів та не здатний враховувати семантичну близькість понять різними мовами.

З розвитком технологій великих мовних моделей (LLM) з'явилися нові підходи до пошуку, засновані на щільних векторних вкладеннях (dense embeddings). Моделі, такі як BGE-M3 від BAAI [2], підтримують понад 100 мов та

дозволяють здійснювати крос-лінгвістичний семантичний пошук, де запит однією мовою знаходить релевантні документи іншими мовами [3].

Однак практичне застосування семантичного пошуку у продуктивних вебсервісах потребує дослідження компромісів між латентністю, релевантністю та масштабованістю. Метою даної роботи є порівняльний аналіз лексичного та семантичного підходів до пошуку на реальному багатомовному корпусі новинних статей з використанням спеціально розробленої платформи оцінювання.

Основний матеріал

Архітектура платформи. Для проведення дослідження розроблено платформу MediaAggregator, яка складається з: бекенду на ASP.NET Core 10, який надає REST API з двома пошуковими ендпоінтами; Elasticsearch 9.3 для лексичного пошуку з алгоритмом ранжування BM25; Qdrant 1.17 як векторної бази даних для семантичного пошуку з косинусною подібністю; ONNX Runtime для інференсу моделі вкладень BGE-M3 (1024 виміри); React-інтерфейсу для візуального порівняння результатів.

Тестове середовище. Експерименти проведено локально на ноутбучі з процесором AMD Ryzen 9 8945HS (архітектура Zen 4, 8 ядер / 16 потоків, базова частота 4,0 ГГц, максимальна – 5,2 ГГц, 24 МБ кешу L2+L3, TDP 45 Вт, техпроцес TSMC 4 нм) та 32 ГБ оперативної пам'яті LPDDR5x. Усі компоненти системи (Elasticsearch, Qdrant, API, модель BGE-M3) розгорнуто через Docker Compose на одній машині. Інференс моделі вкладень виконувався на CPU через ONNX Runtime без GPU-прискорення.

Набір даних. Використано корпус Babel Briefings – 70 000 новинних статей (по 10 000 на мову) сімома мовами: українською, англійською, німецькою, французькою, іспанською, польською та італійською. Кожна стаття містить оригінальний заголовок та опис, а також їх англломовні переклади, що дозволяє лексичному пошуку працювати крос-лінгвістично через англломовні поля.

Методика експерименту. Виконано серію пошукових запитів різними мовами через обидва пошукові движки. Для кожного запиту зафіксовано:

латентності відповіді (мс), кількість знайдених документів, обсяг відповіді (байти), мовний склад топ-10 результатів. Результати наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння результатів лексичного та семантичного пошуку

Запит	Мова	L _{lat} , мс	S _{lat} , мс	N _{lex}	N _{sem}	Крос.
climate change global warming	en	99,1	279,3	3 040	70 000	Так
зміна клімату глобальне потепління	uk	48,9	95,6	22	70 000	Так
artificial intelligence machine learning	en	49,2	127,5	852	70 000	Так
штучний інтелект технології	uk	24,4	104,5	453	70 000	Так

У табл. 1: L_{lat} – латентність лексичного пошуку; S_{lat} – латентність семантичного пошуку (включаючи генерацію вкладки); N_{lex}, N_{sem} – кількість знайдених документів; Крос. – наявність крос-лінгвістичних результатів у семантичному пошуку.

Аналіз латентності. Середня латентність лексичного пошуку склала 55,4 мс, семантичного – 151,7 мс. Семантичний пошук повільніший у середньому в 2,7 рази, що пояснюється додатковим етапом генерації векторного вкладки запиту через модель BGE-M3 за допомогою ONNX Runtime на CPU. Для англійських запитів різниця сягає 2,8 рази (99 мс проти 279 мс), тоді як для коротших українських запитів – 2,6 рази (37 мс проти 100 мс).

Аналіз крос-лінгвістичних можливостей. Ключовою перевагою семантичного пошуку є здатність до крос-лінгвістичного пошуку. Запит українською мовою «зміна клімату глобальне потепління» через лексичний пошук знайшов лише 22 українських документи. Семантичний пошук для того ж запиту повернув релевантні результати іспанською, італійською, німецькою, польською та французькою мовами, оскільки модель BGE-M3 відображає семантично близький контент у спільний векторний простір незалежно від мови [2].

Аналіз повноти пошуку. Лексичний пошук повертає лише документи з точним збігом термінів (від 22 до 3040 результатів залежно від запиту). Семантичний пошук ранжує весь корпус (70 000 документів) за косинусною подібністю, забезпечуючи повне покриття колекції. Це має практичне значення для вебсервісів, де важливо не пропустити релевантний контент.

Оптимізація продуктивності. Для зменшення латентності семантичного пошуку реалізовано конвеєрну архітектуру: паралельна токенізація наступного запиту під час інференсу поточного, підтримка GPU-прискорення через DirectML та CUDA, пакетна обробка з сортуванням за довжиною тексту для мінімізації витрат на доповнення (padding) у ONNX Runtime [4].

Висновки

Проведений порівняльний аналіз лексичного (Elasticsearch BM25) та семантичного (Qdrant + BGE-M3) підходів до пошуку на корпусі з 70 000 багатомовних новинних статей дозволяє сформулювати такі висновки:

1. Лексичний пошук забезпечує в 2,7 рази нижчу латентність (55 мс проти 152 мс), що робить його оптимальним для сценаріїв із жорсткими вимогами до швидкодії.
2. Семантичний пошук забезпечує крос-лінгвістичне знаходження релевантного контенту, що є критичним для багатомовних вебсервісів, де користувач може формувати запити будь-якою мовою.
3. Гібридний підхід, що поєднує обидва методи, є перспективним напрямком оптимізації вебсервісів пошуку: лексичний пошук для швидкої фільтрації, семантичний – для уточнення та розширення результатів.

Подальші дослідження спрямовані на реалізацію гібридного пошуку з адаптивним зважуванням результатів обох методів та оптимізацію інференсу вкладень на GPU.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Mitra B., Craswell N. An Introduction to Neural Information Retrieval. Foundations and Trends in Information Retrieval. 2018. Vol. 13, No. 1. P. 1–126. DOI: 10.1561/15000000061.
2. Chen J., Xiao S., Zhang P. et al. M3-Embedding: Multi-Linguality, Multi-Functionality, Multi-Granularity Text Embeddings Through Self-Knowledge Distillation. arXiv preprint arXiv:2402.03216. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2402.03216.

3. Karpukhin V., Oguz B., Min S. et al. Dense Passage Retrieval for Open-Domain Question Answering. Proceedings of the 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP). 2020. P. 6769–6781.
4. ONNX Runtime: cross-platform, high performance ML inferencing and training accelerator. URL: <https://onnxruntime.ai/> (дата звернення: 05.04.2026).
5. Elasticsearch: The Official Distributed Search & Analytics Engine. URL: <https://www.elastic.co/elasticsearch> (дата звернення: 05.04.2026).
6. Qdrant – Vector Search Engine. URL: <https://qdrant.tech/> (дата звернення: 05.04.2026).
7. Kamphuis C., de Vries A. P., Boytsov L., Lin J. Which BM25 Do You Mean? A Large-Scale Reproducibility Study of Scoring Variants. Proceedings of the 42nd European Conference on Information Retrieval (ECIR). 2020. P. 28–34. DOI: 10.1007/978-3-030-45442-5_4.
8. Reimers N., Gurevych I. Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks. Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP-IJCNLP). 2019. P. 3982–3992.

COMPARATIVE ANALYSIS OF LEXICAL AND SEMANTIC SEARCH IN MULTILINGUAL MEDIA AGGREGATION WEB SERVICES

S.K. Simakin, L.M. Bozhukha

Abstract. *This paper presents the results of a comparative analysis of two search approaches in multilingual media content aggregation web services: lexical search based on the BM25 algorithm (Elasticsearch) and semantic search based on BGE-M3 vector embeddings (Qdrant). The MediaAggregator platform was developed to index 70,000 news articles in seven languages and provide a unified API for comparing search quality, latency, and response size. Experiments were conducted locally on a laptop with an AMD Ryzen 9 8945HS processor (Zen 4, 8 cores, 5.2 GHz boost) and 32 GB LPDDR5x RAM. Experimental results demonstrate that lexical search provides 2.7 times lower latency on average, while semantic search enables cross-lingual retrieval of relevant content regardless of query language, which is critical for multilingual web services.*

Keywords: *web service, search optimization, semantic search, Elasticsearch, vector database, BGE-M3, multilingual search, BM25, Qdrant.*

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВОДНОГО БАЛАНСУ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТІВ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ДАНИМИ

Кавац Ю.В.¹ [ORCID], Кавац О.О.² [ORCID], Олексієнко М.А.³ [ORCID]

¹ Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

² Український державний університет науки і технологій, к.т.н., доцент, Україна

³ Український державний університет науки і технологій, аспірант, Україна

Анотація. У роботі узагальнено підходи до оцінки водного балансу та вологості ґрунтів на основі даних дистанційного зондування Землі та проаналізовано їх адаптацію для умов України. Показано, що внаслідок кліматичних змін і руйнування водної інфраструктури водний баланс набуває критичного стану, а традиційні спостереження є просторово обмеженими. Розглянуто оптичні, теплові та мікрохвильові методи, а також підходи даунскейлінгу для інтеграції супутникових даних різної роздільної здатності. Обґрунтовано доцільність мультиметодного підходу, що поєднує NDVI/NDWI, LST, SAR (Sentinel-1), SMAP та ERA5-Land для отримання просторово-суцільних оцінок. Відзначено потенціал Google Earth Engine для обробки часових рядів та автоматизації моніторингу. Визначено перспективність застосування методів машинного навчання для картування водного балансу.

Ключові слова. Водний баланс, вологість ґрунтів, дистанційне зондування, машинне навчання.

Вступ. Водний баланс є визначальним інтегральним показником функціонування наземних екосистем, який безпосередньо впливає на продуктивність сільського господарства, формування гідрологічних ризиків (посухи та повені) та забезпечення водними ресурсами. З огляду на те, що аграрний сектор формує близько 10% ВВП та 41% експорту України, точна оцінка водного балансу на регіональному рівні набуває стратегічного значення [1].

Традиційна мережа гідрометеорологічних спостережень характеризується просторовою нерівномірністю, яка суттєво посилилася внаслідок бойових дій, а на тимчасово окупованих територіях унеможливорює проведення вимірювань. За таких умов дистанційне зондування Землі фактично виступає єдиним інструментом отримання просторово-суцільної інформації. Попри стрімкий

розвиток супутникових методів протягом останнього десятиліття, їх застосування в Україні залишається фрагментарним і недостатньо систематизованим [2-3].

Метою роботи є узагальнення сучасних підходів до оцінки вологості ґрунтів і водного балансу за супутниковими даними та визначення перспектив їх адаптації для умов України.

Основна частина. Клімат України характеризується як помірно континентальний із чітко вираженою сезонністю, що супроводжується зростанням міжрічної мінливості. Аналіз довготривалих рядів спостережень свідчить про підвищення частоти та інтенсивності метеорологічних посух, найбільш виражених у 2003, 2015, 2019 та 2020 роках [4-5]. Зокрема, посуха 2019–2020 рр. призвела до втрати 80–100% врожаю в окремих районах Одеської області, що супроводжувалося критичним виснаженням запасів ґрунтової вологи. Згідно з кліматичними сценаріями СМІР6, до середини ХХІ століття екстремальні посухи можуть перейти у категорію кліматичної норми, а за сценарієм SSP5-8.5 їх інтенсивність і тривалість зростуть щонайменше вдвічі.

Додатковим дестабілізуючим фактором є руйнування водної інфраструктури внаслідок війни. Зокрема, підрив Каховської ГЕС у 2023 році спричинив втрату значної частки запасів прісної води, порушення водопостачання для мільйонів населення та деградацію зрошуваних систем [6-8]. Скорочення площ зрошення до приблизно 18% від довоєнного рівня та зростання температури поверхні ґрунту на зрошуваних раніше територіях вказують на прискорення процесів аридизації та формування ознак опустелювання.

За таких умов застосування супутникових методів оцінки вологості ґрунтів є обґрунтованою альтернативою наземним спостереженням. Основні підходи доцільно класифікувати за типом сенсорів та фізичними принципами вимірювання.

Оптичні та теплові методи базуються на аналізі спектральних індексів, таких як NDVI та NDWI, що відображають стан рослинності та вміст вологи у

верхньому шарі ґрунту. Поєднання температури поверхні (LST) з індексами рослинності реалізується у вигляді трикутника NDVI–LST, що дозволяє оцінювати вологість без використання калібрувальних вибірок. Водночас обмеженням таких методів є залежність від хмарності, що призводить до просторово-часових прогалин у даних.

Мікрохвильові методи активного типу (SAR), реалізовані зокрема на базі Sentinel-1, забезпечують всепогодний моніторинг завдяки чутливості сигналу зворотного розсіювання до діелектричних властивостей ґрунту [9-10]. Використання фізичних моделей (AIEM, WCM) та алгоритмів машинного навчання (Random Forest, SVR, нейронні мережі) дозволяє підвищити точність оцінок, хоча на результати впливають щільна рослинність і складний рельєф.

Пасивні мікрохвильові сенсори (SMOS, SMAP) забезпечують регулярне глобальне покриття, проте їх низька просторова роздільна здатність (десятки кілометрів) є недостатньою для регіонального аналізу [11-12]. Це обумовлює необхідність застосування методів даунскейлінгу, які поєднують дані різних джерел у єдині високороздільні продукти. Зокрема, інтеграція SMAP, MODIS, Sentinel-2 та Sentinel-1 у рамках багаторівневих моделей дозволяє отримувати щоденні карти вологості з роздільністю до 30 м.

Практичні реалізації таких підходів продемонстровано в агрометеорологічних системах, де поєднання супутникових індексів і кліматичних даних дозволяє визначати ключові фактори врожайності. Аналіз часових рядів також підтверджує суттєве погіршення водного балансу на півдні України після втрати зрошення, що супроводжується зростанням випаровування та деградацією земель.

Окремо слід відзначити потенціал платформи Google Earth Engine, яка забезпечує доступ до довготривалих архівів супутникових даних та можливість їх обробки безпосередньо в хмарному середовищі. Поєднання MODIS, Sentinel та ERA5-Land відкриває можливості для автоматизованого моніторингу водного балансу в реальному часі.

Висновки. У роботі зроблено огляд сучасних методів оцінки водного балансу та вологості ґрунтів на основі даних дистанційного зондування

Землі, а також проаналізовано їх застосовність для умов України з урахуванням кліматичних змін та наслідків руйнування водної інфраструктури внаслідок війни.

Показано, що сучасний стан водного балансу України характеризується як критичний, що зумовлено зростанням частоти та інтенсивності посух, деградацією зрошувальних систем та обмеженням наземних гідрометеорологічних спостережень. За таких умов методи дистанційного зондування виступають ключовим інструментом забезпечення просторово моніторингу.

Обґрунтовано, що найбільш ефективним для умов України є мультиметодний підхід, який передбачає інтеграцію оптичних індексів (NDVI, NDWI), теплових даних (LST), радарних спостережень (Sentinel-1), пасивних мікрохвильових продуктів (SMAP, ESA CCI SM) та кліматичних реаналізів (ERA5-Land) із використанням хмарних платформ обробки даних.

Визначено, що перспективним напрямком подальших досліджень є розробка програмних систем типізації територій України за рівнем водного балансу та водної безпеки на основі поєднання супутникових часових рядів, методів машинного навчання (Random Forest, LSTM) та адаптивних алгоритмів просторової класифікації, орієнтованих на підтримку прийняття управлінських рішень в умовах воєнних та кліматичних викликів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Світовий банк. Збитки для водних ресурсів. Режим доступу: <https://eu4waterdata.eu> (дата звернення: 2026).
2. Freitas, F.R.; et al. Review of soil moisture estimation methods using remote sensing. *Advances in Technology*, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100648>.
3. Bauer-Marschallinger, B.; et al. Soil moisture retrieval from Sentinel-1 data. *Remote Sensing of Environment*, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114771>.
4. Семенова І.; та ін. Довгострокова мінливість та тенденції метеорологічних посух в Україні. *International Journal of Climatology*, 2024. <https://doi.org/10.1002/joc.8416>.

5. Zarepour, M.; et al. Extreme droughts under climate change. *Climatic Change*, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10584-025-03958-9>.
6. Гапіч Г.; Новицький Р.; та ін. Наслідки російсько-української війни для водної безпеки та повоєнні перспективи. *Natural Hazards Research*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.01.004>.
7. ЮНІСЕФ; Світовий банк. Третя швидка оцінка збитків та потреб України (RDNA3). Режим доступу: <https://documents.worldbank.org> (дата звернення: 2026).
8. Гапіч Г.; та ін. Вплив війни на природно-кліматичну трансформацію територій у зоні зрошення. *SN Applied Sciences*, 2025. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07404-4>.
9. Chun, J.; et al. Soil moisture estimation based on Sentinel-1 SAR using artificial neural networks. *Remote Sensing*, 2022, 14. <https://doi.org/10.3390/rs14030465>.
10. He, L.; et al. Soil moisture retrieval by integrating Sentinel-1A and MODIS data. *Water*, 2020, 12. <https://doi.org/10.3390/w12061726>.
11. Gruber, A.; et al. Evolution of soil moisture climate data records in ESA CCI. *Earth System Science Data*, 2019, 11, 717–739. <https://doi.org/10.5194/essd-11-717-2019>.
12. Guo, Y.; et al. Microwave-optical multi-stage synergy for downscaling soil moisture to 30 m. *Remote Sensing*, 2025, 17. <https://doi.org/10.3390/rs17223677>.
13. Раздавовський Р.; та ін. Оцінка аномалій врожайності сільськогосподарських культур у 2022 році в Україні на основі даних Copernicus Sentinel та ERA5. *Sensors*, 2024, 24. <https://doi.org/10.3390/s24072257>.
14. Сніжко С.; та ін. Річка Південний Буг: водна безпека та кліматичні зміни. *Frontiers in Water*, 2024. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1447378>.

ANALYSIS OF METHODS FOR SOIL MOISTURE WATER BALANCE USING SATELLITE DATA

Yurii Kavats, Olena Kavats, Mykyta Oleksiienko

Abstract. *This paper summarises approaches to assessing the water balance and soil moisture based on Earth remote sensing data and analyses their adaptation to conditions in Ukraine. It demonstrates that, as a result of climate change and the deterioration of water infrastructure, the water balance is reaching a critical state, whilst traditional observations are spatially limited. Optical, thermal and microwave methods are considered, as well as downscaling approaches for integrating satellite data of varying resolutions. The feasibility of a multi-method approach combining NDVI/NDWI, LST, SAR (Sentinel-1), SMAP and ERA5-Land to obtain spatially continuous estimates is justified. The potential of Google Earth Engine for processing time series and automating monitoring is noted. The prospects for applying machine learning methods to water balance mapping are identified.*

Keywords: *Water balance, soil moisture, remote sensing, machine learning.*

REFERENCE

1. World Bank. Water Sector Damage Assessment. Available online: <https://eu4waterdata.eu> (accessed: 2026).
2. Freitas, F.R.; et al. Review of soil moisture estimation methods using remote sensing. *Advances in Technology*, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100648>.
3. Bauer-Marschallinger, B.; et al. Soil moisture retrieval from Sentinel-1 data. *Remote Sensing of Environment*, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114771>.
4. Semenova, I.; et al. Dovhostrokovna minlyvist ta tendentsii meteorolohichnykh posukh v Ukraini [Long-term variability and trends of meteorological droughts in Ukraine]. *International Journal of Climatology*, 2024. <https://doi.org/10.1002/joc.8416>.
5. Zarepour, M.; et al. Extreme droughts under climate change. *Climatic Change*, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10584-025-03958-9>.
6. Hapich, H.; Novytskyi, R.; et al. Naslidky rosiisko-ukrainskoi viiny dlia vodnoi bezpeky ta povoienni perspektyvy [Impacts of the Russia–Ukraine war on water security and post-war prospects]. *Natural Hazards Research*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.01.004>.
7. UNICEF; World Bank. Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3). Available online: <https://documents.worldbank.org> (accessed: 2026).
8. Hapich, H.; et al. Vplyv viiny na pryrodno-klimatychnu transformatsiiu terytorii u zoni zroshennia [Impact of war on natural-climatic transformation in irrigated areas]. *SN Applied Sciences*, 2025. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07404-4>.
9. Chun, J.; et al. Soil moisture estimation based on Sentinel-1 SAR using artificial neural networks. *Remote Sensing*, 2022, 14. <https://doi.org/10.3390/rs14030465>.
10. He, L.; et al. Soil moisture retrieval by integrating Sentinel-1A and MODIS data. *Water*, 2020, 12. <https://doi.org/10.3390/w12061726>.
11. Gruber, A.; et al. Evolution of soil moisture climate data records in ESA CCI. *Earth System Science Data*, 2019, 11, 717–739. <https://doi.org/10.5194/essd-11-717-2019>.
12. Guo, Y.; et al. Microwave-optical multi-stage synergy for downscaling soil moisture to 30 m. *Remote Sensing*, 2025, 17. <https://doi.org/10.3390/rs17223677>.
13. Razdavovskyi, R.; et al. Otsinka anomalii vrozhaivosti silskohospodarskykh kultur v Ukraini na osnovi danykh Copernicus Sentinel ta ERA5 [Crop yield anomaly assessment in Ukraine based on Copernicus Sentinel and ERA5 data]. *Sensors*, 2024, 24. <https://doi.org/10.3390/s24072257>.
14. Snizhko, S.; et al. Richka Pivdennyi Buh: vodna bezpeka ta klimatychni zminy [Southern Bug River: water security and climate change]. *Frontiers in Water*, 2024. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1447378>.

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕОДНОРІДНОСТІ ДАНИХ АНАЛІЗУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ

Федоренко О.Д.¹ [ORCID], Клим В. Ю.² [ORCID]

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, аспірант, Україна

²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,

канд. наук, доц., Україна

Анотація. У роботі досліджуються часові ряди даних моніторингу атмосферного повітря, отриманих з трьох автоматизованих станцій серії «Ефір 1» у містах Дніпро, Павлоград та Нікополь за період 2017–2025 рр. Основну увагу приділено виявленню та аналізу неоднорідностей, спричинених деградацією сенсорної бази внаслідок завершення строку їх експлуатації. Застосування статистичних методів дозволяє відокремити інструментальні похибки від реальних змін концентрацій забруднювальних речовин (NO_2 , CO , SO_2 , O_3 , H_2S , пил) з урахуванням метеорологічних параметрів. Результати дослідження сприятимуть підвищенню достовірності екологічного контролю та коректній інтерпретації багаторічних даних в умовах техногенного навантаження.

Ключові слова: неоднорідність даних, моніторинг повітря, знос сенсорів, інструментальна похибка, достовірність вимірювань, забруднення.

В умовах зростання техногенного навантаження на довкілля особливого значення набувають достовірність та репрезентативність даних моніторингу атмосферного повітря. Ефективність екологічного контролю та прогнозування якості повітря безпосередньо залежить від однорідності та зіставності вимірювань, отриманих з різних спостережних платформ. У зв'язку із завершенням строку служби чутливих елементів газоаналізаторів (сенсорів), актуальності набуває оцінка неоднорідностей, що виникають у рядах даних, які можуть бути помилково інтерпретовані як реальні зміни концентрацій забруднювальних речовин.

Базою для цього дослідження є дані трьох автоматизованих стаціонарних станцій аналізу якості повітря серії «Ефір 1», що належать КП «Центр екологічного моніторингу» Дніпропетровської обласної ради. Станції, введені в промислову експлуатацію у грудні 2017 року, розташовані у трьох промислових центрах регіону: «Ефір 1.1» у м. Дніпро (вул. Набережна Перемоги,

106а), «Ефір 1.2» у м. Павлоград (вул. Соборна, 95) та «Ефір 1.3» у м. Нікополь (вул. Електрометалургів, 3) рис.1.

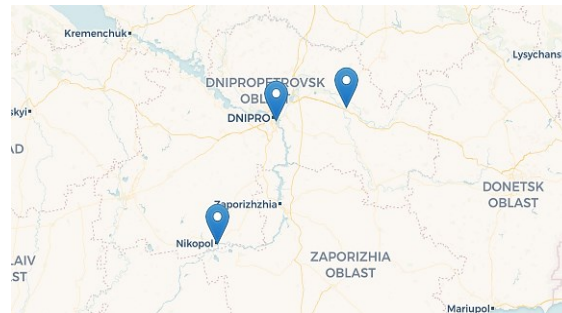


Рисунок 1 – Розташування стаціонарних станцій в промислових центрах регіонів

Кожна станція оснащена сертифікованими газоаналізаторами «АСМ-3.Д» (модифікації для $\text{SO}_2/\text{NO}_2/\text{CO}$ та $\text{H}_2\text{S}/\text{O}_3$) та вимірювачем масової концентрації аерозольних частинок «АПСМ». Окрім концентрацій забруднювальних речовин (NO_2 , CO , SO_2 , O_3 , H_2S , пил), в автоматизованому режимі фіксуються метеорологічні параметри: температура, вологість, тиск, швидкість та напрямок вітру, сонячна радіація, а також тип та інтенсивність опадів.

Спочатку реєстрація даних велася кожні дві хвилини, а з вересня 2019 року частоту було збільшено до однієї хвилини, що сформувало обширну базу для аналізу з 2017 року. Враховуючи знос сенсорів, особливий інтерес становить вивчення неоднорідності часових рядів, щоб відокремити інструментальні похибки від реальної динаміки забруднення повітря.

Для досягнення поставленої мети — виявлення та аналізу неоднорідностей у показниках якості повітря, застосовано комплексний підхід до статистичної обробки часових рядів. Світовий досвід використання сенсорних технологій для моніторингу повітря свідчить про критичну важливість контролю отриманих даних, особливо в умовах тривалої експлуатації обладнання [1, 3]. Враховуючи значний обсяг даних та технічні особливості експлуатації обладнання (наближення до граничного терміну служби сенсорів), першочерговим завданням стало попереднє опрацювання масивів та їхня первинна верифікація. Як зазначають дослідники, проблема деградації сенсорів з часом є однією з головних викликів при створенні мережевого моніторингу [4, 5].

На першому етапі дослідження виконано порівняльну оцінку статистичних характеристик вибірок. Аналіз проводився як у межах кожної окремої станції (для виявлення внутрішніх викидів показників у часі), так і в міжстанційному розрізі (для оцінки просторової варіабельності забруднення). Такий підхід дозволяє допомогти ідентифікувати ділянки часових рядів, де поведінка показників СО перестає корелювати з очікуваними фізичними закономірностями та метеоумовами.

Для кількісної оцінки неоднорідностей застосовано методи описової статистики та кореляційного аналізу. Зокрема, виконано якісний аналіз динаміки змін середніх значень, дисперсії та наявності екстремальних викидів. На основі отриманих результатів проведено групування виявлених неоднорідностей за ймовірними причинами їх виникнення: інструментальні похибки, пов'язані з деградацією сенсорів, та реальні зміни екологічної ситуації, зумовлені техногенною активністю. Аналогічний підхід до класифікації джерел неоднорідності пропонується в роботі [1].

Запропонований у роботі методичний підхід до аналізу дозволяє не лише констатувати наявність неоднорідностей, але й математично скоригувати «зіпсовані» ділянки даних. Виявлення закономірностей у зміні похибок відкриває перспективу для часткового відновлення ретроспективних даних, що суттєво підвищує інформаційну цінність багаторічного архіву спостережень.

Висновки

Проведено комплексний статистичний аналіз часових рядів концентрацій оксиду вуглецю (СО), отриманих з трьох автоматизованих станцій моніторингу повітря за період 2017–2025р. Дослідження неоднорідностей даних є критично важливим етапом верифікації результатів моніторингу, особливо в умовах тривалої експлуатації сенсорного обладнання [3, 5]. Застосована методика дає змогу розрізняти зміни, спричинені деградацією датчиків від реальних коливань рівня забруднення атмосферного повітря.

Врахування метеорологічних параметрів при аналізі неоднорідностей підвищує достовірність інтерпретації даних та дозволяє мінімізувати хибні висновки про погіршення або покращення екологічної ситуації, що

підтверджується висновками інших дослідників [2, 4]. Подальші дослідження доцільно спрямувати на автоматизацію процесів виявлення неоднорідностей та розробку методів калібрування даних в умовах зносу сенсорної бази.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Karagulian, F., et al. Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. *Atmosphere*. 2019, 10(9), 506. DOI: 10.3390/atmos10090506
2. Rai, A. C., et al. End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring. *Science of the Total Environment*, 2017, 607, 691-705. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.266
3. Lewis, A., & Edwards, P. Validate personal air-pollution sensors. *Nature*, 2016, 535(7610), 29-31. DOI: 10.1038/535029a
4. Morawska, L., et al. Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone? *Environment International*, 2018, 116, 286-299. DOI: 10.1016/j.envint.2018.04.018
5. deSouza, P., et al. An analysis of degradation in low-cost particulate matter sensors. *Environmental Science: Atmospheres*, 2023, 3(3), 521-536. DOI: 10.1039/D2EA00142J

RESEARCH ON THE HETEROGENEITY OF AIR QUALITY ANALYSIS DATA

Oleksii Fedorenko, Klym Viktoriia

Abstract. *The paper examines time series of atmospheric air monitoring data obtained from three automated stations of the “Efir 1” series in the cities of Dnipro, Pavlohrad, and Nikopol for the period 2017–2025. The main focus is on identifying and analyzing irregularities caused by the degradation of the sensor base due to the end of their service life. The application of statistical methods allows for the separation of instrumental errors from actual changes in pollutant concentrations (NO₂, CO, SO₂, O₃, H₂S, particulate matter) while accounting for meteorological parameters. The results of the study will contribute to improving the reliability of environmental monitoring and the correct interpretation of long-term data under conditions of anthropogenic load.*

Keywords: *data heterogeneity, air monitoring, sensor wear, instrumental error, measurement reliability, pollution.*

ЗАДАЧА МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ НАДІЙНОСТІ В СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ ПРОМИСЛОВОГО ІОТ

Федоряцька Н.І.¹ [ORCID], Клим В.Ю.² [ORCID]

¹ДНУ імені Олеся Гончара, аспірантка, Україна

²ДНУ імені Олеся Гончара, к.т.н., доцент, Україна

Анотація. В даній роботі розглянуто Промисловий Інтернет речей, його особливості, пов'язані з великим об'ємом даних, що генеруються сенсорами промислового обладнання. Особливу увагу приділено надійності системи передачі оперативної інформації, яка значною мірою залежить від пропускну здатності мережі та стабільності інтернет-з'єднання. Розглядаються периферійні обчислення (edge computing), локальна обробка даних, економія мережевих ресурсів, скорочення часу передачі інформації, а також можливість обробки даних в автономному режимі. Це дозволяє зменшити затримку обчислень, підвищити надійність і безпеку та оптимізувати потоки даних. Запропоновано периферійний модуль обробки даних методами математичної статистики для визначення надійності обладнання IIoT шляхом перевірки відповідності даних закону експоненціального розподілу за допомогою критеріїв, що не потребують значних обчислювальних потужностей.

Ключові слова: Інтернет речей, IIoT, непараметрична статистика, периферійні обчислення, надійність, експоненціальний розподіл, критерії перевірки

Широке використання технології Інтернету речей (IoT) в багатьох галузях спричинило виникнення нових задач з проектування, застосування, експлуатації та безпеки різних технічних систем. IoT надає багато переваг, таких як автоматизація процесів, оптимізація роботи, зменшення витрат та покращення ефективності [1]. Згідно з рекомендаціями сектора стандартизації телекомунікацій МСЕ-Т (Y.2060) Інтернет речей визначається як глобальна інфраструктура інформаційного суспільства, що забезпечує функціонування передових послуг шляхом об'єднання фізичних і віртуальних об'єктів за допомогою сумісних технологій інформації та зв'язку [2]. Успішне застосування цієї технології проявило себе у таких галузях, як виробництво, транспорт, сільське господарство, медицина, IT-індустрія та багато інших.

Одним з найбільших сегментів Інтернету речей є Промисловий Інтернет речей (IIoT), завдяки великій кількості підключених пристроїв, значній корисності для виробництва та автоматизації підприємств. Промисловий IIoT об'єднує в собі операційні та інформаційні технології, що забезпечує з одного боку оцінку часу безвідмовної роботи, надійності, довговічності, продуктивності, збору даних та адекватного реагування системи в режимі реального часу, з другого боку – спрямована на безпеку, сервіси та надання даних. Для забезпечення діагностики та обслуговування складних технічних систем, використання IIoT в виробництві та промисловості для комплексного моніторингу великої кількості технологічного обладнання, стає дуже важливою задачею [1].

Промисловий IIoT використовує хмарні обчислення, що засновані на принципах швидкості та масштабування. Але недоліком хмарних сервісів, по-перше, є досить значна затримка відгуку системи, через віддаленість серверів та мережевих каналів для передачі і обробки даних. По-друге, обмежена пропускна здатність мережі, оскільки щосекунди IIoT-пристрої генерують велику кількість даних, яка в реальному часі потрапляє на віддалені сервіси, що призводить до значних затримок у часі для її обробки та отримання результатів. По-третє, надійність системи передачі оперативної інформації для прийняття швидких рішень залежить від наявності стабільного інтернету.

Периферія Інтернету речей (edge computing) – це один з методів обчислень на периферії мережі, поряд із пристроями, що генерують дані. Периферійні обчислення спрямовані на локальну обробку даних, що дозволяє економити мережеві ресурси і розподіляти виробничі потужності, уникаючи перевантаження хмарних мереж [3]. Тобто цей метод спрямований скоротити час передачі інформації на хмари та отримання результату обробки від них. Схема edge computing [4] наведена на рис. 1.



Рисунок 1 – Інфраструктура периферійних обчислень

Застосування периферійних обчислень надає наступні переваги ІІТ:

1. надійність обробки даних при можливих відключеннях від інтернету;
2. висока швидкість обчислень при мінімальній затримці;
3. підвищення безпеки за рахунок локального застосування, без передачі даних у хмарні сервіси;
4. економія витрат, завдяки значній оптимізації потоку даних.

Метою даної роботи є розвиток системи управління периферійних обчислень в промисловому ІІТ речей із застосуванням критеріїв математичної статистики для контролю надійності та довговічності промислового обладнання.

Оскільки значна частина збору та обробки даних відбувається на місці, то виникає необхідність у використанні надійного та потужного обладнання для проведення периферійних обчислень [4].

Як відомо, надійність технічних систем – це властивість зберігати в часі у визначених межах значення усіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах застосування [5]. Працездатний стан технічної системи означає функціонування із забезпеченням параметрів якості. Вихід параметра за межі означає відмову. Раптові відмови відносяться до категорії випадкових подій і є наслідком прихованих порушень технології виробництва або прихованих змін у процесі експлуатації пристроїв. Наробіток на відмову – це випадкова величина, яку можна прогнозувати методами теорії ймовірності. Таким чином, за наявності ряду вимірювань визначальних параметрів надійності необхідно визначити

функцію їх розподілу для подальшої коректної обробки даних і прийняття рішення. Зазвичай, для оцінки параметрів надійності залучають нейромережі, що призводить до збільшення витрат на обчислювальні ресурси [6].

Для параметрів надійності характерний експоненціальний закон розподілу [7]. Непараметрична математична статистика пропонує досить багато критеріїв для перевірки вимірювань на експоненціальність. В роботі було обрано та проаналізовано наступні критерії для невеликих вибірок ($n=10;15;20;25;30$): критерій Лоулеса, Бартлета-Морана, Шермана, Грінвуда та Манна-Фертіга-Шуера. Шляхом імітаційного моделювання чотирьох різних законів розподілу: гамма-, Релея, Вейбула та експоненціального, було проведено обчислювальні експерименти. Виявлена здатність цих критеріїв визначати саме експоненціальний розподіл для невеликих вибірок серед інших наданих функцій розподілу, а саме нормального, гамма-, логістичного розподілу. Крім того, обрані критерії досить добре працюють при заданій довірчій ймовірності $P=0,95$.

В роботі запропоновано окремий периферійний модуль (рис. 2) в ІоТ, в якому обробка даних з датчиків для перевірки належності параметрів системи до експоненціального розподілу виконується за допомогою методів математичної статистики через критерії непараметричної статистики.

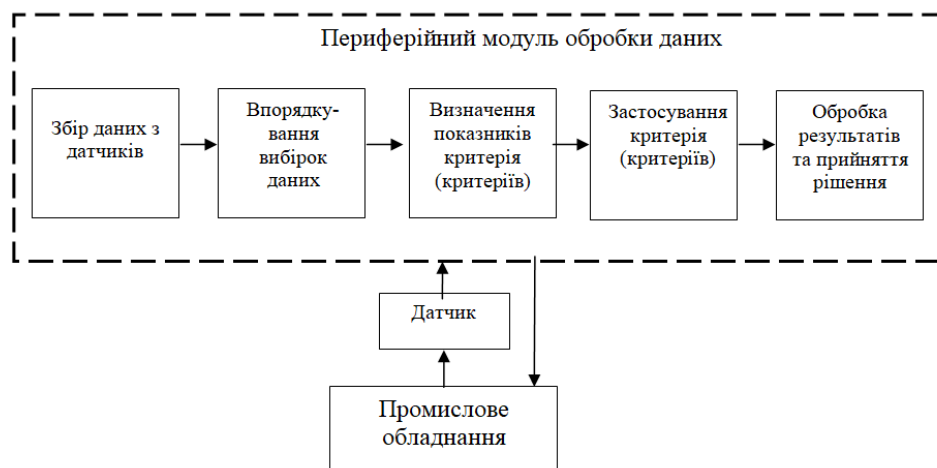


Рисунок 2 – Периферійний модуль обробки даних

Запропонований периферійний модуль обробки даних має здатність перевірити приналежність даних, отриманих з датчиків, до експоненціального розподілу. Запропонований метод базується на обробці коротких вибірок

даних ($n=10, 15, 20, 25, 30$) із застосуванням критеріїв, які не потребують значних обчислювальних потужностей, є ефективними у визначенні експоненціальності, що значно впливає на швидкість обробки та отримання результатів. Це дозволяє більш об'єктивно прогнозувати надійну роботу датчиків та обладнання в цілому.

Висновки

У роботі показана актуальність задачі використання периферійних обчислень в промисловому Інтернеті речей.

Проведено аналіз існуючих методів математичної статистики для обробки параметрів надійності як основних показників працездатного стану складної технічної системи.

В роботі вперше запропоновано розвиток системи управління периферійних обчислень в промисловому IoT речей із застосуванням критеріїв математичної статистики для моніторингу параметрів надійності та довговічності складного промислового обладнання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Жураковський Б.Ю., Зенів І.О. Технології інтернету речей. Навчальний посібник [Електронний ресурс]. КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ. – 2021. – 271 с.
2. Електронний ресурс: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=y.2060>
3. Електронний ресурс: <https://it-solutions.ua/blog/trendy-v-it-infrastrukturi-na-2025-rik/#:~:text=Edge%20Computing>
4. Бученко І.А., Лашевська Н.О. Роль периферійних обчислень (edge computing) в комп'ютерних мережах. Зв'язок. – 2025. № 1. – С. 23-29. <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2025.011762>
5. Веселовська Н.Р., Худолій О.І. Надійність технологічних систем та обґрунтування інженерних рішень. Навчальний посібник. – Вінниця. – 2014. – 123 с.
6. Daphne Jomo. Deep learning-based predictive maintenance for industrial engineering systems. San Francisco State University. – 2025. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.176463769.97486465/v1>
7. Павлюк О.М., Медиковський М.О., Ізонін І.В. Основи теорії надійності технічних систем. Навчальний посібник. – 2021. – 208 с.

THE TASK OF MONITORING RELIABILITY PARAMETERS IN AN INDUSTRIAL IIoT MANAGEMENT SYSTEM

Nadiia Fedoriatska, Viktoriia Klym

Abstract. *This paper considers the Industrial Internet of Things, its features associated with a large amount of data generated by sensors of industrial equipment. Particular attention is paid to the reliability of the system for transmitting operational information, which largely depends on the network bandwidth and stability of the Internet connection. Peripheral computing (edge computing), local data processing, saving network resources, reducing information transfer time, as well as the possibility of processing data in offline mode are considered. This allows reducing computing latency, increasing reliability and security, and optimizing data flows. A peripheral data processing module using mathematical statistics methods is proposed to determine the reliability of IIoT equipment by checking the data for compliance with the law of exponential distribution using criteria that do not require significant computing power.*

Keywords: *Internet of Things, IIoT, nonparametric statistics, edge computing, exponential distribution, verification criteria*

REFERENCE

1. Gurakovskiy B.U., Zeniv I.O. Tehnologii internetu rechey. Navchalniy posibnik [Elektroni resurs]. KPI im. Igoria Sikors'kogo. – Kyiv. – 2021 – 271 s. [in Ukrainian]
2. Elektroni resurs: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=y.2060>
3. Elektroni resurs: <https://it-solutions.ua/blog/trendy-v-it-infrastrukturi-na-2025-rik/#:~:text=Edge%20Computing> [in Ukrainian]
4. Buhenko I.A., Lashevskaya N.O. Rol` periferiynih obchislen` (edge computing) v komputernih meregah. Zv`iazok. – 2025. No 1. S. 23-29. <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2025.011762> [in Ukrainian]
5. Veselovska N.R., Hudolii O.I. Nadiynist` tehnologichnih system ta obguntuvannia ingenernih rishen`. Navchalniy posibnik. – Vinnica. – 2014. – 123s. [in Ukrainian]
6. Daphne Jomo. Deep learning-based predictive maintenance for industrial engineering systems. San Francisco State University. – 2025. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.176463769.97486465/v1>
7. Pavlyuk O.M., Medykova M.O., Izonin I.V. Osnovy teorii nadiynosti tehniknyh system. Navchalniy posibnik. – 2021. – 208 c. [in Ukrainian]

ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

Ханас М.-Ю. Р.¹ [ORCID], Ступницький В. В.² [ORCID]

¹Національний університет «Львівська політехніка», аспірант, Україна

²Національний університет «Львівська політехніка», д.т.н., проф., Україна

Анотація. Стрімкий розвиток методів машинного навчання та штучного інтелекту відкриває нові можливості для підвищення якості технологічних процесів у машинобудуванні. У роботі розглядається застосування штучних нейронних мереж (ANN) для вирішення задач забезпечення якості в процесах механічної обробки, зварювання, лиття та формування металу. Проаналізовано переваги нейромережових підходів порівняно з традиційними аналітичними методами: здатність моделювати нелінійні залежності між параметрами процесу та показниками якості, адаптивність до змінних умов виробництва та можливість інтеграції в системи контролю реального часу. Розглянуто архітектури CNN, MLP та гібридні моделі CNN-LSTM для задач прогнозування дефектів та моніторингу стану інструменту. Показано, що впровадження нейромережових систем сприяє зниженню відсотка браку, підвищенню стабільності процесів та скороченню витрат на контроль якості.

Ключові слова: нейронні мережі, машинобудування, забезпечення якості, глибоке навчання, CNN-LSTM, моніторинг технологічних процесів, прогнозування дефектів, Індустрія 4.0.

Вступ

Сучасне машинобудівне виробництво характеризується зростаючою складністю технологічних процесів та вимогами до якості продукції. Традиційні аналітичні та емпіричні методи контролю якості нерідко виявляються недостатньо ефективними через нелінійність і багатовимірність технологічних систем. Штучні нейронні мережі (ANN) виявилися надзвичайно ефективними у вирішенні складних задач забезпечення якості та оптимізації, що характеризуються нелійними залежностями та невизначеністю [1]. На відміну від традиційних аналітичних методів, нейронні мережі дозволяють встановлювати функціональні залежності між параметрами процесу та вихідними показниками якості без побудови явних математичних моделей.

Основний матеріал

Одним із найважливіших застосувань нейронних мереж у машинобудуванні є забезпечення якості та оптимізація процесів різання. Багатошарові перцептронні моделі (MLP), навчені на експериментальних наборах даних, демонструють високу точність у прогнозуванні шорсткості поверхні, зносу інструменту та сили різання під час фрезерних операцій з ЧПУ, перевершуючи традиційні регресійні підходи. Аналізуючи дані датчиків - сигнали вібрації, акустичну емісію та струм двигуна шпинделя - моделі ANN виявляють ранні ознаки зносу інструменту в режимі реального часу. Гібридні архітектури CNN-LSTM є особливо ефективними для часових рядів сенсорних даних та прогнозування залишкового ресурсу (RUL), демонструючи суттєво вищу точність порівняно з традиційними методами [2].

Для моніторингу стану інструменту у фрезерних процесах запропоновано підхід на основі CNN, де силові сигнали перетворюються у двовимірні зображення за допомогою безперервного вейвлет-перетворення (CWT) і подаються на вхід згорткової нейронної мережі. Такий підхід дозволяє уникнути ручного виділення ознак і забезпечує точність розпізнавання стану зносу понад 90%, що перевищує результати моделей AlexNet і ResNet при аналогічних умовах [3]. Перетворення у 2D дозволяє нейронній мережі виявляти локальні просторові особливості сигналу, пов'язані зі зносом задньої поверхні різця, що робить метод стійким до шумів і мінливих умов різання.

Конкретні дослідження підтверджують ефективність нейромережових підходів. Застосування мережі зворотного поширення (BPNN) при фрезеруванні на п'ятиосьовому верстаті з ЧПУ показало середньоквадратичну похибку (RMSE) рівну 0,008 — більш ніж удвічі нижчу порівняно з $RMSE=0,021$ методу лінійної регресії [4]. Вхідними параметрами моделі слугували частота обертання шпинделя, швидкість подачі та глибина різання. Такий результат свідчить про здатність нейронних мереж ефективно моделювати нелінійні залежності навіть на невеликих навчальних вибірках, що є типовою ситуацією для реальних виробничих умов.

У технологіях зварювання MIG/MAG та TIG нейронні мережі застосовуються для контролю якості зварного шва через оптимізацію параметрів процесу - струму, напруги та швидкості зварювання. Моделі глибокого навчання в поєднанні з системами комп'ютерного зору аналізують геометрію зварювальної ванни в реальному часі, забезпечуючи адаптивне керування та значно зменшуючи кількість дефектів типу пористості та недостатнього злиття. У процесах лиття моделі ANN на основі прогнозування оптимізують температуру заливки, конструкцію форми та швидкість охолодження, що призводить до поліпшення якості продукції та зниження відсотка браку [5].

Застосування ML у ливарному виробництві досліджено на прикладі реального виробництва алюмінієвих колісних дисків методом лиття під низьким тиском. Показано, що моделі класифікації на основі контрольованого ML, навчені на даних хмарної системи Industry 4.0, здатні ідентифікувати умови процесу, що передують виникненню пористості, навіть за умов низького відсотка браку і великої кількості вимірюваних параметрів [6]. Цей підхід дозволяє виявляти першочергові причини дефектів на основі технологічних даних і коригувати параметри процесу в режимі реального часу, зменшуючи потребу в ручному аналізі.

Системи контролю якості нового покоління інтегрують ANN з технологіями комп'ютерного зору для автоматичного виявлення дефектів поверхні та відхилень розмірів. Такі системи є особливо ефективними для інспекції оброблених поверхонь, аналізу зварювальних швів та виявлення дефектів у литих деталях. Алгоритми машинного навчання здатні передбачати проблеми з якістю ще до їх виникнення, що дозволяє вживати проактивних заходів та суттєво знижувати відсоток браку [7].

Для автоматизованої дефектоскопії зварних з'єднань CNN-моделі з трансферним навчанням (ResNet-18 та ResNet-50) демонструють ефективну класифікацію дефектів рентгенографічних зображень — тріщин, пористості та непроварів — з точністю до 98,67% [8]. Системи, що використовують глибоке навчання, можуть виявляти складні дефекти, які неможливо помітити під час

звичайного візуального огляду. Крім того, їх здатність до донавчання на нових даних без повного перезапуску моделі забезпечує ефективне використання в різних виробничих умовах[9].

У процесах формування металу, таких як прокатка та штампування, нейронні мережі використовуються для прогнозування сил деформації, розподілу напружень та утворення дефектів. Ці моделі допомагають оптимізувати геометрію інструменту, вибрати відповідні режими деформації та мінімізувати дефекти, такі як тріщини та зморшки. Перевагою нейромережевого підходу порівняно з методом скінченних елементів є значно менший час розрахунку, що дозволяє інтегрувати моделі у системи керування в режимі реального часу [10]. Застосування нейронних мереж у системах цифрових двійників дозволяє відтворювати фізичні процеси у віртуальному середовищі та здійснювати адаптивне управління без переривання виробництва. Постійний потік даних з датчиків дає змогу цифровому двійнику прогнозувати майбутню поведінку верстата та завчасно попереджати про відхилення параметрів якості [11].

Висновки

Застосування штучних нейронних мереж у машинобудуванні є дієвим інструментом комплексного забезпечення якості технологічних процесів - від прогнозування дефектів і моніторингу стану інструменту до адаптивного керування параметрами обробки. Інтеграція ANN-моделей у виробничі системи сприяє підвищенню стабільності якості продукції, зниженню відсотка браку та витрат на контроль якості, що робить їх ключовим компонентом Індустрії 4.0. Перспективою подальших досліджень є розробка пояснюваних (XAI) нейромережевих моделей та методів перенесеного навчання для зменшення залежності від обсягу навчальної вибірки.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Wang J. et al. Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications // Journal of Manufacturing Systems. – 2018. – Vol. 48. – P. 144–156. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.01.003
2. Kumar S. et al. Application of ANN in machining processes: A review // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2012.

3. Zhang Y. et al. Tool wear condition monitoring method based on deep learning with force signals // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 10. – P. 4595. – DOI: 10.3390/s23104595
4. Lin W.-C. et al. Prediction and analysis of the surface roughness in CNC end milling using neural networks // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, No. 1. – P. 393. DOI: 10.3390/app12010393
5. Teti R. et al. Advanced monitoring of machining operations // CIRP Annals. – 2010. – Vol. 59, No. 2. – P. 717–739.
6. Uyan T.Ç. et al. Industry 4.0 foundry data management and supervised machine learning in low-pressure die casting quality improvement // International Journal of Metalcasting. – 2023. – Vol. 17. – P. 414–429. – DOI: 10.1007/s40962-022-00783-z
7. Zhang Z. et al. Deep learning for intelligent manufacturing // Journal of Manufacturing Systems. – 2019.
8. Kumaresan S. et al. Deep learning-based weld defect classification using VGG16 transfer learning adaptive fine-tuning // International Journal of Interactive Design and Manufacturing. – 2023. – DOI: 10.1007/s12008-023-01327-3
9. Madhvacharyula A.S. et al. In situ detection of welding defects: A review // Welding in the World. – 2022. – Vol. 66. – P. 611–628. – DOI: 10.1007/s40194-021-01229-6
10. Lee J. et al. Predictive manufacturing systems // Manufacturing Letters. – 2014.
11. Kusiak A. Smart manufacturing // International Journal of Production Research. – 2018. – Vol. 56, No. 1–2. – P. 508–517.

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR QUALITY IMPROVEMENT OF MANUFACTURING PROCESSES IN MECHANICAL ENGINEERING

M.-Y. R. Khanas, V.V. Stupnytskyi

Abstract. *The rapid development of machine learning and artificial intelligence methods opens new opportunities for improving the quality of manufacturing processes in mechanical engineering. This paper examines the application of artificial neural networks (ANN) for quality assurance in machining, welding, casting and metal forming processes. The advantages of neural network approaches over traditional analytical methods are analyzed: the ability to model nonlinear relationships between process parameters and quality indicators, adaptability to variable production conditions and the possibility of integration into real-time control systems. CNN, MLP and hybrid CNN-LSTM architectures for defect prediction and tool condition monitoring tasks are considered. It is shown that the implementation of neural network systems contributes to reducing the defect rate, improving process stability and reducing quality control costs.*

Keywords: *neural networks, mechanical engineering, quality assurance, deep learning, CNN-LSTM, manufacturing process monitoring, defect prediction, Industry 4.0.*

МУЛЬТИАГЕНТНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ БПЛА З РОЗПОДІЛЕНИМ ВІЗУАЛЬНИМ РОЗПІЗНАВАННЯМ ОБ'ЄКТІВ

Шевчук В. С.¹ [ORCID], Клименко С.В.² [ORCID], Петренко О.М.³ [ORCID]

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, аспірант, Україна

²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,

к.т.н., доцент, Україна

³Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,

д.т.н., професор, Україна

Анотація. У роботі проведено дослідження мультиагентної системи керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА) з використанням розподіленого візуального розпізнавання об'єктів на основі сучасних моделей глибинного навчання. Як базову модель використано YOLOv8, адаптовану для роботи на вбудованих обчислювальних платформах FPV-дронів. Основна увага приділяється забезпеченню автономності функціонування системи в умовах втрати, навмисного блокування (радіоелектронного придушення) або спуфінгу сигналів керування та навігації. Запропоновано підхід із використанням попередньо завантажених моделей, сценаріїв та еталонних даних, що дозволяє реалізувати повністю автономний режим роботи БПЛА. Отримані результати підтверджують перспективність застосування мультиагентних підходів для підвищення ефективності та безпеки систем.

Ключові слова. системи керування, БПЛА, YOLOv8, сигнал, обробка даних, зв'язок, інформаційна безпека, GPS-спуфінг, розпізнавання об'єктів, глибинне навчання.

Вступ

Розвиток безпілотних літальних апаратів є одним із ключових напрямів сучасної робототехніки. БПЛА активно використовуються у промисловості, військовій сфері, моніторингу інфраструктури та інших галузях. Водночас виникають суттєві проблеми, пов'язані із забезпеченням надійного управління та інформаційної безпеки. Особливу загрозу становлять атаки на канали управління та навігації, зокрема блокування сигналів або їх підміна [1-6]. Одним із найнебезпечніших сценаріїв є GPS-спуфінг, при якому апарат отримує хибні координати. Це може призвести до втрати керування або

виконання некоректних дій. У зв'язку з цим актуальним є створення систем, здатних функціонувати автономно та приймати рішення без зовнішнього управління.

Основний матеріал

Запропоновано систему керування безпілотними літальними апаратами, реалізовану на основі мультиагентної системи керування, відповідно до якої кожен БПЛА функціонує як автономний інтелектуальний агент і може децентралізовано приймати рішення. Кожен автономний інтелектуальний агент інтегрує сенсорні підсистеми, бортові обчислювальні модулі та засоби міжагентної комунікації, що забезпечують узгоджену поведінку в межах розподіленого середовища.

Для задач візуального розпізнавання об'єктів використано модель глибинного навчання YOLOv8, яка характеризується високою швидкістю та придатністю до обробки даних у реальному часі. Архітектуру моделі модифіковано та оптимізовано з урахуванням обмежень обчислювальних ресурсів вбудованих платформ FPV-дронів, що дозволяє досягти прийняттого балансу між точністю детекції та обчислювальною складністю [1-4].

Архітектура системи є ієрархічно організованою та включає такі функціональні рівні: рівень збору первинних даних, рівень обробки та інтерпретації інформації, рівень прийняття керуючих рішень, а також рівень забезпечення кібер- та функціональної безпеки. Така декомпозиція сприяє підвищенню масштабованості, відмовостійкості та адаптивності системи. Ключовою особливістю запропонованого підходу є використання попередньо завантажених алгоритмів керування та апріорної інформації, що зберігається у бортовій пам'яті БПЛА. Зокрема, до складу таких даних належать цифрові карти місцевості, параметризовані маршрути руху, еталонні образи об'єктів та сценарії поведінки в типових ситуаціях. Це забезпечує можливість повністю автономного функціонування інтелектуальних агентів навіть в умовах втрати або деградації каналів зв'язку з оператором.

У разі виявлення аномалій у навігаційних даних, зокрема ознак спуфінгу супутникових сигналів позиціонування, система ініціює перехід до

альтернативних режимів навігації. Результати експериментального дослідження, проведеного на основі відеоданих, отриманих із реальних бортових систем БПЛА, підтверджують ефективність запропонованих алгоритмічних і архітектурних рішень щодо забезпечення надійного, автономного та безпечного функціонування мультиагентної системи.

Мультиагентна системи забезпечує високий рівень стійкості за рахунок розподілу функцій між автономними агентами. У разі відмови окремого БПЛА інші агенти зберігають працездатність і продовжують виконання поставлених завдань, що свідчить про підвищення надійності системи в цілому. Застосування розподіленої обробки даних дозволяє зменшити час обробки інформації за рахунок локального прийняття рішень. Автономність інтелектуальних агентів істотно знижує залежність від зовнішніх каналів зв'язку, що є критично важливим в умовах їх нестабільності або навмисного впливу.

Порівняльний аналіз із існуючими архітектурами керування демонструє, що запропонований мультиагентний підхід характеризується вищим рівнем стійкості до кіберфізичних атак, відмов окремих компонентів та порушень інформаційної взаємодії, забезпечуючи більш надійне функціонування системи в динамічних і невизначених середовищах.

Висновки

Проведене дослідження підтвердило доцільність застосування мультиагентного підходу для побудови систем керування БПЛА з використанням методів глибинного навчання, зокрема моделі YOLOv8, у задачах розподіленого візуального розпізнавання об'єктів. Реалізація запропонованої архітектури та автономного режиму функціонування забезпечує підвищену стійкість системи до втрати, блокування або спуфінгу сигналів керування і навігації. Встановлено, що використання попередньо завантажених моделей, сценаріїв та еталонних даних сприяє суттєвому підвищенню рівня інформаційної безпеки, а також забезпечує здатність системи до адаптивного функціонування в умовах обмеженої або відсутньої зовнішньої комунікації. Отримані експериментальні результати підтверджують ефективність запропонованих підходів за критеріями надійності, відмовостійкості та оперативності обробки даних та може бути

використана для створення інтелектуальних автономних комплексів БПЛА, орієнтованих на функціонування в складних і динамічних середовищах.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. WANG, Yongzhen; HE, Jiacong. A rapid concrete crack detection method based on improved YOLOv8. IEEE Access, 2025.
2. Lou H. et al. DC-YOLOv8: Small-size object detection algorithm based on camera sensor //Electronics. – 2023. – Т. 12. – №. 10. – С. 2323. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/10/2323>
3. Syzonenko R., Klymenko S., Hnatushenko V. Utilization of cloud infrastructure for dataset markup. – 2025. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-4146/paper25.pdf>
4. V. Hnatushenko, V. Kashtan, O. Kazymyrenko. Information technology for detecting cars on aerial imaging using a modified YOLO-OBb architecture. MoDaST 2025: Modern Data Science Technologies Doctoral Consortium, June, 15, 2025, Lviv, Ukraine, Pp. 293-304. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-4005/paper20.pdf>.
5. GOODFELLOW, Ian, et al. Deep learning. Cambridge: MIT press, 2016. URL: <https://synapse.koreamed.org/pdf/10.4258/hir.2016.22.4.351>.
6. DAIMI, Kevin, et al. (ed.). Computer and network security essentials. Springer, 2018.

MULTI-AGENT UAV CONTROL SYSTEM WITH DISTRIBUTED VISUAL OBJECT RECOGNITION

V. S. Shevchuk, S. V. Klymenko, O. M. Petrenko

Abstract. *This paper presents a study of a multi-agent control system for unmanned aerial vehicles (UAVs) based on distributed visual object recognition using modern deep learning models. YOLOv8 is employed as the baseline model, adapted for deployment on embedded computing platforms of FPV drones. The primary focus is on ensuring system autonomy under conditions of signal loss, intentional jamming (electronic warfare), or spoofing of control and navigation signals. An approach based on the use of preloaded models, behavioral scenarios, and reference data is proposed, enabling a fully autonomous operational mode of UAVs. The obtained results confirm the effectiveness and promise of applying multi-agent approaches to enhance system efficiency and security.*

Keywords: *control systems, UAV, YOLOv8, signal, data processing, communication, information security, GPS spoofing, object recognition, deep learning.*

Секція 1 Системний аналіз і синтез процесів у металургії та машинобудуванні
SECTION 1 System analysis and synthesis of processes in metallurgy and mechanical engineering .. 3

S.V. Adjamsky, G.A. Kononenko, R.V. Podolskyi, O.A. Podolska Influence of nominal layer thickness at close Ved values on the porosity of inconel 718 alloy manufactured by LPBF method Аджамський С.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В., Подольська О.А. Вплив номінальної товщини шару за близьких значень Ved на пористість сплаву inconel 718, виготовленого методом LPBF.....4	4
Yuriy Belokon, Oleksii Hrechanyi, Tetiana Vasilchenko, Oleksandr Sahuliakin Substantiation of the methodology for researching the disintegration energy of intermetallic compounds preparations obtained by thermochemical pressing Белоконь Ю.О., Гречаний О.М., Васильченко Т.О., Сагулякін О. Є. Обґрунтування методики дослідження енергії дезінтеграції заготовок інтерметалідних сполук отриманих термохімічним пресуванням..... 10	10
Serhii Bushtruk, Tetiana Myronova Study of the applicability of a micromechanical strengthening model to AlSi10Mg alloy under additive manufacturing conditions Буштрук С.І. , Миронова Т.М. Дослідження можливості застосування моделі мікромеханічного зміцнення сплаву AlSi10Mg в умовах адитивного виробництва..... 15	15
Oleksii Hrechanyi, Tetiana Vasilchenko, Anton Zanevskyi, Bohdan Obudenikov Analysis of equipment for creating a heat-resistant alloy with reduced density in laboratory conditions Гречаний О.М., Васильченко Т.О., Заневський А. Ю., Обуденіков Б.С. Аналіз обладнання для створення в лабораторних умовах жаростійкого сплаву зі зниженою щільністю..... 21	21
V.G. Zaytsev Problems of managing ground devices using a synergetic approach Зайцев В.Г. Проблеми керування наземними пристроями за допомогою синергетичного підходу 25	25
Lyudmila Ivanova, Vadim Selivorstov, Alexander Khitko, Alexander Belyi System approach to determining the effect of rare-earth metals on the structure of roll cast irons Іванова Л.Х., Селівьорстов В.Ю., Хитько О.Ю., Білий А.П. Системний підхід до встановлення впливу рідкісноземельних металів на структуру валкових чавунів 31	31
V.G. Kislyakov, I.O. Manachyn, O.L. Rudenko, A.A. Pohvalityi High-temperature modeling of the integrated cast iron refining process Кисляков В.Г., Маначин І.О., Руденко О.Л., Похвалітий А.А. Високотемпературне моделювання процесу комплексного рафінування чавуну..... 39	39

Dmytro Kondrashov, Andrew Kupin, Ivan Muzyka, Dmytro Balyk Classification of spatial object states based on height maps using convolutional neural networks for ore sensor sorting systems Кондрашов Д.А., Музыка І.О., Купін А.І., Балик Д.К. Класифікація просторових станів об'єктів на основі карт висот із використанням згорткових нейронних мереж для систем сенсорного сортування руд	43
Serhiy Pasternak Analysis of shear angle and plastic deformation in turning of Ti-6Al-4V titanium alloy at elevated temperatures Пастернак С. М. Аналіз кута зсуву та пластичної деформації при точінні титанового сплаву Ti-6Al-4V за підвищених температур	47
D.Yu. Petryna, A.T. Gleb Critical factors of corrosion-fatigue degradation of 17g1s steel of main gas pipes under conditions of incomplete load of the GTS Петрина Д.Ю., Глеб А.Т. Критичні фактори корозійно-втомної деградації сталі 17г1с магістральних газопроводів в умовах неповного завантаження ГТС	52
Plitchenko S.O., Vakulenko I.O., Kalinina T.V. Features of dynamic strain aging development in carbon steel during reverse loading Сергій Плітченко, Ігор Вакуленко, Тетяна Калініна Особливості розвитку динамічного деформаційного старіння вуглецевої сталі при знакозмінному навантаженні	57
Dmytro Popolov, Ihor Zaselskyi Selection of screen box stiffness using fem to avoid resonant modes Пополов Д. В., Засельський І. В. Підбір жорсткості коробу грохота з використанням fem для уникнення резонансних режимів	62
S.V. Adjamsky, G.A. Kononenko, R.V. Podolskyi, O.A. Podolska Comparative analysis of the microstructure of nickel-based superalloys ABD900 and Inconel 718 fabricated by laser powder bed fusion Аджамський С.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В., Подольська О.А. Порівняльний аналіз мікроструктури нікелевих суперсплавів ABD900 та Inconel 718, виготовлених методом лазерного плавлення в порошковому шарі	68
Pavlo Sazonov, Svitlana Klymenko Application of correction factors to the amplitude of signals reflected from defect simulators in ultrasonic non-destructive testing reference blocks Сазонов П.О., Клименко С.В. Застосування поправочних коефіцієнтів до амплітуди сигналів від відбивачів у мірах дефектів ультразвукового неруйнівного контролю	73
V.R. Kharun Analysis of optical system problems in CO ₂ laser engravers for wood and non-metal cutting and engraving Харун В.Р. Аналіз проблем оптичної системи лазерних CO ₂ граверів при різці та гравіюванні деревини та неметалевих матеріалів	78

Mykhailo Potap, Viktoriia Hnatushenko, Tetiana Selivorstova Research on methods of unification and preprocessing of experimental data to improve the quality of integration into Ai models for roll eccentricity compensation Потап М.О., Гнатушенко Вік.В., Селівьорстова Т.В. Дослідження методів уніфікації та попередньої обробки експериментальних даних для підвищення якості інтеграції в ШІ-моделі компенсації ексцентриситету валків	83
Tetiana Selivorstova Integrated percolation-based approach to modeling interdendritic feeding under pressurized solidification Селівьорстова Т.В. Інтегрований перколяційний підхід до моделювання міждендритного живлення в умовах затвердіння під тиском.....	88
Секція 2 Інформаційні технології в процесах одержання матеріалів із заданими властивостями SECTION 2 Information technologies in the processes of obtaining materials with specified properties	92
Tetiana Balakhanova, Ganna Kononenko, Rostyslav Podolskyi, Maksim Kovzel Application of 3D scanning for determining the parameters of surface damage and deformation after impact-abrasive wear testing Балаханова Т.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В., Ковзель М.А. Застосування 3D сканування при визначенні параметрів руйнування та деформації поверхні після випробувань на ударно-абразивне зношування	93
Mykhailo Zinchenko, Oleg Potap, Volodymyr Shybakynskyi, Andrii Burchak Study of the chistova 800 unit as a target for automation Зінченко М.Д., Потап О.Ю., Шибакінський В.І., Бурчак А.А. Дослідження чистової кліті стана 800 як об'єкту автоматизації	99
M.S. Kovalchuk, S.V. Klymenko. Interactive VR chemistry laboratory for educational purposes Ковальчук М. С., Клименко С.В. Інтерактивна VR-лабораторія з хімії для освітніх застосувань	106
Eduard Oliinyk, Eduard Parusov, Ihor Chuiko Development of a software tool for the design of an efficient drawing process for welding wire made of Low-Carbon Cr-Mo-V steels Олійник Е.В., Парусов Е.В., Чуйко І.М. Створення програмного інструменту для розроблення ефективної технології волочіння зварювального дроту з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей	1140
Daria Togobitska, Iryna Povorotnia, Volodymyr Kuksa, Nadiya Khodotova Prediction of the fusibility of special steels based on the concept of directed chemical bonding Тогобицька Д.М., Поворотня І.Р., Кукса О.В., Ходотова Н.Є. Прогнозування плавкості спеціальних сталей на основі концепції спрямованого хімічного зв'язку	116

Oleksandr Bobukh, Vitalii Ziatina Improvement of the angular pressing process for bimetallic profiles Бобух О.С., Зятіна В.І. Удосконалення процесу кутового пресування біметалевих профілів.....	122
Секція 3 Математичне моделювання та проектування складних систем SECTION 3 Mathematical modeling and design of complex systems	127
Iryna Dmytriieva, Andrii Dmytrenko Methods for the automated preliminary processing of 3D seismic data Дмитрієва І.С., Дмитренко А.М. Методи автоматизованої передобробки 3D сейсмічних даних	128
Volodymyr Bakhrushyn, Oleksii Bakhrushyn The use of artificial intelligence tools in data analysis and study programs development in metallurgy Бахрушин В.Є., Бахрушин О.В. Застосування інструментів штучного інтелекту для аналізу даних та проектування освітніх програм з металургії	136
Y. Vieskov, S. Dovgyi, D. Redchyts Numerical study of the wake structure behind an oscillating circular cylinder at low reynolds numbers Весков Є.В., Довгий С.О., Редчиць Д.О. Чисельне дослідження структури сліду за круговим циліндром, що коливається, при низьких числах Рейнольдса	141
Hnylytsia I. D. Model of the effect of stress state on the growth of elongated grains β -Si ₃ N ₄ during high-temperature deformation of silicon nitride-based ceramics І.Д. Гнилиця Модель впливу напруженого стану на ріст видовжених зерен β -Si ₃ N ₄ при високотемпературній деформації кераміки на основі нітриду кремнію	147
T.S. Golub, L.S. Molchanov, O.M. Minai Research of gas-hydrodynamic features of blowing through a coaxial-type slot nozzle Голуб Т.С., Молчанов Л.С., Мінай О.М. Дослідження газо-гідродинамічних особливостей продувки крізь щілинне сопло коаксiального типу	151
O.M. Hryshyn, A.A. Nadtochii, R.M. Huba Regularities of the behavior of micro-particles of strengthening phases during electrosag remelting of high-entropy alloys Гришин О.М., Надточій А.А., Губа Р.М. Закономірності поведінки мікрочастинок зміцнювальних фаз при електрошлаковому переплаві високоентропійних сплавів	158
Kyrylo Dorohokuplia, Vadym Andriushchenko Comparative analysis of bionic algorithms optimization parameters of filters for denoising images with impulse noise Дорогокупля К.О., Андрющенко В.О. Порівняльний аналіз біонічних алгоритмів оптимізації параметрів фільтрів для знешумлення зображень із імпульсним шумом	164

Andriy Dukach, Hanna Rudakova, Valentyn Polishchuk Analysis of control methods for thermal processing of canned fruits and vegetables in vertical autoclaves Дукач А.Ю., Рудакова Г.В., Поліщук В.М. Аналіз методів керування процесів термічної обробки плодоовочевих консервів у вертикальних автоклавах	170
Andrii Zavhorodnii, Oleksandr Ivanov Transformation of the debugging learning environment in the era of github copilot: how to maintain learning effectiveness? Завгородній А.Д., Іванов О.П. Трансформація навчального середовища з налагодження в епоху github copilot: як зберегти ефективність навчання?	179
Illia Zinchenko, Oleksandr Radul, Oksana Liashenko Design of cryptocurrency price dynamics forecasting system based on technical analysis methods and artificial intelligence Зінченко І.О., Радуль О.А., Ляшенко О.А. Проектування системи прогнозування динаміки цін криптовалют на основі методів технічного аналізу та штучного інтелекту	184
Dmytro Karpovskiy, Viktor Shynkarenko Cohesion as a technological quality indicator in the development and modification of complex systems Карповський Д.О., Шинкаренко В.І. Технологічний показник якості розробки та модифікації складних систем - зв'язність	189
I.V. Klymenko, Y.A. Lebid The assessment of impact of pre-filtering on retrieval quality in rag systems with vector search Клименко І.В., Лебідь Є.А. Оцінка впливу попередньої фільтрації на якість вибірки в rag-системах з векторним пошуком.....	194
Adrian Kozhanov, Maksym Ievlanov, Dmytro Moroz improvement of the method for solving the task of early identification of information system configuration items Кожанов А.Є., Євланов М.В., Мороз Д.М. Вдосконалення методу вирішення задачі ранньої ідентифікації конфігураційних елементів інформаційної системи	201
Vitaliy Korendiy, Maksym Durniak, Ihor Kryvuliak, Bohdan Markovych Development and analysis of the bionic hand prosthesis concept Корендій В.М., Дурняк М.Р., Кривуляк І.І., Маркович Б.М. Розроблення та аналіз концепції біонічного протезу кисті	207
Vitaliy Korendiy, Mykhailo Tys, Oleksandr Vyshnevskiy, Bohdan Markovych BIOMECHANICAL MODELING OF THE PELVIS-FOOT MODULE OF A PASSIVE EXOSKELETON Корендій В.М., Тис М.А., Вишневський О.І., Маркович Б.М. Біомеханічне моделювання тазово-стопового модуля пасивного екзоскелета.....	214

Anatolii Kosolap Modeling of optimal resource allocation problems Косолап А.І. Моделювання задач оптимального розподілу ресурсів	222
Oleksii Kuropiatnyk Design of energy efficient belt conveyors Куроп'ятник О. С. Проектування енергоефективних стрічкових конвеєрів	227
Bohdan Kushnir, Oleksandr Ivanov Lack of attention of the scientific community to API problems in the era of microservice architecture Кушнір Б.Т., Іванов О.П. Дефіцит уваги наукової спільноти до проблематики API в епоху мікросервісної архітектури	235
Lapkhanov E.O., Kabachenko D.V. Challenges in the efficiency analysis of high-tech long-term investment projects under modern stochastic economic conditions Е.О. Лапханов, Д. В. Кабаченко Проблеми аналізу ефективності високотехнологічних довгострокових інвестиційних проектів у сучасних умовах стохастичного економічного середовища	240
Vadym Andriushchenko, Anton Lebedenko Automated reconstruction of production grammars based on structural analysis of mathematical formulas in latex format Андрющенко В.О., Лебеденко А.В. Автоматизоване відновлення продукційних граматики на основі структурного аналізу математичних формул у форматі latex	246
Mykhailo Lenskyi, Hanna Mykhalchuk BRANCH-CUT-AND-PRICE algorithm for the exact solution of the vehicle routing problem with capacity constraints Ленський М.М., Михальчук Г.Й. Алгоритм BRANCH-CUT-AND-PRICE для точного розв'язання задачі маршрутизації транспортних засобів з обмеженнями на вантажопідйомність	250
O. Makarov, V. Shynkarenko Sorting algorithms formation by means of constructive- synthesizing modeling and genetic algorithm Макаров О. В., Шинкаренко В.І. Формування алгоритмів сортування засобами конструктивно-продукційного моделювання та генетичного алгоритму	255
Ivan Manachyn, Volodymyr Yelisyeyev, Volodymyr Kysliakov, Mariya Rybalchenko Development of a model of immersion of reagent particles with gas into the melt during injection outside-furnace desulfurization of cast iron Маначин І.О., Єлісейєв В.І., Кисляков В.Г., Рибальченко М.О. Розробка моделі занурення частинок реагенту з газом у розплав при інжекційній позапічній десульфурації чавуну	261

Serhii Miamlin

Improvement of the design of freight cars bogies for international communication

Мямлін С.С.

Удосконалення конструкції візків вантажних вагонів для міжнародного сполучення 267

Tetiana Nadryhailo, Olha Bohdanenko

Improvement of the mathematical model of the motion of solid particles in liquid flow

Надригайло Т.Ж., Богданенко О.С.

Удосконалення математичної моделі руху твердих частинок у потоці рідини.....271

Yurii Novitskyi, Maksym Novitskyi

Prospects for the use of a dry friction damper in metal-cutting tools

Новіцький Ю. Я., Новіцький М. Я.

Перспективи використання демпфера сухого тертя в металорізальному інструменті.....276

Ye. S. Panasenko

Processing of electroencephalogram signals considering the dipole nature of brain signals and prospects of Neural ODE modeling

Панасенко Є.С.

Обробка сигналів електроенцефалограм з урахуванням дипольної природи сигналів мозку та перспективи моделювання Neural ODE.....283

Sergei Panteikov

Mathematical model of pig iron formation kinetics in reducing iron from hematite using solid carbon

Пантейков С.П.

Математична модель кінетики процесу отримання чавуну при відновленні заліза з гематиту твердим вуглецем.....287

Mykhailo Peremitko, Tetiana Nadryhailo

The role of javascript Interface in the modular organization and rendering of React native

Перемітько М.В., Надригайло Т.Ж.

Роль javascript Interface у модульній організації та рендерингу React native.....295

Oleksandr Rudyk, Viacheslav Kharzhevskyi

The usage of computer-aided design systems for modeling complex systems and technological processes for the restoration and reinforcement of parts

Рудик О.Ю., Харжевський В.О.

Використання систем автоматизованого проектування для моделювання складних систем та технологічних процесів відновлення та зміцнення деталей 299

Tetiana Rusakova

Analysis and prediction of dust pollution in atmospheric air from quarry mining

Русакова Т.І.

Аналіз та прогнозування пилового забруднення атмосферного повітря від кар'єрних розробок 306

D. Stepanenko, A. Bielkova, D. Togobitska, A. Bocharov

Predicting the viscosity of chromium-containing slags using parameters of interatomic interactions in melts

Степаненко Д.О., Белькова А.І., Тогобицька Д.М., Бочаров А.В.

Прогнозування в'язкості хромовмісних шлаків з використанням параметрів міжатомної взаємодії в розплавах 313

Vasyl Stepkin, Mykola Ivashchenko, Pavlo Shpachuk Research into methods of controlling an asynchronous motor on a mathematical model of a training stand in the tia portal siemens software Стьопкін В.В., Іващенко М.А., Шпачук П.Р. Дослідження способів керування асинхронним двигуном на математичній моделі навчального стенду в програмному забезпеченні Tia Portal Siemens	319
Vadym Andriushchenko, Dmytro Tanasiienko Constructive model for generating Dag structures of workloads Андрющенко В. О., Танасієнко Д. О. Моделювання Dag-структур робочих навантажень	326
Tarasov Serhii, Molotkov Oleh Load distribution on the wind turbine rotor's rotation stabilization channels, controlled by changes in its configuration and generator braking torque Тарасов С.В., Молотков О.Н. Розподіл навантаження на канали стабілізації обертання ротора вітрової турбіни, керованого змінами її конфігурації і гальмівного моменту генератора	332
Dmytro Kononov, Anzor Tsikolia Research of stress-strain state and fatigue strength evaluation of a ladle turret column Кононов Д.О., Ціколія А.З. Дослідження напружено-деформованого стану та оцінка втомної міцності колони поворотної турелі мблз	338
O. Cherniavskiy, S. Dolgoplov, S. Shevchenko Mathematical modeling of complex dynamic processes during liquid-propellant rocket engines start-up Чернявський О.С., Долгополов С.І., Шевченко С.А. Математичне моделювання складних динамічних процесів при запуску рідинних ракетних двигунів	342
Yuriy Polissky On one approach to creating an efficient algorithm for performing a complex operation in the system of residue classes Поліський Ю.Д. Про один підхід до створення ефективного алгоритму виконання складної операції у системі залишкових класів	348
Volodymyr Myrhorod, Iryna Hvozdeva, Gennadiy Grama New algorithms for logic-dynamic control of a high-capacity wind power plant Миргород В.Ф., Гвоздева І.М., Грама Г.П. Нові алгоритми логіко-динамічне управління вітроенергетичною установкою значної потужності	351
Секція 4 Інтелектуальні інформаційно-управляючі системи та проблеми інформаційної безпеки SECTION 4 Intelligent information management systems and information security issues.....	359

Mykola Bubnov, Volodymyr Hnatushenko, Viktoriia Hnatushenko Explainable ai approaches for satellite image interpretation Бубнов М.С., Гнатушенко В.В., Гнатушенко Вік.В. ШІ-підходи пояснення супутникових знімків	360
Sofiia Burimova, Hanna Mykhalchuk Development of a high-load pipeline for transferring marine traffic data from source to end user in real time Розроблення високонавантаженого конвеєра передачі даних морського трафіку від джерела до кінцевого користувача в режимі реального часу С.К. Бурімова, Г.Й. Михальчук.....	365
Maksym Butov, Olena Kuropiatnyk Information and communication system for applicants Бутов М.В., Куроп'ятник О.С. Інформаційно-комунікаційна система для абітурієнтів	372
Yevhenii Velehura , Vadym Horiachkin Ensuring data integrity in freight transportation systems with unstable connectivity: Dag-based ledger as a tool for deferred synchronization Велегура Є.А., Горячкін В.М. Забезпечення цілісності даних у системах вантажних перевезень з нестабільним з'єднанням: Dag-реєстр як інструмент відкладеної синхронізації.....	379
Oleksandr Halushka, Viktor Shynkarenko Decomposition of ontologies and knowledge graphs via zero-order relations Галушка О.В., Шинкаренко В.І. Декомпозиція онтологій та графів знань через відношення нульового порядку.....	384
Polina Hlazunova, Yurii Oliinyk Creating three-dimensional game levels based on the reconstruction of aerial photographs Глазунова П.А., Олійник Ю.О. Створення тривимірних ігрових рівнів на основі реконструкції аерофотознімків	388
Vitalii Gorbatov, Anna Zhurba Risks of using network intrusion detection systems as a source of training labels for neural networks Горбатов В.С., Журба А.О. Ризики використання систем виявлення мережевих вторгнень як джерела навчальних міток для нейромереж.....	393
Artem Husiev, Viktoriia Klym Issues of improving the efficiency of embedded control systems with a computer vision module Гусев А.Ю., Клим В.Ю. Проблеми підвищення ефективності вбудованих систем керування з модулем комп'ютерного зору	397
Valerii Dymo, Aleksandr Gozhyj Improvement of U-Net model segmentation with account of uncertainty Димо В.В., Гожий О.П. Покращення сегментації моделі U-Net з урахуванням невизначеності	401

Eduard Dovydovskyi, Anton Guda, Tetiana Seliverstova Conceptual foundations of anomaly detection in industrial information systems using machine learning Довидовський Е.О., Гуда А.І., Селівьорстова Т.В. Концептуальні основи виявлення аномалій у промислових інформаційних системах з використанням машинного навчання.....	406
M. Berezuk, A. Guda Creating a crisis-dependent dataset for Adaptive Irm Березюк М.О., Гуда А.Ю. Створення кризово-залежного датасету для Adaptive Irm	410
Maksym Ievlanov, Viktor Shutko Use of artificial intelligence tools in cloud migration of information systems planning Євланов М.В., Шутько В.В. Використання засобів штучного інтелекту в плануванні хмарної міграції інформаційних систем	415
D.V. Ivashchev, V.V. Herasymov Statistical analysis of telemetry data of shunting locomotives Іващев Д.В., Герасимов В.В. Статистичний аналіз телеметричних даних маневрових тепловозів	421
Iryna Dmytriieva, Dmitry Bimalov Methodology for the remote detection of landmines using radar technologies Дмитрієва І.С., Бімалов Д.В. Методологія дистанційного виявлення наземних мін з використанням радіолокаційних технологій.....	426
Yurii Kavats, Olena Kavats, Tatjana Fenenko, Dmytro Roi Mathematical models for monitoring the dynamics of changes and pollution of water bodies based on satellite data Кавац Ю.В., Кавац О.О., Фененко Т.М., Рой Д.М. Математичні моделі моніторингу динаміки змін та забруднення водних об'єктів на основі супутникових даних	431
Kavats O.O., Sergieieva K.L., Matselyukh T.B. Application of the goldenram Ai platform for monitoring mining activities using earth observation data О. Кавац, К. Сергєєва, Т. Мацелюх Застосування Ai-платформи goldenram для моніторингу гірничодобувної діяльності з використанням даних дистанційного зондування землі	437
B. Kiselov, A. Senko, A. Kupin, D. Balyk Questions of determining the minimum sufficient training sample size for machine learning models Кісельов Б.Г., Сенько А.О., Купін А.І., Балик Д.К. Питання визначення мінімально достатнього обсягу навчальної вибірки для моделей машинного навчання	4452

Klymchuk V.V., Ptashnyk V.V. Architectural patterns of IOT systems in smart agriculture Владислав Климчук, Вадим Пташник Архітектурні патерни побудови IOT-систем у розумному сільському господарстві	447
Yehor Lytvynov, Volodymyr Hnatushenko, Viktoriia Hnatushenko Use of historical data to improve the accuracy of illegal landfill detection in remote sensing imagery Литвинов Є.В., Гнатушенко В.В., Гнатушенко Вік.В. Використання історичних даних для підвищення точності виявлення сміттєзвалищ на аерокосмічних знімках	4593
Stanislav Maliienko, Tetiana Selivorstova Application of machine learning methods for anomaly detection in network traffic Малієнко С.Є., Селівьорстова Т.В. Застосування методів машинного навчання для виявлення аномалій у мережевому трафіку ..	460
Andrii Melnyk, Volodymyr Pavlovskyi Methods of intelligent video stream analysis for automated extraction of structured data from osd interfaces Мельник А.А., Павловський В.І. Методи інтелектуального аналізу відеопотоків для автоматизованого вилучення структурованих даних з osd-інтерфейсів	465
Valerii Nosov, Kateryna Ostrovska Methodology of dataset preparation for training e-commerce fraud detection models Носов В.О., Островська К.Ю. Методологія підготовки датасету для навчання моделей виявлення шахрайства в електронній комерції	469
Y. Pertsev, L. Korotka Integration of fuzzy logic into the Timegan generative adversarial network for financial time series forecasting Перцев Ю.О., Коротка Л.І. Інтеграція нечіткої логіки в генеративно-змагальну мережу Timegan для прогнозування фінансових часових рядів	4794
Oksana Polyvoda, Illia Nazmieiev Mathematical model for acoustic signal identification in the mel-frequency cepstral domain Поливода О.В., Назмєєв І.О. Математична модель ідентифікації акустичних сигналів у мелкепстральному просторі.....	480
Poliakov O.M. Large language models as a routing layer in multi-channel messenger systems О.М. Поляков Застосування великих мовних моделей як шару маршрутизації у багатоканальних месенджер-системах	486

Pavlo Ponomarenko, Liliia Bozhukha Protocol for dynamic adaptation of message information density in multi-agent systems based on large language models Пономаренко П. А., Божуха Л.М. Протокол динамічної адаптації інформаційної щільності повідомлень у мультиагентних системах на основі великих мовних моделей	490
Prokopchuk Yurii The intertwined nature of simplicity and complexity: a new paradigm for understanding complex adaptive / autonomous / living self-improving smart systems Юрій Прокопчук Взаємозв'язок простоти та складності: нова парадигма розуміння складних адаптивних / автономних / живих інтелектуальних систем, що самовдосконалюються	495
Volodymyr Riabenko Problems of optimizing machine learning models for continuous protection of corporate information systems Рябенко В.І Проблеми оптимізації моделей машинного навчання для безперервного захисту корпоративних інформаційних систем	505
Oleksandr Samuskov, Kateryna Ostrovska Intelligent method for monitoring and resource optimization of IT infrastructure based on machine learning Самуськов О.Д., Островська К.Ю. Метод інтелектуального моніторингу та оптимізації ресурсів ІТ-інфраструктури на основі машинного навчання	508
Yu.S. Semenov Methodological and informational principles of decision support systems for controlling the charging mode and the blow distribution across the blast furnace tuyeres Семенов Ю.С. Методологічні та інформаційні засади систем підтримки прийняття рішень щодо управління режимом завантаження шихти та розподілом дуття по фурмах доменної печі	513
Syzonenko R., Klymenko S. Cybersecurity on EDGE-devices Р.М. Сизоненко, С.В. Клименко Кібербезпека на EDGE-пристроях	521
S.K. Simakin, L.M. Bozhukha Comparative analysis of lexical and semantic search in multilingual media aggregation web services Сімакін С.К., Божуха Л.М. Порівняльний аналіз лексичного та семантичного пошуку у багатомовних вебсервісах агрегації медіаконтенту	525
Yurii Kavats, Olena Kavats, Mykyta Oleksienko Analysis of methods for soil moisture water balance using satellite data Кавац Ю.В., Кавац О.О., Олексієнко М.А. Аналіз методів водного балансу вологості ґрунтів за супутниковими даними	530

Oleksii Fedorenko, Klym Viktoriia Research on the heterogeneity of air quality analysis data Федоренко О.Д., Клим В.Ю. Дослідження неоднорідності даних аналізу якості повітря	536
Nadiia Fedoriatska, Viktoriia Klym The task of monitoring reliability parameters in an industrial IoT management system Федоряцька Н.І., Клим В.Ю. Задача моніторингу параметрів надійності в системі управління промислового IoT	540
M.-Y. R. Khanas, V.V. Stupnytskyi Application of neural networks for quality improvement of manufacturing processes in mechanical engineering Ханас М.-Ю.Р., Ступницький В.В. Застосування нейронних мереж для підвищення якості технологічних процесів у машинобудуванні	546
V. S. Shevchuk, S. V. Klymenko, O. M. Petrenko Multi-agent uav control system with distributed visual object recognition Шевчук В.С., Клименко С.В., Петренко О.М. Мультиагентна система керування бпла з розподіленням візуальним розпізнаванням об'єктів	551