

Міністерство освіти і науки України

Системні технології

System technologies

3 (158) 2025

Регіональний міжвузівський збірник наукових праць

Засновано у січні 1997 року.

У випуску:

- ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА ОРГАНІЗАЦІЯ СУЧАСНОГО ВИРОБНИЦТВА**
- МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ**
- СИСТЕМНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ
ТА КІБЕРБЕЗПЕКА**

Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. –
Випуск 3 (158). - Дніпро, 2025. – 233 с.
ISSN 1562-9945 (Print).
ISSN 2707-7977 (Online).

Редакційна колегія випуску:

Алпатов А.П. - д.т.н., проф. (відп. редактор)
Архипов О.Є. - д.т.н., проф.
Білозьоров В.Є. - д.ф.-м.н., проф.
Бабічев С.А. (Чеська Республіка) - д.т.н., доц.
Єрьомін О.О. - д.т.н., проф.

Прогресивні інформаційні
технології та організація
сучасного виробництва

Гече Ф.Е. - д.т.н., проф., (відп. редактор)
Гуда А.І. - д.т.н., проф.
Гнатушенко Вік.В. - д.т.н., проф.
Кіріченко Л.О. - д.т.н., проф.

Математичне
та програмне забезпечення
інтелектуальних систем

Гнатушенко В.В. - д.т.н., проф., (відп. редактор)
Гожий О.П. - д.т.н., проф.
Светличний Д.С. (Польща) - д.т.н., проф.
Хандецький В.С. - д.т.н., проф.

Системні технології обробки
інформації
та кібербезпека

Збірник друкується за рішенням Вченої Ради
Українського державного університету науки і технологій
від 29.01.2025 р., № 7

Адреса редакції: 49600, Дніпро, пр. Науки, 4
Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»
кафедра Інформаційних технологій та систем.
Тел. +38(097)6854525
E-mail: st@nmetau.edu.ua
<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st>

© Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»,
ІВК «Системні технології», 2025

В.Є. Білозьоров, В.Г. Зайцев, О.В. Погорєлов, О.Л. Хижа
**ПРОБЛЕМИ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОЕНЦЕФАЛОГРАМ
МЕТОДАМИ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ**

Анотація. У статті розглядається питання використання методів нелінійної динаміки та проблеми аналізу інформації, що надана у вигляді даних часових рядів електроенцефалограм знятих з пацієнту. Надано огляд наукових досягнень та проблем що мають місце. Показано, що використання рекурентної діаграми (recurrence plots, RP) має суттєві недоліки, які пов'язані з візуалізацією інформації на екрані монітору комп'ютера, тому запропоновано наступний крок дослідження - обрахування чисельних показників RP. Наведені обраховані показники RP дозволили здійснити типізацію отриманих даних та визначити тип якій отримав назву «HEALTHY-RP», що відрізняє епілептичні та не епілептичні типи EEG. Надана типізація обробленої інформації різних баз з використанням показників Херста.

Ключові слова: рекурентний аналіз, електроенцефалографія, рекурентна діаграма, параметр затримки, розмірність простору вкладення, JRQA аналіз, показник Херста.

Вступ і мета. Велика кількість монографій, доповідей, конференцій присвячена проблемам виявлення та прогнозування неврологічного розладу – епілепсії, що характеризується раптовими нападами сенсорного збудження, пов'язаними з аномальною електричною активністю головного мозку [1-5]. Завдання, яке досі не вирішене, полягає у прогнозі наступного нападу. Система виявлення нападів на основі електроенцефалограми (EEG) є методом неінвазивної діагностики рефракційної епілепсії. З огляду на нелінійний характер сигналів EEG багато дослідників використовують методи нелінійної динаміки. У багатьох роботах пропонуються використання методу рекурентних діаграм (RP), для отримання характеристик EEG, а чисельні параметри рекурентних діаграм (JRQA), пропонуються застосовувати для завдань класифікації інформації EEG як предиктальні, іктальні та нормальні класи [16-20].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [6] представлений систематичний огляд виявлення епілептичних нападів на основі EEG за допомогою машинного/глибокого навчання. З цього огляду випливає, що методи, використані в дослідженнях, представили наступні результати з відповідними помилками і обмеженнями:

- 2D-CNN моделі для виявлення нападів - 96%;
- моделі LSTM-RNN для виявлення нападів -96%;
- моделі CNN-RNN для виявлення нападів – 94%.

Автоенкодер (АЕ) – це модель машинного навчання без вчителя, яка представляє різні входні параметри та працює з функцією (стиснення, декомпресія) у поєднанні з нейронною мережею дала такі результати:

- моделі АЕ для виявлення нападів -95%;
- моделі SVM для виявлення нападів -97%;
- моделі KNN для виявлення нападів - 98%.

При використанні нейронних мереж і машинного навчання потрібно підбирати найменшу підмножину ознак для зниження складності моделі. Показано, що аналіз головних компонент (КРСА) є відповідним методом нелінійного скорочення для вибору ознак. КРСА має такі основні переваги перед іншими методами вибору ознак:

- 1) успішно обробляються нелінійні дані;
- 2) не потрібна нелінійна оптимізація;
- 3) розрахунки КРСА дуже прості і схожі на звичайні розрахунки РСА;
- 4) кількість РСА не потрібно встановлювати перед моделюванням [28].

Відмітимо, що КРСА є відповідним методом кодування для даних з нелінійною структурою багатовидів. Він широко використовується в різних наборах даних, включаючи прикладні дані про здоров'я, дані датчиків і зображення обличчя.

Виходячи з огляду робіт, слід зазначити, що в діагностиці епілептичних випадків проблеми можна узагальнити наступним чином:

а) перша проблема полягає в тому, що великі набори даних про напади в даний час недоступні для широкої перевірки запропонованих моделей машинного навчання/DL для виявлення та класифікації епілепсії;

б) багато наборів даних включають лише конкретні фрагменти сигналів ЕЕГ, що недостатньо для додатків, де виявлення має ґрунтуватися на реальних сигналах у реальному часі;

в) оскільки для належної валідації моделі машинного навчання для виявлення та класифікації епілептичних нападів необхідна велика кількість наборів даних, було докладено багато зусиль для об'єднання наявних наборів даних ЕЕГ для цієї мети. Однак все ще складно об'єднати ці набори даних, оскільки вони мають різні параметри та були отримані за відносно різних умов вибірки [28];

г) моделі машинного/глибокого навчання вимагають значних обчислювальних ресурсів для їх реалізації в практичному середовищі;

е) для дослідників, які працюють над виявленням та прогнозуванням епілептичних нападів, особливо в країнах з низьким та середнім рівнем доходу, доступ до високопродуктивних апаратних ресурсів для впровадження моделей глибокого навчання часто є ключовою проблемою. Незважаючи на те, що Google надає потужні обчислювальні сервери (платформа Google Colab тощо), все ще існують обмеження щодо обсягу даних, що передаються на такі сервери, і часу, необхідного серверам для виконання завдань.

У роботі [21] була проведена класифікація епілептичних нападів з використанням рекурентних графіків та методів машинного навчання. У [22] пропонується виявлення

епілепсії з використанням згорткової нейронної мережі, в [23] представлений огляд виявлення епілепсії за допомогою зрозумілого штучного інтелекту, в [24] описано виявлення епілептичного нападу за даними сигналу ЕЕГ з використанням алгоритмів машинного навчання з оптимізацією гіперпараметрів, в [25] розглянуто багатокласову класифікацію розумового навантаження на основі fNIRS з використанням рекурентних діаграм і CNN-LSTM, у [26] запропоновано аналіз сигналів ЕЕГ для виявлення нападів з використанням графіків повторюваності та моментів Чебічефа, в [27] запропонована класифікація епілептичних нападів на основі підходу пріоритету гладкості з використанням ІНМереж.

Основний матеріал дослідження. У роботі [7] розглянуто використання методу нелінійного рекурентного аналізу до проблеми типізації інформації, що надана у вигляді часових рядів електроенцефалограм знятих з пацієнту. Описано методика визначення схованої інформації для цього ряду та її використання для побудови відповідної рекурентної діаграми (recurrence plots, RP) у точки знімання інформації. Показано, що використання RP має суттєві недоліки, які пов'язані з візуалізацією інформації на екрані монітору комп'ютера, тому запропоновано наступний крок дослідження - обрахування чисельних показників RP. Їх обрахування потрібно здійснити для кожної точки знімання інформації, в якості яких було запропоновано узяти точки (O1, O2, Pz) - це праве та ліве потиличне та тім'яне відведення. Для отримання чисельних значень показників RP пропонувалося використовувати середовище Матлаб та розроблений для цього пакет srptools [16]. Наведені обраховані чисельні показники JRQA аналізу дозволили здійснити типізацію отриманих даних та визначити тип якій отримав назву «HEALTHY-RP», що відрізняє епілептичні та не епілептичні типи ЕЕГ. У роботі, прийнято для пацієнту, що має епілептичні захворювання це можуть бути:

- преіктальний (перед нападом) – період, що характеризується появою помітних відхилень від нормального стану;
- іктальний (власне сам напад) – наявні характерні прояви патологічної активності мозку;
- постіктальний (після нападу) – загасання патологічної активності;
- інтеріктальний (між нападами) – відсутні прояви патологічної активності.

Отримані результати в роботі [7] були порівняні з обробленими даними ЕЕГ з бази даних [14] Боннського університету. Після отримання із файлів С-бази даних JRQA показників було виконано додатково розрахунок показника Херста. Після цього для отриманих даних було виконано кластеризацію. Кількість кластерів, отримане для цієї бази даних, дорівнює 4 (перед нападом), а в таблиці 1 представлені їх мінімальні та максимальні значення показника Херста. Проведено порівняння розподілу інформації (файлів) за кластерами для показників Херста та основними JRQA показниками показало незначну їхню розбіжність для певної кількості кластерів.

Зауважимо, що для розрахунку параметрів JRQA показників необхідний ретельний вибір та розрахунок значень розмірності простору вкладення (m), параметра затримки (τ), вибір значення порога (threshold) для RP, які суттєво впливають на результати візуалізації, розрахунку та подальшого аналізу.

Таблиця 1

Значення показників Херста кластерів С-бази

Кластер	3	1	2	0
min	0.70298	0.75400	0.79534	0.83513
max	0.73568	0.79008	0.80484	0.88390

Далі було виконано обробку даних D-бази (після нападу) та розрахунок показника Херста. Для цього випадку було обчислено середні значення метрик показників, які представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняння середніх значень показників кластерів бази D

Кластер	RR	DET	L	TT	ENTR	Херст
1	0.0284	0.4957	6.2538	113.4272	2.6548	0.7569
2	0.1377	0.4988	32.1135	550.7158	4.2988	0.8643
3	0.0736	0.4982	10.1015	288.9781	3.0851	0.7637
4	0.0466	0.4971	7.8728	179.6339	2.9104	0.7879
5	0.0226	0.4942	5.1091	88.0179	2.3352	0.7751

Крім цього, слід зазначити розбіжність інформації здорових пацієнтів баз А та В і представленої у роботі [7].

Висновки. Таким чином, досвід обробки інформації ЕЕГ, з урахуванням результатів представлених у [6], дозволяє стверджувати, що успіхів у напрямку прогнозування нападу епілепсії поки що немає. Досягнуто гарний прогрес у напрямі обробки ЕЕГ із метою класифікації їхньої інформації. Далі потрібно провести аналіз розподілу кластерів по значенню показника Херста та визначитися у отриманій ієрархії з точки зору стану пацієнтів кластеру. Поки отримати таку інформацію не має можливості. Однак прогрес у визначенні прогнозування дати нападу визначатиметься пошуком методів стиснення інформації ЕЕГ, типу показників JRQA аналізу або методами подібними до КРСА, які використовують у моделях машинного/глибокого навчання. Штучний інтелект без вибору та пропозиції йому відповідної математичної моделі поки що нам не допоможе. Це може бути досягнуто при стисканні та аналізі реальних даних ЕЕГ нелінійними методами, шляхом пошуку прихованого від нас іншого показника або показників інформації та можливої їх залежності від поведінки іншого невідомого поки показника пацієнту.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. World Health Organization, (2016, February), Epilepsy [Online]. Available: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs999/en/>
2. Modadugu Sahithi. (2016, June, 3). Mental Illness: Overview and Status in India [Online]. Available: <http://healthminds.in/blog/mental-illnessoverview-status-in-india/>
3. Perlmutter, David. Brain Maker: The Power of Gut Microbes to Heal and Protect Your Brain-for Life. Hachette UK, 2015.

4. Allison, Brendan Z., Elizabeth Winter Wolpaw, and Jonathan R. Wolpaw. "Brain-computer interface systems: progress and prospects," Expert review of medical devices, vol. 4, pp. 463-474, 2007.
5. T. M. Vaughan et al., "Brain-computer interface technology: a review the second international meeting," in IEEE Trans. on Neural Syst. And Rehabil. Eng., vol.11, pp. 94-109, Jun. 2003.
6. Ijaz Ahmad, Xin Wang ,Mingxing Zhu, Cheng Wang, Yao Pi, Javed Ali Khan, Siyab Khan, Oluwarotimi Williams Samuel, Shixiong Chen, Guanglin Li. EEG-Based Epileptic Seizure Detection via Machine/Deep Learning Approaches: A Systematic Review //Computational Intelligence and Neuroscience Volume 2022, Article ID 6486570, 20 pages <https://doi.org/10.1155/2022/6486570>.
7. Bilozorov V.Ie. Vykorystannia metodu nelineinoho rekurentnoho analizu do typizatsii danykh chasovykh riadiv elektroentsefalohrafii. V.Ie. Bilozorov, V.H. Zaitsev, O.V. Pohorielov, O.L. Khyzha // Systemni tekhnolohii. Rehion. mizhvuz. zbir. nauk. prats. - D.: - vyp. 2 (145), 2023. - s.82-104.
8. Belozyorov V.Ye., Zaytsev V.G. Influence of the recurrence threshold and the delay parameter of a time series on the information content of its recurrent diagram (on the examples of chaotic attractors). System technologies for modeling complex systems/Monograph under the general. ed. prof. A. I. Mikhaleva. - Dnepr: NMetAU_IVK "System Technologies", 2016. -608 p. - p. 67-90.
9. Belozyorov V.Ye., Zaytsev V. G. Mathematical modeling of parkinson's illness by chaotic dynamics methods// Вісник ДНУ. Серія "Моделювання". 2017. Том 25, № 8, Вип. 9. С. 21–39. DOI 10.15421/141702
10. Belozyorov V.Ye., Pohorielov O.V., Serdiuk V.N., Zaytsev V. G. New Approach to Problem of Diagnostics of Cerebral Cortex Diseases Using Chaotic Dynamics Methods // 7 th The international conference "Social Science and Humanity". 23–29, September, London, 2017. - №2.--P.7 – 28.
11. M. Natu, M. Bachute, S. Gite, K. Kotecha, and A. Vidyarthi, "Review on epileptic seizure prediction: machine learning and deep learning approaches," Computational and Mathematical Methods in Medicine, vol. 2022, Article ID 7751263, 17 pages, 2022.
12. M.-P. Hosseini, D. Pompili, K. Elisevich, and H. SoltanianZadeh, "Random ensemble learning for EEG classification," Artificial Intelligence in Medicine, vol. 84, pp. 146–158, 2018.
13. K. Fountas and E. Z. Kapsalaki, Epilepsy Surgery and Intrinsic Brain Tumor Surgery, Springer, Berlin, Germany, 2019.
14. R. G. Andrzejak et al., "Indications of nonlinear deterministic and finitedimensional structures in time series of brain electrical activity: Dependence on recording region and brain state," Phys. Rev. E, vol. 64, no. 6, pp. 061907, 2001.
15. Richard O. Duda, Peter E. Hart, David G. Stork Pattern Classification, 2nd Edition. Wiley-Interscience, 2001. 688 p.
16. Marwan Norbert et al. Recurrence plots for the analysis of complex systems. Physics reports, vol. 438, pp. 237-329, 2007.

17. Thiel Marco, M. Carmen Romano, and Jürgen Kurths. How much information is contained in a recurrence plot?. *Physics Letters*, vol.330, no.5, pp. 343-349, 2004.
18. Marwan Norbert. How to avoid potential pitfalls in recurrence plot based data analysis. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 21, no.04, pp. 1003-1017, 2011.
19. Recurrence Quantification Analysis. [Online] Available: <http://www.recurrence-plot.tk/rqa.php>
20. Ngamga Eulalie Joelle et al. Evaluation of selected recurrence measures in discriminating pre-ictal and inter-ictal periods from epileptic EEG data. *Physics Letters*, vol. 380, pp. 1419-1425, 2016.
21. Dattaprasad A. Torse; Rajashri Khanai; Veena V. Desai” Classification of Epileptic Seizures using Recurrence Plots and Machine Learning Techniques”, 2019 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP), 4-6 April 2019, IEEE, Chennai, India DOI: 10.1109/ICCSP.2019.8697989
22. R. Meena Prakash, P. Krishnaleela, M. Nandhini, M. Snekha, M. Sowra Aashmi, "Epilepsy Detection using Convolutional Neural Network", 2023 8th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), pp.907-911, 2023.
23. Prajakta Rathod, Shefali Naik, "Review on Epilepsy Detection with Explainable Artificial Intelligence", 2022 10th International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology - Signal and Information Processing (ICETET-SIP-22), pp.1-6, 2022.
24. Ahnaf Akif Rahman, Fahim Faisal, Mirza Muntasir Nishat, Muntequa Imtiaz Siraji, Lamim Ibtisam Khalid, Md Rezaul Hoque Khan, Md. Taslim Reza, "Detection of Epileptic Seizure from EEG Signal Data by Employing Machine Learning Algorithms with Hyperparameter Optimization", 2021 4th International Conference on Bio-Engineering for Smart Technologies (BioSMART), pp.1-4, 2021.
25. Nabeeha Ehsan Mughal, Khurram Khalil, Muhammad Jawad Khan, "fNIRS Based Multi-Class Mental Workload Classification Using Recurrence Plots and CNN-LSTM", 2021 International Conference on Artificial Intelligence and Mechatronics Systems (AIMS), pp.1-6, 2021.
26. Konstantinos Tziridis, Theofanis Kalampokas, George A. Papakostas, "EEG Signal Analysis for Seizure Detection Using Recurrence Plots and Tchebichef Moments", 2021 IEEE 11th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC), pp.0184-0190, 2021.
27. Md. Nuhi-Alamin, Md. Shakil Mahmud, Ajay Krishno Sarkar, "Smoothness Priority Approach Based Epileptic Seizure Classification Using ANN", 2020 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technology (ICAICT), pp.342-347, 2020.
28. W. Wang, M. Zhang, D. Wang, and Y. Jiang, “Kernel PCA feature extraction and the SVM classification algorithm for multiple-status, through-wall, human being detection,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 151, pp. 151–157, 2017.

Received 28.03.2025.
Accepted 31.03.2025.

***Problems of analysis of electroencephalograms
by methods of nonlinear dynamics***

In this paper, the analysis of the problems of processing electroencephalograms by nonlinear dynamics methods is made. It is shown that the results obtained by different methods, including machine/deep learning methods, neural networks allow classifying an epileptic seizure based on EEG data with an accuracy of 94% or higher. The problems that occur when performing these studies are indicated. The problems of analyzing data taken from different databases that arise when using nonlinear dynamics methods are considered. Their comparison and clustering are carried out according to the JRQA indicators of EEG data analysis and Hurst indices. However, it is currently not possible to identify an analytical dependence in the direction of predicting an epileptic seizure.

Key words: recurrent analysis, electroencephalography, recurrent diagram, delay parameter, dimension of the embedding space, JRQA analysis, Hurst index.

Білозьоров Василь Євгенович – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Зайцев Вадим Григорович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Погорєлов Олексій Вікторович - доктор медичних наук, професор кафедри неврології Дніпровського державного медичного університету.

Хижа Олександр Леонідович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Belozyorov Vasily - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of computer Technologies, Oles Honchar Dnipro National University.

Zaytsev Vadym - Ph.D., Associate Professor, Department of computer Technologies, Oles Honchar Dnipro National University.

Pohorielov Oleksiy - Doctor of Medical sciences, professor of the department of neurology, Dnipro State Medical University.

Khyzha Oleksandr - Ph.D., Associate Professor, Department of computer Technologies, Oles Honchar Dnipro National University.

O.M. Hrechanyi, T.O. Vasilchenko, A.O. Vlasov,

O.P. Ivakhnenko, M.V. Vernydub

**THE ROLE OF CAD IN THE DEVELOPMENT OF ENGINEERING SOLUTIONS
FOR THE METALLURGICAL INDUSTRY: EXPERIENCE IN USING ANSYS,
AUTOCAD, SOLIDWORKS AND MATLAB**

Abstract. The article examines the features of using modern software tools for designing products in the metallurgical industry, in particular, such as ANSYS, AutoCAD, SolidWorks, and MATLAB. In particular, attention is paid to their advantages and disadvantages in the context of specific metallurgical tasks, such as modeling technological processes, designing mechanical components, and analyzing thermal and mechanical loads. Separately, the application of ANSYS for numerical modeling of the metal rolling process is considered, MATLAB for modeling thermal processes in furnaces, as well as the use of AutoCAD and SolidWorks for creating geometric models and designing rolling mills. The results of the analysis show that each of the software products has its own strengths and weaknesses, which determines the appropriateness of their use depending on the specifics of the tasks. The authors provide recommendations for choosing tools, based on the requirements for accuracy, productivity, and cost. The scientific novelty of this work lies in the development of an innovative multiphysics approach that combines the integration of powerful software tools (ANSYS, AutoCAD, SolidWorks, MATLAB) for modeling complex metallurgical processes with an emphasis on mechanical, thermal and structural analysis. This approach allows to significantly increase the accuracy of engineering calculations, which is of great importance for the optimization of technological lines in metallurgy, in particular in the context of advanced analysis methods and improvement of design techniques in difficult production conditions.

Keywords: computer-aided design, computer modeling, engineering calculations, technical standards, data analysis

Statement of the Problem. The majority of both rolling and auxiliary equipment of the metallurgical industry of Ukraine was developed and put into operation at the beginning of the 20-th century [1-2]. Despite the rather reliable performance, over time of operation and the rapid development of technological processes in metallurgy, there was a need not only for a deep modernization of existing equipment, but also for the development of fundamentally new designs [3-5]. Also, in a situation of uncertainty caused by martial law, conducting real experiments to verify or refute various aspects of technological processes becomes an extremely difficult task. Therefore, methods of simulation modeling and experiments in the development of metallurgical equipment are becoming increasingly important [6-7].

In this regard, a natural question arises of system analysis and determination of the most optimal software products of computer-aided design (CAD) systems, which would be useful to designers in designing and improving not only the main and auxiliary equipment, but also the technological processes themselves.

Designing products in the metallurgical industry requires the use of advanced software tools to solve complex engineering problems. Computer-aided design systems play a key role in modeling, analyzing, and optimizing metallurgical processes, but the issue of determining the most rational product that meets the principles of functionality, cost, and performance remains unresolved. This study focuses on the analytical justification of the feasibility of using software tools Ansys, AutoCAD, Matlab, and SolidWorks, taking into account their strengths and weaknesses in the design of a metallurgical product.

Analysis of recent research and publications. In modern research, software such as ANSYS, AutoCAD, SolidWorks, and MATLAB are actively used to model and analyze processes in materials science and metallurgy.

ANSYS is used for numerical modeling of technological processes, in particular, rolling of aluminum alloys in liquid nitrogen and asynchronous hot rolling of composite materials, as well as for the analysis of deformations, temperature changes and stresses in materials, which allows obtaining accurate results on the mechanical properties and structure of materials [8-10]. This software allows taking into account not only macroscopic characteristics, but also microstructural changes, which are important for predicting the behavior of materials under different conditions.

Jagadish et al. demonstrate the use of ANSYS to model the rolling process of an aluminum alloy in liquid nitrogen. In their work, they compare the results of numerical simulations with experimental data, which allows confirming the accuracy of the modeling and adaptation of the simulations to specific production conditions [8]. Yi et al. analyze the effect of friction on the rolling process, using ANSYS to simulate deformations and stresses in materials. This allows for accurate prediction of the behavior of materials under different operating conditions, which is important for optimizing technological processes, in particular in rolling mills [9].

Urs P., et. al. argue that MATLAB is a powerful tool for modeling thermal processes, particularly in metallurgical furnaces. They use MATLAB to solve differential equations describing temperature dynamics in different sectors of the furnace, which allows predicting temperature changes and determining the time of transients. This approach helps to increase the accuracy in predicting thermal regimes [11].

SolidWorks is widely used in the modeling of mechanical systems, in particular in metallurgy and the design of rolling mill components. The software allows you to develop three-dimensional models with high accuracy and integrate them with other tools for analyzing the mechanical properties of structures, all of which are discussed in [12] and [13]. SolidWorks is actively used in creating models of alloys and steel profiles, which allows you to effectively analyze and optimize structures.

Sawant MS, Jain NK, Nikam SH, Chen L.-Y., et al. review the application of AutoCAD for modeling powder metallurgy processes. The researchers emphasize the accuracy of meas-

urements and the creation of geometric models, which are important for effective planning and control of technological operations in metallurgical processes [14].

Thus, software in these studies plays an important role in numerical modeling, analysis, and development of new technologies in materials science and metallurgy, but requires a careful approach to the selection of tools and resources to ensure high accuracy and efficiency.

Purpose of the Study. The study aims to provide an analytical basis for the selection of CAD tools for the design of engineering products in the metallurgical industry. Evaluating the features, advantages and disadvantages of Ansys, AutoCAD, Matlab and SolidWorks, the main objectives of the study are to determine the most effective software tool, based on functionality, cost and productivity.

Statement of the main research material. ANSYS software is a powerful tool for conducting detailed numerical simulations in the field of materials science and metalworking technology. In the context of studying the rolling processes of various materials, ANSYS provides high accuracy and efficiency of modeling, which makes it useful for optimizing the parameters of technological processes, such as rolling of aluminum alloys in liquid nitrogen [8], asynchronous hot rolling of composite stainless steel plates [9], cold rolling of reinforcement [10]. Modeling with ANSYS allows you to take into account complex physical phenomena that are difficult to study without using numerical methods, in particular, changes in temperature, stresses, deformations and their interaction, which allows you to achieve realistic and accurate results [8]. It can also be argued that one of the main advantages of ANSYS is the high accuracy of modeling.

The work of Jagadish et al. clearly confirms that the use of ANSYS allows for accurate modeling of the rolling process of an aluminum alloy in liquid nitrogen, which is confirmed by the coincidence of numerical results with experimental data. The analyzed CAD software tool provides a high level of flexibility in setting the model parameters, which allows adapting simulations to specific production conditions. This is especially important for specific technological processes, such as rolling in cryogenic conditions or assessing the effect of friction on the process result, as shown in the studies of Yi et al. and Sui et al [9, 10]. Modeling in ANSYS allows you to take into account even microstructural changes in materials, which is critically important for obtaining a high-quality connection between layers in composite materials or for predicting the development of grains in metals at different temperature regimes [10]. However, as in any other software, the use of ANSYS has its limitations and disadvantages. One of the main ones is the high dependence of the results on the quality of the input data. Errors or inaccuracies in the data can significantly distort the results of simulations, which requires a careful approach to collecting experimental data. In addition, to achieve optimal results, ANSYS requires powerful computing equipment, since modeling complex processes requires significant investment resources, which can be a limitation for academic institutions and scientific organizations. Another significant problem is the difficulty of configuring the software to perform specific simulations, which requires highly qualified personnel. Another drawback is that ANSYS does not always fully take into account microstructural changes in materials, which can be critical for the study of ultrafine-

grained (UFG) materials, where even the smallest changes in the microstructure can significantly affect the mechanical properties of the material [9].

AutoCAD is one of the most widely used programs for creating and manipulating graphical models, and its applications cover a wide range of industries, from mechanical engineering and architecture to additive manufacturing and geology. The program provides high accuracy and flexibility in design processes, which makes it useful for numerous scientific and engineering tasks. An important advantage is the ability of AutoCAD to perform precise measurements and create complex geometric models, which allows it to be used for process modeling in powder metallurgy, mining and metallurgical planning, and rolling production, where accuracy plays a critical role.

One example of successful use of AutoCAD is its use to measure the area of dilution and deposition of Ti-6Al-4V powder in the MPTAAM process (additive manufacturing). It is known that AutoCAD is used to analyze optical images of samples and measure the deposition geometry, which is important for comparing experimental data with theoretical models and numerical simulations [14]. In another context, AutoCAD is used to create 3D models of geological objects, such as open pits, which allows improving the planning of mineral extraction and visualizing spatial relationships between geological layers [12]. In addition, AutoCAD is widely used to model lattice structures in additive manufacturing, where high accuracy is critical for the subsequent optimization and manufacture of such structures [15]. This confirms the versatility and effectiveness of the program in various scientific and industrial fields.

One of the main advantages of AutoCAD is its ability to provide high accuracy in measurement and modeling processes. This is especially important for industries such as additive manufacturing, where the accuracy of each component is critical to achieving the desired result. In addition, AutoCAD allows you to process and analyze large amounts of data, which makes it a useful tool for complex scientific and industrial tasks. It is also worth noting the convenient interface that allows you to design geometries with high accuracy and prepare models for further processing in other programs, such as Autodesk Within or Altair OptiStruct, which specialize in topology optimization [15].

However, there are some limitations that need to be considered when using AutoCAD. One of these is the difficulty of learning the program for new users, especially those who are not experienced in working with CAD systems. Given the complexity of some tasks, such as accurate modeling of complex geometries or integration with other software products, users need to have some technical knowledge to use the program effectively. In addition, AutoCAD requires significant computing resources to process large 3D models, which can be a limitation when using the software on machines with insufficiently powerful characteristics [12]. Reduced automation of measurement processes can also be a problem, especially when processing a large amount of data, which increases the complexity of the tasks performed.

Features, advantages and disadvantages, characteristics of ANSYS and AutoCAD software products are given in Tables 1 and 2.

SolidWorks software is a powerful engineering modeling tool that has found wide ap-

plication in fields such as metallurgy, mechanical systems development, and educational technology. With its capabilities for creating highly accurate 3D models and integration with other engineering programs, SolidWorks significantly improves the design and analysis of mechanical properties of materials and structures.

Table 1

Characteristics of ANSYS and AutoCAD software products*

Software tool	Modules (elements) of the software tool	Scope of application in the metallurgical industry	Productivity	Valuation
ANSYS	ansys mechanical, ansys fluent, ansys workbench, ansys ls-dyna	Modeling of thermomechanical processes, analysis of the strength of metal structures, hydrodynamics of melts	High, depends on system configuration	CADFEM Ukraine , Up to \$150,000 per year for a multi-user license
AutoCAD	autocad mechanical, autocad electrical, autocad plant 3d	Creation of drawings and development of technical documentation	High for 2D drawings, medium for 3D	Autodesk \$5893

Table 2

Features, advantages and disadvantages of ANSYS and AutoCAD software products*

Software tool	Features	Advantages	Disadvantages
ANSYS	Software package for engineering analysis, including modules for mechanical, thermal and hydrodynamic calculations	- high accuracy of modeling - a wide range of modules for different types of analysis - the ability to analyze complex physical processes	- High license cost - High requirements for computing resources - Need for special training for users
AutoCAD	Software for creating 2D and 3D drawings, used for design and technical documentation	- intuitive interface - a wide selection of drawing and 3D modeling tools - support for a large number of file formats	- high subscription cost - less convenient for complex 3D modeling compared to other CAD systems (e.g. SolidWorks)

* Source: developed by the author

The positive features of SolidWorks are the high accuracy of modeling complex geometries, which provides high-quality and detailed display of objects. The software also supports integration with other numerical analysis programs, such as ANSYS, which expands the capabilities of engineering analysis [13]. In particular, SolidWorks is particularly useful for creating models of rolling mill components [16], alloys and steel profiles [17], which significantly increases the efficiency of these processes. The disadvantage of SolidWorks is its high license cost, which can be a significant barrier for small companies, educational institutions or research organizations, where budgets may be limited. The cost of the license makes the software less accessible, requiring additional costs to ensure the use of its full functionality. Given this high cost, the implementation of SolidWorks can be a difficult task for many organizations.

In modern scientific research in the field of materials science, metallurgy and engineering, MATLAB software is actively used for processing, modeling and analysis of complex processes, including mechanical testing, thermal processes and studies of microstructures of materials. One of the main areas of application of MATLAB is the processing of experimental research results and modeling of physical processes in various branches of technology.

One example is a study conducted to evaluate the interfacial strength and mechanical properties of aluminum foam (AFS) sandwich structures fabricated by foaming precursors and hot pressing. In this case, MATLAB was used to process the results of tensile and microhardness tests, as well as to analyze deformation processes using digital image correlation (DIC). MATLAB allows for precise analysis of the stages of material deformation using specialized image processing algorithms, which significantly increases the accuracy of determining the mechanical properties of materials [18]. Another example of the use of MATLAB concerns the modeling of thermal processes in metallurgical furnaces. In this area, MATLAB/Simulink is used to simulate temperature dynamics in different sectors of the furnace, which allows studying the impact of different user access scenarios to the furnace control system on temperature processes. MATLAB is used to solve differential equations that describe thermal dynamics using numerical methods, such as the Dormand –Prince method. This allows achieving high accuracy in predicting temperature changes and determining the time of transient processes [11]. Within the framework of metallographic research, MATLAB was used to develop a universal method for digital analysis of microstructures of metals and alloys. MATLAB algorithms are used to process digital images of microstructures, which allows automating the process of measuring geometric parameters of structural elements, such as ferrite, pearlite and martensite, as well as to assess the influence of these parameters on the mechanical properties of the material. As a result, MATLAB significantly simplifies and accelerates the analysis process, reducing the likelihood of errors that may occur during manual measurement [19]. Among the disadvantages of using MATLAB, one can note the difficult adaptation of the program to specific metallographic tasks, which requires significant time and resource costs for developing specialized code. In addition, processing large amounts of data can require significant computing resources, which can be a problem for enterprises with limited access to modern support equipment. Another limitation is the need to integrate MATLAB with other software products, such as ImageJ or Excel, which complicates data

processing and creates a risk of errors during the stages of information transfer between programs.

Features, advantages and disadvantages, characteristics of SolidWorks and MATLAB software products are given in Tables 3 and 4 .

Table 3

Characteristics of SolidWorks and MATLAB software products*

Software tool	Modules (elements) of the software tool	Scope of application in the metallurgical industry	Productivity	Valuation
MATLAB	simulink, optimization toolbox, curve fitting toolbox, control system toolbox	Analysis of heat treatment processes, mathematical modeling of metallurgical processes, production optimization	High when properly configured	Mathworks \$ 1015
SolidWorks	solidworks simulation, solidworks flow simulation, solidworks pdm	design of metal structures, stress analysis, creation of 3D models of equipment	High for complex 3D models	Softkeys \$5854

Table 4

Features, advantages and disadvantages of SolidWorks and MATLAB software products*

Software tool	Features	Advantages	Disadvantages
SolidWorks	Software for 3D modeling, mechanical design, and engineering analysis	- support for parametric modeling - large library of standard parts - integration with other engineering programs	- high license cost - high hardware requirements - less powerful for complex analysis compared to ANSYS
MATLAB	Powerful software environment for mathematical calculations, modeling and data analysis	- flexibility in mathematical calculations and optimization - a large set of libraries for modeling physical processes - possibility of automation and programming of algorithms	- high cost of modules - high entry threshold for new users - limited support for 3D modeling compared to CAD programs

*Source: developed by the author

Conclusions. Designing products in the metallurgical industry requires the use of advanced software tools to solve complex engineering problems. Computer-aided design systems play a key role in modeling, analysis and optimization of metallurgical processes, but the issue of choosing the most rational product that provides the principles of functionality, cost and productivity still needs to be clarified. This study focuses on the analytical justification of the feasibility of using software tools Ansys, AutoCAD, Matlab and SolidWorks, taking into account their strengths and weaknesses in the design of a metallurgical product.

ANSYS, AutoCAD, SolidWorks and MATLAB software are actively used for modeling and analyzing processes in metallurgy. ANSYS is a powerful tool for numerical modeling of technological processes, in particular metal rolling, taking into account temperature changes, stresses and deformations. MATLAB is effectively used for modeling thermal processes in metallurgical furnaces, and SolidWorks is used for designing mechanical components of rolling mills. AutoCAD, in turn, is an important tool for modeling geometry and precise measurements in metallurgical processes.

The scientific novelty of the study lies in comparing the effectiveness of various software tools in the context of specific metallurgical design tasks, such as modeling of rolling processes and optimization of technologies. The latest methods are taken into account, which allow reducing costs and increasing productivity while maintaining high modeling accuracy.

In conclusion, we can note that ANSYS software has high modeling accuracy and adaptability to specific conditions, but requires powerful computing equipment and highly qualified personnel. SolidWorks and AutoCAD provide effective tools for mechanical design, and MATLAB increases the accuracy of predicting thermal processes. Therefore, for each specific project, the tool should be carefully selected, based on its features and requirements.

REFERENCE

1. Shapurov OO Research methods for production & business activity of machine-building enterprises. Actual Problems of Economics. 2009. No. 7. P. 168–174.
2. Shapurov OO State and trends of machine-building development. Actual Problems of Economics. 2009. No. 3. P. 57–63.
3. Strandless rolling based on four-high modules in stands of continuous section mills / I. Oginskiy et al. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems* . 2025. Vol. 9. P. 100149.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.jalms.2024.100149>
4. Numerical analysis of the twin-roll casting of thin aluminum-steel clad strips / M. Stolbchenko et al. *Forschung im Ingenieurwesen* . 2014. Vol. 78, no. 3-4. P. 121–130.
URL: <https://doi.org/10.1007/s10010-014-0182-x>
5. Experimental twin-roll casting equipment for production of thin strips / OY Grydin, et al. *Metallurgical and Mining Industry* . 2010, 2(5), pp. 348–354
6. Murashko V., Kulik D., Hrechanyi O.M. Perspectives of using imitation modeling in the design of metallurgical equipment. *Collection of scientific works of students, aspirants, doctoral students and young scientists «Young science-2023»* Zaporizhzhia: ZNU, 2023. Vol. 5. C. 363-365. [in Ukrainian]

7. Simulation modeling in the research of metallurgical equipment operation / OM Yhtchanyi et al. *System technologies* . 2024. Vol. 2, no. 151. P. 62–75.
URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-2-151-2024-06>
8. Finite element simulation of liquid nitrogen temperature rolling of marine grade aluminum alloy 5754 / A. R. Jagadish et al. *Materials Today: Proceedings* . 2022.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.618>
9. Analysis of microstructure and properties evolution of asynchronous hot rolled stainless steel clad plate with interlayer / Y. Yi et al. *Materials Today Communications*. 2024. P. 111380. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.111380>
10. Deformation Uniformity of Cold-Rolled Q235 Steel Rebar by FEM in Bending and Rolling Processes / F.-l. Sui et al. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2012. Vol. 19, no. 8. P. 37–42. URL: [https://doi.org/10.1016/s1006-706x\(12\)60137-x](https://doi.org/10.1016/s1006-706x(12)60137-x)
11. A security architecture for Metallurgical and Heating Processes (Metallurgical furnace) / P. Urs et al. *IFAC-PapersOnLine*. 2024. Vol. 58, no. 22. P. 124–129.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.09.302>
12. Zhao H., Bai R., Liu G. 3D Modeling of Open Pit Based on AutoCAD and Application. *Proceedings of Earth and Planetary Science* . 2011. Vol. 3. P. 258–265.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2011.09.092>
13. Effect of copper on the mechanical properties of alloys formed by powder metallurgy / WD Wong-Ángel et al. *Materials & Design*. 2014. Vol. 58. P. 12–18.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.002>
14. Sawant MS, Jain NK, Nikam SH Theoretical modeling and finite element simulation of dilution in micro-plasma transferred arc additive manufacturing of metallic materials. *International Journal of Mechanical Sciences* . 2019. Vol. 164. P. 105166.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105166>
15. Additive manufacturing of metallic lattice structures: Unconstrained design, accurate fabrication, fascinated performances, and challenges / L.-Y. Chen et al. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2021. Vol. 146. P. 100648.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2021.100648>
16. Radionova L. V., Chernyshev A. D., Lisovskiy R. A. Interactive Educational System – Virtual Simulator "Sheet Rolling". *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206. P. 512–518.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.509> (
17. Design of Steel Profiles with Similar Characteristics to the Aluminum Profiles Used in Solar Panels / E. Calis et al. *IFAC-PapersOnLine*. 2024. Vol. 58, no. 3. P. 244–249.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.158>
18. Achieving metallurgical bonding in steel faceplate/aluminum foam sandwich via hot pressing and foaming processes: interfacial microstructure evolution and tensile behavior / L. Wang et al. *Journal of Materials Processing Technology*. 2024. P. 118636.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118636>
19. Akhmetova G., Kudrya A., Panin E. Universal technique for information and digital analysis of steel and alloy structures using MATLAB. *MethodsX*. 2024. P. 103059.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.103059>

Received 28.03.2025.
Accepted 31.03.2025.

**Роль САПР у розробці інженерних рішень для металургійної галузі:
досвід застосування ANSYS, AutoCad, SolidWorks та MATLAB**

У статті розглядається важливість використання сучасних програмних засобів для проєктування інженерних рішень у металургійній галузі, зокрема програм ANSYS, AutoCAD, SolidWorks та MATLAB. Огляд охоплює як їхні сильні, так і слабкі сторони, зокрема в контексті специфічних металургійних завдань: моделювання технологічних процесів, проєктування механічних компонентів, а також аналіз теплових і механічних навантажень. Особливу увагу приділено застосуванню ANSYS для чисельного моделювання процесу прокатки металів, MATLAB для термічних процесів у печах, а також AutoCAD і SolidWorks для створення геометричних моделей та проєктування прокатних станів. Важливим аспектом є те, що кожне програмне забезпечення має свою специфіку використання, що зумовлює необхідність точного вибору інструменту залежно від типу завдання, вимог до точності, продуктивності та вартості. Розглядається інтеграція цих інструментів для забезпечення високої точності інженерних розрахунків і вдосконалення методик проєктування в складних виробничих умовах. Наприклад, ANSYS дозволяє провести детальний аналіз деформацій і температурних змін в матеріалах, що дозволяє оптимізувати технологічні процеси в металургії, зокрема прокатки алюмінієвих сплавів та композитних матеріалів. MATLAB, у свою чергу, використовується для розв'язання диференціальних рівнянь, що описують термічну динаміку в печах, а AutoCAD і SolidWorks активно застосовуються для проєктування і моделювання механічних систем, зокрема компонентів прокатних станів. Крім того, в статті підкреслено важливість вибору програмного забезпечення з урахуванням якості вхідних даних, доступних обчислювальних ресурсів і кваліфікації користувачів. Програмні продукти мають свої переваги, такі як висока точність моделювання в ANSYS або зручність у роботі з AutoCAD, але й ряд обмежень, включаючи високу вартість ліцензій і потребу в потужних обчислювальних системах. Наукова новизна роботи полягає в розробці мультифізичного підходу, що поєднує різні програмні інструменти для моделювання складних металургійних процесів, що дозволяє досягти високої точності інженерних розрахунків та оптимізації технологічних ліній. Це важливо для підвищення ефективності виробництва і зниження витрат на етапах проєктування.

Гречаний Олексій Миколайович - доктор філософії (Ph.D.), доцент, доцент кафедри металургійного обладнання, Запорізький національний університет.

Васильченко Тетяна Олександрівна - канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри металургійного обладнання, Запорізький національний університет.

Власов Андрій Олександрович - канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри металургійного обладнання, Запорізький національний університет.

Івахненко Олександр Павлович - викладач, кафедра металургійного обладнання, Запорізький національний університет.

Вернидуб Михайло Васильович - магістрант кафедри металургійного обладнання, Запорізький національний університет.

Hrechanyi Oleksii - Ph.D., Docent, Associate Professor of Department Metallurgical Equipment, Zaporizhzhia National University.

Vasilchenko Tetyana - Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of Department Metallurgical Equipment, Zaporizhzhia National University.

Vlasov Andrii - Candidate of Technical Sciences, Docent, Head of Department Metallurgical Equipment, Zaporizhzhia National University, e-mail: vlasovzgia@ukr.net

Ivakhnenko Oleksandr - Senior Lecturer, Department Metallurgical Equipment, Zaporizhzhia National University.

Vernydub Mykhailo -magister of Department Metallurgical Equipment Zaporizhzhia National University.

АНАЛІЗ ЕМОЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИРАЗІВ ОБЛИЧЧЯ ТА ГОЛОСОВИХ ОЗНАК

Анотація. У роботі представлені методи для розпізнавання людських емоцій. Розпізнавання людських емоцій - це галузь штучного інтелекту, що швидко розвивається і має важливе значення для поліпшення взаємодії людини з комп'ютером. Однак більшість сучасних систем розпізнавання емоцій обмежені використанням тільки одного джерела даних голосових характеристик, або виразів обличчя, що знижує точність і стійкість розпізнавання в складних умовах. В цій статті розглядаються методи розпізнавання емоцій з використанням двох основних каналів - голосового та візуального. У процесі дослідження аналізуються наявні підходи щодо розпізнавання емоцій. Для аналізу емоцій розглянуто технології ResNet (для зображень), SER (для звуку). Особливу увагу приділено аналізу й обробці акустичних характеристик, таких як інтонація, гучність, темп мовлення і тривалість пауз, а також використанню методів комп'ютерного зору для детекції виразів обличчя, таких як посмішка, затиснуті губи або насуплені брови. Це дослідження просуває галузь вивчення емоцій, забезпечуючи краще розуміння емоційних станів людини.

Ключові слова: розпізнавання емоцій, розпізнавання емоцій через звук, розпізнавання емоцій за обличчям, машинне навчання, SVM, комп'ютерний зір, глибоке навчання, CNN.

Постановка проблеми. Проблема розпізнавання емоцій полягає в тому, що емоції людини проявляються багатогранно та змінно. Сучасні системи розпізнавання емоцій на основі аналізу голосу або виразів обличчя мають певні обмеження, які впливають на їх точність і спроможність у реальних умовах.

Мета і завдання досліджень. Вивчити моделі для розпізнавання емоцій з використанням акустичних і візуальних даних для покращення точності та стабільності системи в умовах реальної взаємодії, що дасть змогу точніше інтерпретувати емоційні стани людини.

Емоційне розпізнавання з використанням штучного інтелекту (ШІ) охоплює кілька різних підходів, які дають змогу системам аналізувати емоції людини.

Розглянемо технологію розпізнавання емоцій за виразами обличчя. Це один із найпоширеніших методів, який використовує комп'ютерний зір для аналізу міміки людини. ШІ може знаходити і визначати вирази облич (усмішка, насуплені брови тощо) і на основі цього визначати емоції, такі як щастя, сум, здивування, злість та інші.

Для розв'язання цієї задачі використовують різні методи машинного навчання та глибокого навчання, а одним із найефективніших підходів є використання глибоких нейронних мереж (зокрема, архітектур, таких як ResNet, SVM, CNN та інші)[1].

Обробка та аналіз зображень облич є ключовим етапом під час розпізнавання емоцій за мімікою обличчя. Цей процес включає кілька важливих кроків, які допомагають підготувати зображення для подальшої класифікації емоцій.

У першому етапі, потрібно спочатку ідентифікувати обличчя на зображенні. Це називається детекцією обличчя. На зображенні обличчя може бути нечітким або частково закритим, а також можуть бути кілька облич. Використовуються різні методи для виявлення обличчя у зображенні.

На другому етапі після детекції обличчя ми отримуємо координати прямокутника, що обмежує обличчя, що дає змогу сфокусуватися тільки на одній ділянці зображення для подальшого опрацювання (див. рис 1).



Рисунок 1 – Детекція обличчя

На третьому етапі після того, як обличчя виявлено, важливо виконати кілька кроків до обробки та аналізу. Для початку потрібно змінити розміри для подачі зображення в нейронну мережу, розмір обличчя має бути стандартизованим, зазвичай, використовується розмір 224x224 пікселів. Для того щоб модель могла працювати з однаковими розмірами зображень, а також для прискорення обчислень. Іноді, зображення облич конвертуються у відтінки сірого, для спрощення обробки. Але сучасні моделі часто працюють із кольоровими зображеннями (RGB), щоб враховувати більш тонкі деталі. Нормалізація, після зміни розміру і можливо перетворення кольору, зазвичай нормалізують піксельні значення, щоб вони перебували в одному діапазоні. Наприклад, у нейронних мережах часто застосовується нормалізація, де значення пікселів від 0 до 255 приводяться до діапазону $[0, 1]$ або $[-1, 1]$. Для поліпшення загальних здібностей моделі використовують аугментацію даних, наприклад, повороти, відображення, зміни яскравості, контрасту тощо. Це допомагає уникнути перенавчання і поліпшити здатність моделі справлятися з різними умовами.

На четвертому етапі модель або алгоритм витягує ключові характеристики (ознаки) із зображення, які можуть допомогти в класифікації емоцій. Для цього використо-

вують сучасні методи машинного навчання, згорткові нейронні мережі, для вилучення ознак. Ці мережі вчать вилучати просторові ознаки, такі як контури, текстури та інші особливості.

На п'ятому етапі визначається геометрія обличчя, використовуються традиційні методи для визначення точок на обличчі та їхнього аналізу (відстань між очима, кут нахилу рота тощо). Для цього етапу можна використовувати “згорткові нейронні мережі” (CNN). Ці мережі використовують фільтри, щоб виявляти важливі візуальні ознаки: (форма обличчя, вирази очей і т.д.).

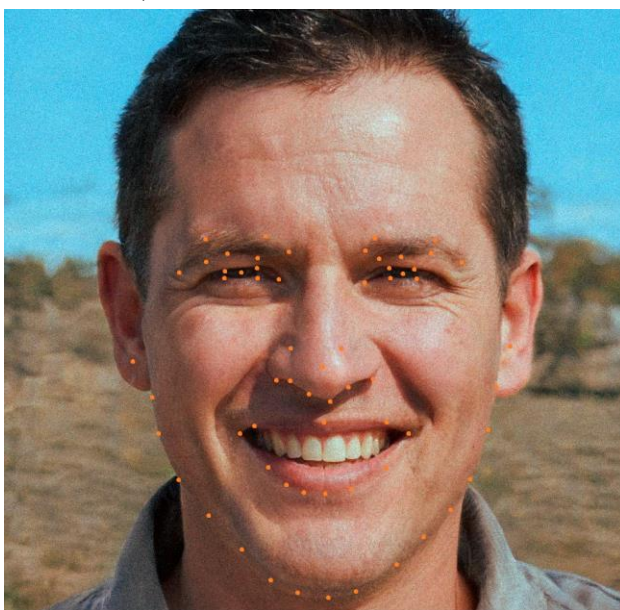


Рисунок 2 - Визначення точок на обличчі

Після опрацювання та аналізу зображення обличчя на наступному етапі відбувається використання класифікатора, який передбачає емоцію обличчя за зображенням, ґрунтуючись на даних ознаках. Для класифікатора емоції використовують різні алгоритми, як-от ResNet, або Residual Network, що слугує основою для багатьох завдань комп'ютерного зору. ResNet ефективно дає змогу навчати глибокі нейронні мережі з більш ніж 150 шарами [2]. За витягнутими раніше ознаками можна донавчити модель для класифікації емоцій. Після того як модель навчена і протестована, ви можете використовувати її для передбачення емоцій на нових зображеннях. А також можна використовувати Support Vector Machine (SVM) - алгоритм, який будує гіперплощини для поділу різних класів.

Далі розглянемо технологію розпізнавання емоцій за голосом, або паралінгвістику, яка вивчає, як люди передають емоційні стани за допомогою особливостей мови, таких як інтонація, темп, гучність, висота голосу та інші голосові характеристики. Цей процес має важливе значення в галузі психолінгвістики, когнітивних наук і штучного інтелекту. Коли ми слухаємо когось, ми інтуїтивно розпізнаємо не тільки зміст слів, а й емоції, які вони висловлюють. Наприклад, якщо людина говорить із підвищеним темпом і високим тоном, це може свідчити про радість або хвилювання. Якщо її голос ни-

жчий і повільніший, це може вказувати на смуток або розчарування. Приклади технологій: Emotion Recognition (SER), Neural Networks (CNN)[3]

До основних аспектів паралінгвістики, що допомагають розпізнавати емоції за голосом, належать такі параметри мовлення:

1. Тональність голосу - це найважливіший елемент у визначенні емоційного стану людини, тому що вона безпосередньо пов'язана з її емоційною реакцією на ситуацію. Тон може передавати навіть точніші емоції, ніж самі слова. Високий тон часто асоціюється з позитивними емоціями, такими як радість або збудження. Низький тон може сигналізувати про сум, розчарування або втому. Коливання в тоні (монотонність), можуть вказувати на хвилювання, здивування або інтерес.

2. Гучність голосу може ефективно відображати емоційний стан, оскільки люди схильні підвищувати гучність у моменти сильних емоцій і знижувати її в більш спокійних або сумних станах. Високий рівень гучності часто вказує на гнів, лютю, агресію, збудження або тривогу. Низька гучність, коли людина говорить тихо, це може бути пов'язано зі смутком, нудьгою, депресією або невпевненістю. Раптові зміни гучності, різкі підвищення і зниження гучності можуть свідчити про те, що людина переживає сильні емоції, такі як здивування або шок.

3. Темп мовлення це швидкість, з якою людина вимовляє слова. Він відіграє важливу роль у розпізнаванні емоцій, оскільки на емоційному тлі темп мовлення часто змінюється. Швидка мова часто вказує на збудження, тривогу, стрес або хвилювання. Повільне мовлення може сигналізувати про смуток, втому, депресію або роздуми. Перерви і паузи в мовленні, це може означати, що людина нервує, сумнівається, намагається підібрати правильні слова або переживає.

4. Інтонація мови це зміна висоти голосу та інших його характеристик упродовж мовлення, яка допомагає передавати емоційні відтінки. Підйом інтонації, це може вказувати на здивування, хвилювання або інтерес. Спад інтонації може сигналізувати про завершення думки, спокій або сум. Змінна інтонація, це коли інтонація варіюється протягом фрази, це може бути ознакою збудження, радості чи інтересу.

Для аналізу та розпізнавання емоцій на основі голосу часто використовують методи машинного навчання. Моделі класифікації можуть працювати з алгоритмами: логістична регресія, метод опорних векторів (SVM), нейронні мережі. Ці моделі можуть бути навчені на наборі даних із заздалегідь розміченими емоціями, наприклад, з використанням аудіофайлів, які містять різні емоції (гнів, радість, смуток тощо)[4].

Акустичні ознаки та їх ваги визначаються наступним чином:

$$E = w_1 \cdot F0 + w_2 \cdot V + w_3 \cdot T + w_4 \cdot P ,$$

де E - емоційний показник,

F0 - основна частота,

V - гучність,

T - темп мовлення,

P - тривалість пауз,

w_1, w_2, w_3, w_4 - ваги, які визначаються в процесі навчання моделі.

Кожен із цих параметрів має різний внесок у загальну оцінку емоції, їхні ваги можуть бути налаштовані на основі навчальних даних, представлена блок схема (див. рис 3).

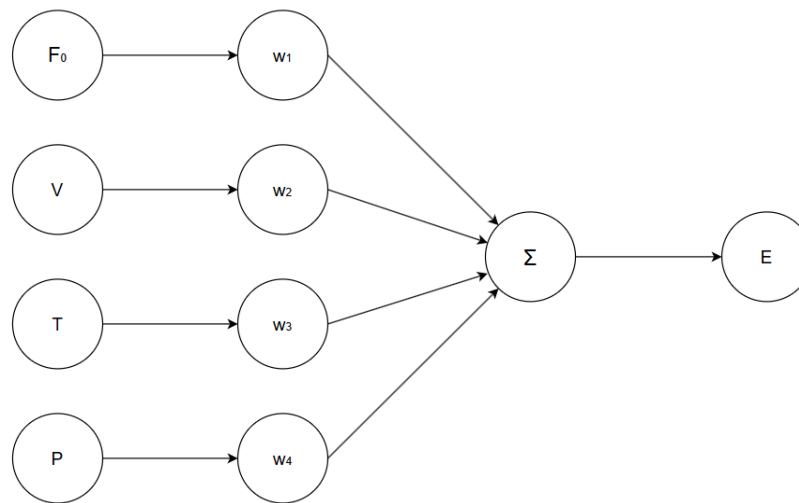


Рисунок 3 - Акустичні ознаки та їх ваги

Для більш наочного уявлення розпізнавання емоцій за голосом можна уявити, як можуть змінюватися акустичні характеристики при різних емоціях (див. табл. 1)

Таблица 1

Акустичні характеристики при різних емоціях

Емоція	Основна частота (F0)	Гучність (V)	Темп мовлення (T)	Паузи (P)
<i>Радість</i>	Висока	Середня/висока	Швидка	Короткі
<i>Сум</i>	Низька	Середня/низька	Повільна	Тривалі
<i>Гнів</i>	Дуже висока	Висока	Швидка	Короткі
<i>Страх</i>	Висока	Висока	Швидка	Тривалі

Для класифікації емоції можуть бути використані певні порогові значення цих характеристик.

Висновок. Розглянуті в роботі методи розпізнавання емоцій за виразами обличчя і розпізнавання емоцій за голосом - це дві різні технології, кожен з яких використовує різні види даних для аналізу та інтерпретації емоцій.

Розпізнавання емоцій за виразами обличчя - це складне завдання в галузі комп'ютерного зору і глибокого навчання. Використання моделей, таких як ResNet, дає змогу ефективно розв'язувати поставлені задачі, завдяки глибокому навчанню і здатності витягувати складні ознаки із зображень облич.

Розпізнавання емоцій за голосом ґрунтується на складному аналізі безлічі акустичних ознак, таких як частота, гучність, темп мовлення, інтонація та інші. Ці ознаки можуть бути піддані аналізу з використанням різних математичних і статистичних моделей, таких як машинне навчання і нейронні мережі, для точної класифікації емоцій.

ЛІТЕРАТУРА

1. B. Mandal, A. Okeukwu, Y. Theis. Masked face recognition using ResNet-50. (2021), DOI:10.48550/ARXIV.2104.08997
2. Enguerrand Boitel , Alaa Mohasseb , Ella Haig. MIST: Multimodal emotion recognition using DeBERTa for text, Semi-CNN for speech, ResNet-50 for facial, and 3D-CNN for motion analysis. Expert Systems with Applications Volume 270, 25 April 2025, 126236. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.126236>
3. Z. Huang, M. Dong, Q. Mao, Y. Zhan. Speech emotion recognition using CNN. Proceedings of the 22nd ACM international conference on multimedia, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA (2014), pp. 801-804, DOI: 10.1145/2647868.2654984
4. E. Lakomkin, C. Weber, S. Magg, S. Wermter. Reusing neural speech representations for auditory emotion recognition. (2018), DOI: 10.48550/ARXIV.1803.11508

REFERENCES

1. B. Mandal, A. Okeukwu, Y. Theis. Masked face recognition using ResNet-50. (2021), DOI:10.48550/ARXIV.2104.08997
2. Enguerrand Boitel , Alaa Mohasseb , Ella Haig. MIST: Multimodal emotion recognition using DeBERTa for text, Semi-CNN for speech, ResNet-50 for facial, and 3D-CNN for motion analysis. Expert Systems with Applications Volume 270, 25 April 2025, 126236. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.126236>
3. Z. Huang, M. Dong, Q. Mao, Y. Zhan. Speech emotion recognition using CNN. Proceedings of the 22nd ACM international conference on multimedia, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA (2014), pp. 801-804, DOI: 10.1145/2647868.2654984
4. E. Lakomkin, C. Weber, S. Magg, S. Wermter. Reusing neural speech representations for auditory emotion recognition. (2018), DOI: 10.48550/ARXIV.1803.11508

Received 31.03.2025.
Accepted 01.04.2025.

Analysis of emotions using facial expressions and voice features

This article presents methods for recognizing human emotions. Human emotion recognition is a rapidly developing field of artificial intelligence that is essential for improving human-computer interaction. However, most modern emotion recognition systems are limited to using only one data source of voice characteristics or facial expressions, which reduces the accuracy and robustness of recognition in complex environments. The problem with emotion recognition is that human emotions are multifaceted and variable. Modern emotion recognition systems based on voice or facial expression analysis have certain limitations that affect their accuracy and performance in real-world conditions. This article discusses methods of emotion recognition using two main channels - voice and visual. The study analyzes existing approaches to emotion recognition. For the analysis of emotions, we consider ResNet (for images) and SER (for sound) technologies. Particular attention is paid to the analysis and processing of acoustic characteristics such as intonation, volume, speech rate and pause duration, as well as the use of computer vision methods to detect facial

expressions such as a smile, pursed lips or furrowed brows. This research is advancing the field of emotion research by providing a better understanding of human emotional states. In the course of this work, we have considered methods of emotion recognition:

Emotion recognition from facial expressions and emotion recognition from voice are two different technologies, each of which uses different types of data to analyze and interpret emotions.

Emotion recognition from facial expressions is an exciting task in the field of computer vision and deep learning, with numerous applications in various industries. Emotion recognition from voice is based on a complex analysis of many acoustic features such as frequency, volume, speech rate, intonation, and others. These features can be analyzed using various mathematical and statistical models, such as machine learning and neural networks, to accurately classify emotions.

Keywords: emotion recognition, audio emotion recognition, facial emotion recognition, machine learning, SVM, computer vision, deep learning, CNN.

Дмитрієва Ірина Сергіївна - к.т.н., доцент, доцен кафедри Інформаційних технологій і систем Дніпровський металургійний інститут, Український державний університету науки і технологій, Україна.

Бімалов Дмитро Вікторович – аспірант кафедри Інформаційних технологій і систем Дніпровський металургійний інститут, Український державний університету науки і технологій, Україна.

Dmytriieva Iryna Serhiivna - Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Technologies and Systems, Dnipro Metallurgical Institute, Ukrainian State University of Science and Technology, Ukraine.

Bimalov Dmytro Viktorovych - Postgraduate Student of the Department of Information Technologies and Systems, Dnipro Metallurgical Institute, Ukrainian State University of Science and Technology, Ukraine.

МЕТОД ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ТА ЦІЛІСНОСТІ ПЕРСОНАЛЬНИХ ДАНИХ, ЩО ОБРОБЛЯЮТЬСЯ В БЛОКЧЕЙН-СИСТЕМІ

Анотація. В умовах стрімкої цифровізації та зростання кількості кіберзагроз особливої актуальності набуває проблема захисту персональних даних у сучасних інформаційних системах. Технологія блокчейн, завдяки своїм властивостям незмінності та розподіленості, створює нові можливості для захисту даних, проте вимагає розробки спеціалізованих методів забезпечення їх достовірності та цілісності. Досліджено специфічні виклики, пов'язані з верифікацією джерел даних та контролем за їх модифікацією в умовах розподіленої системи на базі технології блокчейн. У роботі запропоновано новий метод забезпечення цілісності та достовірності персональних даних, що базується на математичній моделі оцінки достовірності даних з використанням комплексної функції валідації та концепції "довіrenих джерел", що дозволило підвищити рівень захищеності даних та автоматизувати процес їх верифікації. Розроблено архітектуру системи з ієрархічною структурою вузлів верифікації та механізмами управління життєвим циклом даних. Результати дослідження підтверджують ефективність запропонованого методу для забезпечення балансу між захистом персональних даних та зручністю їх використання в реальних умовах.

Ключові слова: потоки даних, інформаційні системи, блокчейн, промисловість, ланцюги постачань, Blockchain.

Постановка проблеми. В умовах стрімкої цифровізації суспільства та зростаючої кількості кіберзагроз особливої актуальності набуває питання захисту персональних даних громадян. Технологія блокчейн, завдяки своїм фундаментальним властивостям незмінності та розподіленості, представляє собою перспективний інструмент для забезпечення безпеки персональних даних. Однак, впровадження цієї технології для обробки персональних даних створює низку специфічних викликів, пов'язаних із забезпеченням їх достовірності та цілісності [1].

Особливої уваги потребує проблема верифікації джерел даних та контролю за їх модифікацією в рамках блокчейн-системи. Традиційні методи захисту інформації виявляються недостатньо ефективними через специфіку розподіленої архітектури блокчейну та особливості обробки персональних даних. Додатковим фактором ризику є необхідність забезпечення відповідності вимогам законодавства щодо захисту персональних даних та можливості внесення змін до даних за запитом суб'єкта [2].

Існуючі рішення часто фокусуються на загальних аспектах безпеки блокчейн-систем, не враховуючи специфіку роботи з персональними даними. Це створює потребу в розробці спеціалізованих методів, які б забезпечували необхідний рівень достовірності та цілісності персональних даних при їх обробці в блокчейн-системі, одночасно відповідаючи нормативним вимогам та забезпечуючи необхідну гнучкість у керуванні даними [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В попередньому дослідженні було розглянуто методологічні засади впровадження технології блокчейн в інформаційні системи в рамках концепції "Індустрії 4.0" та запропоновано підходи до керування потоками даних у таких системах [4]. Проте питання забезпечення безпеки персональних даних у контексті блокчейн-систем потребує окремого глибокого дослідження. Внесок у розвиток цього напрямку зробили роботи, присвячені загальним принципам безпеки блокчейн-систем та особливостям їх застосування для захисту конфіденційної інформації. Особлива увага приділяється механізмам криптографічного захисту та методам верифікації даних у розподілених системах [5].

Важливим напрямком досліджень є розробка методів забезпечення відповідності блокчейн-систем вимогам законодавства про захист персональних даних. Дослідники зосереджують увагу на створенні механізмів, що дозволяють реалізувати право на забуття та можливість модифікації даних без порушення цілісності блокчейну [6]. Окремий напрямок складають роботи, присвячені розробці смарт-контрактів для управління доступом до персональних даних та автоматизації процесів їх обробки [7].

Актуальними залишаються питання інтеграції блокчейн-систем з існуючими інформаційними системами обробки персональних даних та забезпечення їх сумісної роботи. Дослідники також приділяють увагу проблемам масштабованості рішень та оптимізації продуктивності при збереженні необхідного рівня безпеки [8].

Метою дослідження є забезпечення достовірності та цілісності персональних даних, що обробляються в блокчейн-системі завдяки розробці нового методу на основі математичної моделі оцінки достовірності даних, що враховує комплексну функцію валідації для верифікації цифрового підпису, перевірки цілісності ланцюжка версій та валідації метаданих. Запропонований метод базується на концепції "довірих джерел" та ієрархічній структурі вузлів верифікації з алгоритмом консенсусу Proof-of-Authority, що дозволяє забезпечити високий рівень захисту при збереженні можливості контрольованої модифікації даних.

Основна частина. В сучасних умовах технологія блокчейн набуває все більшого поширення для захисту персональних даних завдяки своїм фундаментальним властивостям незмінності та розподіленості. Основними викликами при роботі з персональними даними в блокчейн-системах є забезпечення надійної верифікації джерел даних, контроль за їх модифікацією та створення ефективних механізмів валідації в умовах розподіленої архітектури. Традиційні методи захисту інформації не повністю відповідають цим вимогам через специфіку розподіленої архітектури блокчейну та особливості обробки персональних даних, що зумовлює необхідність розробки спеціалізованих рішень.

Запропонований метод базується на математичній моделі оцінки достовірності персональних даних у розподіленій блокчейн-системі, де кожен елемент даних D представляється як кортеж:

$$D = (V, S, T, H, M),$$

де V - версія даних;

S - цифровий підпис джерела;

T - часова мітка;

H - хеш попередньої версії;

M - метадані верифікації.

Достовірність даних оцінюється через комплексну функцію валідації:

$$F(D) = \alpha_1 V(S) + \alpha_2 T(H) + \alpha_3 C(M),$$

де D - набір даних, що перевіряється;

$V(S) \in [0,1]$ - функція верифікації цифрового підпису;

$T(H) \in [0,1]$ - функція перевірки цілісності ланцюжка версій;

$C(M) \in [0,1]$ - функція валідації метаданих;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - вагові коефіцієнти, що визначають пріоритетність різних аспектів перевірки.

Інтегральний показник достовірності розраховується як:

$$R = F(D) \times \prod (1 - P_i)$$

де P_i - ймовірність компрометації i -го рівня верифікації.

Кінцевий показник R знаходиться в діапазоні $[0,1]$, де:

$R = 1$ означає максимальну достовірність даних;

$R = 0$ означає повну недостовірність даних.

В основі методу лежить концепція "довірих джерел" - спеціально авторизованих вузлів мережі, які мають право вносити та модифікувати персональні дані. Кожен такий вузол характеризується власним рівнем довіри, який динамічно оновлюється на основі історії операцій.

Архітектура системи передбачає створення ієрархічної структури вузлів верифікації, де кожен рівень відповідає за певний аспект перевірки даних. На першому рівні здійснюється базова валідація форматів даних та перевірка відповідності встановленим схемам. Другий рівень забезпечує криптографічну верифікацію цифрових підписів та перевірку повноважень джерела даних. Третій рівень реалізує складні механізми перехресної перевірки даних та їх узгодження з існуючими записами.

Важливим елементом методу є система управління життєвим циклом даних, яка забезпечує можливість контрольованої модифікації інформації при збереженні історії змін. Це досягається через впровадження спеціальних смарт-контрактів, які реалізують логіку обробки запитів на модифікацію даних та забезпечують автоматизоване виконання необхідних перевірок.

Метод також включає механізми забезпечення відповідності вимогам законодавства щодо захисту персональних даних. Це досягається через впровадження системи керування згодами на обробку даних та механізмів реалізації права на забуття. Важливою особливістю є можливість селективного видалення даних без порушення цілісності

блокчейну, що реалізується через механізми soft-deletion та шифрування даних з подальшим знищенням ключів.

Наукова новизна запропонованого методу полягає у розробці підходу до забезпечення достовірності та цілісності персональних даних через впровадження динамічної системи верифікації з використанням математичного апарату теорії ймовірностей та криптографічних механізмів. На відміну від існуючих рішень, метод забезпечує можливість контрольованої модифікації даних без порушення принципу незмінності блокчейну, що досягається через новий механізм версіонування та валідації змін.

Реалізація методу. Практична реалізація запропонованого методу здійснюється через розгортання спеціалізованої блокчейн-системи, що використовує модифікований алгоритм консенсусу Proof-of-Authority (PoA) з додатковими механізмами верифікації для роботи з персональними даними.

Архітектура системи складається з наступних ключових компонентів:

1. Мережевий рівень:

– Модифікований протокол консенсусу PoA з підтримкою багаторівневої верифікації

– Система динамічного розподілу навантаження між вузлами

– Механізми синхронізації стану з підтримкою часткової реплікації

2. Рівень смарт-контрактів:

– Контракти управління доступом з підтримкою рольової моделі

– Контракти версіонування даних та управління життєвим циклом

– Контракти аудиту та моніторингу операцій

3. Рівень додатків:

– API для інтеграції з зовнішніми системами

– Інтерфейси адміністрування та моніторингу

– Модулі генерації звітності та аналітики

Технічна реалізація системи включає впровадження наступних інноваційних механізмів:

Ключовим елементом реалізації є система смарт-контрактів, які забезпечують автоматизацію процесів верифікації та управління даними. Контракти реалізують складну логіку перевірок та валідації, включаючи механізми крос-валідації даних між різними джерелами. Особлива увага приділяється оптимізації продуктивності та забезпеченню масштабованості рішення.

Система включає спеціалізовані компоненти для роботи з різними типами персональних даних, враховуючи їх специфіку та вимоги до захисту. Ключовими технічними інноваціями є:

1. Механізм версіонування даних з використанням системи контролю версій на основі деревовидної структури даних. Така структура дозволяє зберігати повну історію змін та забезпечує можливість відстеження всіх модифікацій персональних даних. На відміну від простого ланцюжка блоків, деревовидна структура дозволяє підтримувати паралельні гілки змін та їх подальше об'єднання, що важливо при роботі з персональ-

ними даними в розподіленому середовищі. Кожна версія даних зберігається як окремий вузол дерева з наступною структурою:

```
Version = {  
  id: UUID,  
  data: EncryptedData,  
  parentVersion: Hash,  
  timestamp: Integer,  
  signature: Signature,  
  metadata: {  
    validatorSet: [NodeID],  
    trustScore: Float,  
    validationProof: Hash  
  }  
}
```

2. Алгоритм псевдокоду розподіленого консенсусу з підтримкою валідації персональних даних:

```
ValidationConsensus(data) {  
  validators = SelectValidators(data.type)  
  validationResults = []  
  for validator in validators {  
    result = validator.Validate(data)  
    validationResults.append(result)  
  }  
  consensusReached = CalculateConsensus(validationResults)  
  return consensusReached  
}
```

3. Система керування доступом на основі розширеної рольової моделі, яка враховує не тільки ролі користувачів, але й додаткові атрибути та контекст операцій. Така модель дозволяє реалізувати гнучкі політики доступу, що враховують різні параметри: роль користувача, тип даних, час доступу, місце доступу, історію операцій тощо. Правила доступу описуються наступною структурою:

```
PolicyRule = {  
  userRole: String, // Роль користувача (адміністратор, оператор, аудитор)  
  dataType: String, // Тип персональних даних  
  operation: String, // Тип операції (читання, запис, модифікація)  
  timeRestrictions: { // Часові обмеження доступу  
    allowedHours: [Int], // Дозволені години доступу  
    allowedDays: [String] // Дозволені дні тижня  
  },  
  locationRestrictions: { // Географічні обмеження  
    allowedIPs: [String], // Дозволені IP-адреси  
    allowedRegions: [String] // Дозволені регіони  
  },  
}
```


Механізми диференційованого доступу та контролю за використанням даних через систему смарт-контрактів, що забезпечує автоматичну валідацію прав доступу, аудит всіх операцій з даними, контроль за дотриманням політик безпеки та. автоматичне виконання процедур відкликання доступу

Висновки. Запропонований у роботі метод забезпечення достовірності та цілісності персональних даних у блокчейн-системі представляє собою комплексне рішення, що враховує як технічні аспекти захисту інформації, так і нормативні вимоги до обробки персональних даних. Важливою перевагою є можливість забезпечення балансу між захистом даних та зручністю їх використання, що досягається через впровадження гнучких механізмів, таких як система керування доступом на основі розширеної рольової моделі, смарт-контрактів для автоматизації процесів верифікації даних та механізми диференційованого доступу з контролем за використанням даних.

Подальший розвиток методу передбачає вдосконалення механізмів автоматизації процесів верифікації, практичної реалізації та впровадження та розширення можливостей інтеграції з різними інформаційними системами: включаючи корпоративні бази даних, системи електронного документообігу та державні реєстри, у яких можна впровадити використання технології блокчейн. Планується також розробка додаткових інструментів аналізу та моніторингу для підвищення ефективності виявлення потенційних загроз та забезпечення превентивного захисту даних.

ЛІТЕРАТУРА

1. G. Zyskind, O. Nathan. 2015. Decentralizing privacy: Using blockchain to protect personal data. IEEE security and privacy workshops (pp. 180-184). IEEE. DOI: 10.1109/SPW.2015.27.
2. U.Tatar, Y.Gokce, B. Nussbaum. 2020. Law versus technology: Blockchain, GDPR, and tough trade-offs. Computer Law & Security Review, 38. DOI: 10.1016/j.clsr.2020.105454.
3. A.B. Haque, A. N. Islam, S. Hyrynsalmi, B. Naqvi, K.Smolander. 2021. GDPR compliant blockchains—a systematic literature review. Ieee Access, 9. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3069877
4. R. Sytnyk, Vik. Hnatushenko. "DATA FLOW MANAGEMENT IN INFORMATION SYSTEMS USING BLOCKCHAIN TECHNOLOGY." Scientific Bulletin of National Mining University 3 (2024). DOI: 10.33271/nvngu/2024-3/142.
5. R. Zhang, R. Xue, L. Liu. 2019. Security and privacy on blockchain. ACM Computing Surveys (CSUR), 52(3), pp.1-34. DOI: 10.1145/3316481.
6. Truong, N.B., Sun, K., Lee, G.M. and Guo, Y., 2019. GDPR-compliant personal data management: A blockchain-based solution. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 15, pp.1746-1761. DOI: 10.1109/TIFS.2019.2948287.
7. Kushwaha, S.S., Joshi, S., Singh, D., Kaur, M. and Lee, H.N., 2022. Systematic review of security vulnerabilities in Ethereum blockchain smart contract. IEEE Access, 10, pp.6605-6621. DOI: DOI:10.1109/ACCESS.2021.3140091.
8. Mourtzis, D., Angelopoulos, J. and Panopoulos, N., 2023. Blockchain integration in the era of industrial metaverse. Applied Sciences, 13(3), p.1353. DOI: 10.3390/app13031353.

REFERENCE

1. G. Zyskind, O. Nathan. 2015. Decentralizing privacy: Using blockchain to protect personal data. IEEE security and privacy workshops (pp. 180-184). IEEE. DOI: 10.1109/SPW.2015.27.
2. U.Tatar, Y.Gokce, B. Nussbaum. 2020. Law versus technology: Blockchain, GDPR, and tough trade-offs. Computer Law & Security Review, 38. DOI: 10.1016/j.clsr.2020.105454.
3. A.B. Haque, A. N. Islam, S. Hyrynsalmi, B. Naqvi, K.Smolander. 2021. GDPR compliant blockchains—a systematic literature review. Ieee Access, 9. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3069877
4. R. Sytnyk, Vik. Hnatushenko. "DATA FLOW MANAGEMENT IN INFORMATION SYSTEMS USING BLOCKCHAIN TECHNOLOGY." Scientific Bulletin of National Mining University 3 (2024). DOI: 10.33271/nvngu/2024-3/142.
5. R. Zhang, R. Xue, L. Liu. 2019. Security and privacy on blockchain. ACM Computing Surveys (CSUR), 52(3), pp.1-34. DOI: 10.1145/3316481.
6. Truong, N.B., Sun, K., Lee, G.M. and Guo, Y., 2019. GDPR-compliant personal data management: A blockchain-based solution. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 15, pp.1746-1761. DOI: 10.1109/TIFS.2019.2948287.
7. Kushwaha, S.S., Joshi, S., Singh, D., Kaur, M. and Lee, H.N., 2022. Systematic review of security vulnerabilities in Ethereum blockchain smart contract. IEEE Access, 10, pp.6605-6621. DOI: DOI:10.1109/ACCESS.2021.3140091.
8. Mourtzis, D., Angelopoulos, J. and Panopoulos, N., 2023. Blockchain integration in the era of industrial metaverse. Applied Sciences, 13(3), p.1353. DOI: 10.3390/app13031353.

Received 31.03.2025.

Accepted 01.04.2025.

Method for ensuring the reliability and integrity of personal data processed in a blockchain system

Recent research and publications. Blockchain technology has shown significant potential for securing personal data through its fundamental properties of immutability and distribution. However, existing solutions often focus on general blockchain security aspects without considering the specifics of personal data processing and compliance requirements.

The aim of the study. Development of a specialized method for ensuring the reliability and integrity of personal data in blockchain systems while maintaining compliance with data protection regulations and enabling controlled data modification.

Main material of the study. The paper presents a method based on a mathematical model for data reliability assessment using a complex validation function and the concept of "trusted sources". Conclusions. The designed method provides a comprehensive solution that balances technical security aspects with regulatory requirements for personal data processing.

Гнатушенко Вікторія Володимирівна – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технології.

Ситник Роман Сергійович – аспірант кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технології.

Hnatushenko Viktoriia – Doctor of engineering's sciences, Professor, Head of Department of Information Technologies and Systems, Ukrainian State University of Science and Technology.

Sytnyk Roman – Postgraduate Student, Department of Information Technologies and Systems, Ukrainian State University of Science and Technology.

О.П. Гожий, І.О. Калініна, В.О. Гожий, В.В. Димо

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ПРОГНОЗУВАННЯ ПОПИТУ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Анотація. У статті досліджено системний підхід до вирішення проблеми прогнозування попиту на електроенергію в Україні на основі методів машинного навчання. Представлено послідовність етапів обробки даних при розв'язанні задачі прогнозування методами машинного навчання. Розглянуто методологію вирішення задачі прогнозування на часових рядах. Процес прогнозування складається з п'яти етапів. Перший етап включає збір, аналіз та інтерпретацію даних. Наступний етап включає процедури дослідження та підготовки даних. Третій етап - етап моделювання складається з трьох частин: підготовка набору даних для моделювання, вибір і навчання моделей і оцінка їх якості. Четвертий етап – етап прогнозування та розрахунок якісних показників прогнозів. На п'ятому етапі виконуються процедури підвищення ефективності обраної моделі прогнозування. На етапі моделювання використовувалися такі моделі: ARIMA, GAM, ANN і BSTS. Проведено аналіз моделей і на основі кожної моделі побудовано прогнози. Для побудованих моделей з найкращими показниками якості розраховано прогнозні значення. Прогнози порівнювали з даними валідаційної вибірки. Для вибору оптимальної моделі використовували такі показники: MAPE, MAE, MSE, RMSE. Найкращі результати показала модель BSTS.

Ключові слова: Forecasting, Electricity demand in Ukraine, Machine learning methods, Data processing, Methodology of forecasting, ARIMA, GAM, ANN, BSTS.

Вступ. Методи машинного навчання значно підвищують ефективність вирішення таких проблем машинного навчання, як класифікація, регресія та прогнозування. Але застосування кожного методу вимагає врахування особливостей набору даних, способу представлення даних, особливостей задачі, що розв'язується. Тому один із підходів до вирішення проблем прогнозування полягає в систематичному використанні кількох моделей прогнозування з подальшим вибором моделі, яка дає найкращі результати.

Сьогодні споживання енергії в усьому світі стрімко зростає через зростання попиту на електроенергію через постійно зростаюче населення планети, масштабний розвиток промисловості та технологій, підвищення рівня життя, масштабну індустріалізацію в країнах, що розвиваються, і необхідність підтримувати високі темпи сталого розвитку. Електроенергетика є основою економічного потенціалу будь-якої країни. Ця галузь відноситься до галузей критичної інфраструктури, які повинні дуже швидко реагувати

на зовнішні зміни, такі як стихійні лиха, військові дії, а також на зміну умов на ринку електроенергії.

Прогнозування попиту на електроенергію в Україні сьогодні є стратегічно важливим питанням, оскільки в умовах війни та постійних атак на енергетичну інфраструктуру необхідно оперативно розподіляти енергоресурси для задоволення потреб різних типів споживачів.

Враховуючи ці фактори, створення адекватних і точних моделей прогнозування попиту на електроенергію є необхідним і важливим для точного планування інвестицій у виробництво та розподіл електроенергії. Загальною складністю розробки якісних прогнозів є визначення достатньої кількості інформації для побудови прогнозних моделей. Якщо даних недостатньо, то прогноз буде неточним. Подібним чином, якщо інформація є неточною або надлишковою, попередня обробка даних і створення моделей для прогнозування буде складним. Тому виникає необхідність підвищення точності прогнозних моделей за рахунок використання сучасних ефективних методів і підходів.

В даній роботі досліджується системний підхід до вирішення завдань прогнозування. Для вирішення завдань прогнозування використовуються різноманітні методи і моделі машинного навчання, для реалізації програмних модулів використовується мова програмування *R*, та середовище розробки *RStudio*.

Постановка проблеми. Метою даної роботи є дослідження і розробка на основі системного підходу методології вирішення задач прогнозування за допомогою методів машинного навчання. А також дослідити задачу прогнозування попиту на електроенергію в Україні. Порівняти ефективність різних методів машинного навчання у вирішенні задачі прогнозування попиту на електроенергію.

Аналіз останніх досліджень. У роботі [1] наведено алгоритм прогнозування потреби в електроенергії, яка пов'язана з максимальним навантаженням в електромережі. Авторами обґрунтовано та застосовано метод СВР. Набір даних і параметри методу були налаштовані та оптимізовані гібридним методом. Такий підхід дозволяє зменшити загальну похибку прогнозу. Гібридний метод базується на поєднанні моделі нейронної мережі, методу ARIMA та модифікованого методу SVR.

У роботі [2] для обробки вихідних даних використано алгоритм штучної бджолої колонії. Для прогнозування попиту на електроенергію алгоритм використовувався в поєднанні з ансамблевими моделями. Ряд незалежних вхідних змінних було використано для створення моделей однорідного ансамблю. Запропонована авторами модель ансамблю забезпечує більш точні прогнози. Автори [3] пропонують поєднати модель прямої нейронної мережі з архітектурою згорткової нейронної мережі для прогнозування попиту на електроенергію. Такий підхід виявився найефективнішим. Методи глибокого навчання також застосовувалися в [4]. У документі зроблено прогноз попиту на енергію на основі статистичних даних за попередні роки. Для більш глибокого вивчення даних використовувався метод кластерного аналізу. Навантаження було класифіковано за певними періодами та представлено у вигляді кластерів. Прогноз попиту на електроенергію оцінювали за допомогою нейромережових моделей і SVM.

У статті [5] представлено підхід до прогнозування попиту на електроенергію на основі гібридної моделі. Модель побудована за допомогою комбінації ARIMA та LSSVM. Результати прогнозування показують, що такий підхід до побудови моделі дозволяє враховувати аномальні значення в даних. У роботі [6] автори використали модель регресійного аналізу для прогнозування попиту на електроенергію в різних галузях промисловості.

Для оцінки пікового місячного попиту на електроенергію в [7] використовувалися наступні методи: метод ANFIS, спеціальний метод обробки даних та різні моделі нейронних мереж. У поєднанні із запропонованими моделями було виявлено, що ці методи краще підходять для визначення пікового попиту на електроенергію. У [8] він опублікував довгострокові прогнози попиту на електроенергію в Греції, а також використав зв'язок між часовими рядами та ефективними кількома критеріями. Модель оцінки витрат досліджено з використанням даних, зібраних між 1999 та 2013 роками. Вплив виробництва електроенергії в європейських країнах під час карантину досліджено в роботах [9,10].

У роботах [11,12] досліджено ефективність різних підходів і стратегій для прогнозування щоденного споживання енергії. Автори [13] досліджували підхід до прогнозування навантаження в електричній мережі за допомогою методів штучного інтелекту. Авторами [14] розроблено модель прогнозування попиту на електроенергію для житлових і комерційних будівель на основі ансамблевих методів. Розглянуто короткострокове прогнозування.

У [15] автори використовують моделі SVR у поєднанні з WOA, що включає навчання на основі еліти та хаотичної опозиції (ECWOA) для покращення результатів прогнозування. Результати експериментів показують, що врахування інформації про ціни на електроенергію призводить до підвищення точності прогнозування. У роботах [16,17] розглядаються підходи на основі алгоритмів машинного навчання для підвищення точності короткострокових прогнозів. Використовувалися такі методи: SVM, LSTM, SVR та ансамблеві структури.

У [18] для отримання прогнозних значень електроенергії використано сезонно скориговану регресію. У роботі [19] автори на конкретних прикладах продемонстрували перевагу LSTM над SVM у задачі прогнозування попиту на електроенергію. У [20–22] були досліджені різні архітектури нейронних мереж у поєднанні з евристичними алгоритмами для прогнозування попиту на електроенергію в різних країнах.

Методологія вирішення завдань прогнозування. Послідовність етапів обробки даних при розв'язанні прогнозної задачі наведена на рис. 1. Вона складається з наступних етапів: збір даних, дослідження та підготовка даних, побудова та навчання прогнозних моделей, вибір найкращих моделей та розрахунок прогнозів, оцінка та перевірка якості прогнозів. [27–28].

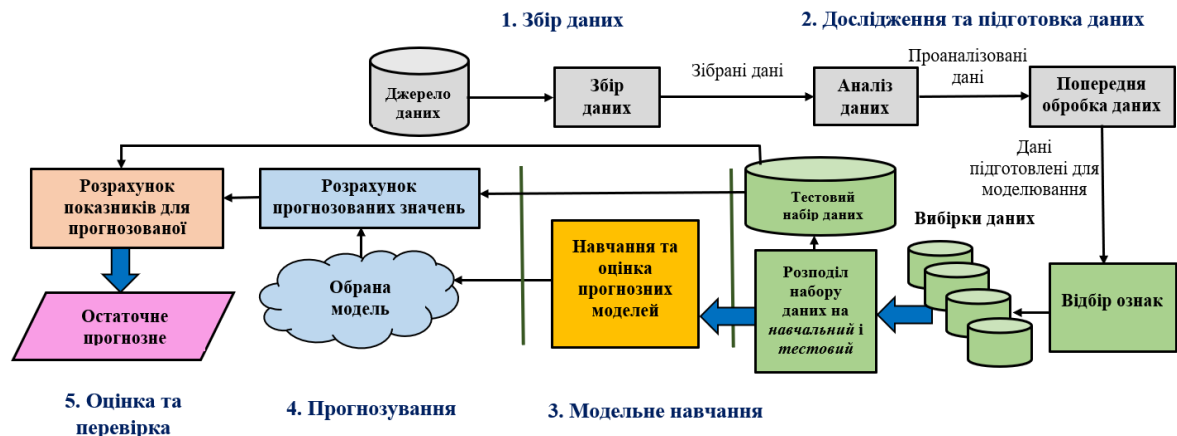


Рисунок 1 - Послідовність етапів вирішення задач машинного навчання

Інформаційна модель для вирішення задачі прогнозування за допомогою методів машинного навчання описана за допомогою наступного набору елементів:

$$ML_T = \{NData_T, NL_{Data}, NS_{Data}, MA_T, Mod_T, MP_T, Us_T\}$$

де $NData_T$ – набір наборів даних, які обробляються при вирішенні задачі машинного навчання; NL_{Data} – набір нелінійностей даних, які враховуються при вирішенні задачі машинного навчання; NS_{Data} – набір нестационарних процесів, які враховуються при вирішенні задачі машинного навчання; MA_T – набір методів аналізу та попередньої обробки масивів даних; Mod_T – набір методів побудови моделі та методів моделювання для вирішення задачі машинного навчання; MP_T – набір методів прогнозування на основі ймовірнісного статистичного аналізу з урахуванням нелінійності та нестационарності даних; Us_T – це набір невизначеностей під час вирішення задачі машинного навчання.

На основі розробленої інформаційної моделі створено опис етапів вирішення задач прогнозування та розроблено методологію вирішення задачі прогнозного моделювання на часових рядах, яка представлена на рисунку 2.

Методологія була розроблена на основі системного підходу. Методологія представлена у вигляді послідовності наступних етапів. Перший етап необхідний для збору, аналізу та інтерпретації вихідних даних. При завантаженні набір даних аналізується, визначається його структура та особливості окремих атрибутів. У результаті попередньої обробки даних набір готується для подальшого аналізу – інтелектуального аналізу даних.

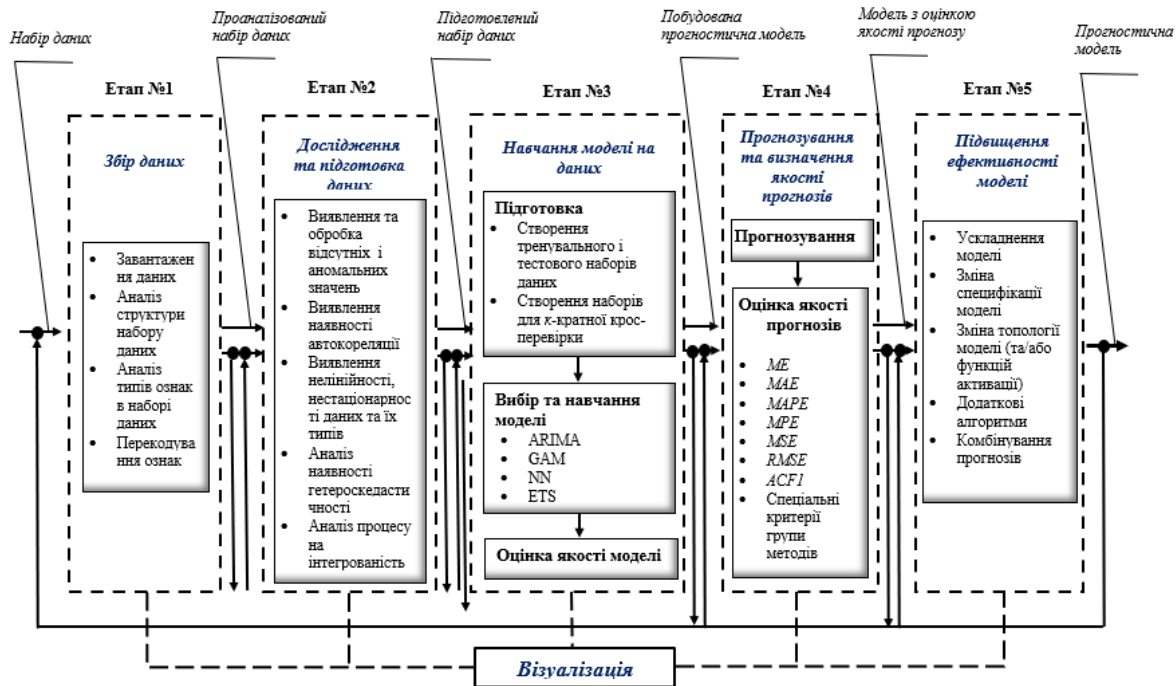


Рисунок 2 - Методологія вирішення задачі прогнозного моделювання на часових рядах

На *першому* етапі відбувається збір даних. *Другий* етап передбачає процедури дослідження та підготовки даних. Аналізується описова статистика для кожної змінної, ідентифікуються відсутні та аномальні значення, визначається рівень автокореляції, ідентифікуються нелінійність і нестационарність даних та їх типи, аналізується гетероскедастичність та аналізується процес на інтегрованість.

Третій етап - етап моделювання складається з трьох частин: підготовка набору даних для моделювання, вибір і навчання моделей і оцінка їх якості. Перед початком моделювання підготовлений набір даних розбивається на навчальну та тестову вибірки, а також створюються набори для перехресної перевірки. При виборі моделі алгоритми моделювання перевіряються на навчальній вибірці і вибирається найкращий за певними критеріями якості.

Четвертий етап — етап побудови прогнозів та оцінки їх якості. На *п'ятому* етапі виконуються процедури підвищення ефективності обраної моделі прогнозування. Для різних методів моделювання для підвищення якості можна використовувати наступні методи: ускладнення структури моделі, зміна її специфікацій, зміна топології моделі (та/або функцій активації), використання додаткових алгоритмів, комбінування прогнозних значень.

Важливою особливістю представленого методу є візуалізація. За допомогою візуалізації на кожному етапі можна скорегувати послідовність дій і повернутися до попередніх етапів. Етапи методу мають особливості, що відображають предметну область вирішення проблеми.

Прогнозування попиту на електроенергію. Набір даних. Данні для прогнозування попиту на електроенергію в Україні представлено на веб-ресурсі державного

оператора ринку електроенергії [23]. Інтервал часу спостереження охоплює період з 01.07.2019 по 04.10.2024. Набір містить погодинні дані про обсяги електроенергії, продажі електроенергії, попит на неї в МВт·год в електромережах України та ціни (рис. 3).

```
'data.frame': 69385 obs. of 10 variables:
 $ date      : chr  "2019-07-01" "2019-07-01" "2019-07-01" "2019-07-01"
 $ hour      : int   1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ...
 $ energy_system : chr  "Burshtyn peninsula" "Burshtyn peninsula" "Burshtyn peninsula" "Burshtyn peninsula"
 $ price      : num   939 939 939 939 939 939 939 939 939 939 ...
 $ amount_sales : num   313 241 259 153 153 ...
 $ amount_purchase : num   313 241 259 153 153 ...
 $ amount_sales_nominated : num   313 241 259 153 153 ...
 $ amount_purchase_nominated : num   364 334 320 320 317 ...
 $ demand      : num  -50.7 -93.3 -60.8 -167.9 -164.5 ...
 $ price_cap    : num   959 959 959 959 959 ...
```

Рисунок 3 - Структура набору даних «електрика»

Змінна з годинниковими позначками в день включається до змінної індексування дати та часу, а змінна попиту вибирається з набору як результуюча змінна. Зазначається, що змінна `energy_system` приймає лише три значення: півострів Бурштин, ОЕС України, ОЕС України (синхронізовано з системами ENTSO-E). Значення цієї змінної до 24 лютого 2022 року було розділено на дві окремі підсистеми: «ЄС України» та «Бурштинський енергоострів». З 24 лютого 2022 року українська енергосистема синхронізована з європейською енергосистемою ENTSO-E. Таким чином, до 24 лютого 2024 року в датасеті містяться дані попиту окремо для двох підсистем, а для розрахунку загальноукраїнських показників значення для цих підсистем підсумовуються (рис. 4).

```
> # Aggregation of the demand of individual power grid subsystems into one time series
> energy_demand <- data.frame(datetime = unique(data$datetime), demand=0)
> for(i in 1:length(energy_demand$datetime))
+ {
+   energy_demand$demand[i] = sum(data$demand[which(data$datetime==energy_demand$datetime[i])])
+ }
```

Рисунок 4 - Фрагмент коду для агрегування попиту окремих підсистем електромережі в один часовий ряд

Після перевірки в наборі даних було знайдено 5 відсутніх значень. Відсутні значення мають річний інтервал і реєструються в кінці березня або на початку квітня. Наявність розривів пов'язана з переходом годинників на літній час. Враховуючи, що загальний обсяг спостережень становить 69 385, для заповнення пропущених значень використано метод LOCF [24]. Після аналізу часових рядів частоту вибірки було зменшено. Погодинні спостереження попиту на електроенергію в наборі були агреговані в середньодобові.

Для побудови прогнозних моделей ми використали частину даних з 01.06.2022 по 04.10.2024, за винятком пікових ділянок ряду близько 24.02.2024 (рис. 5). На рисунку видно, що попит може приймати від'ємні значення – це відповідає ситуації, коли обсяги продажу електроенергії перевищують обсяги купівлі.

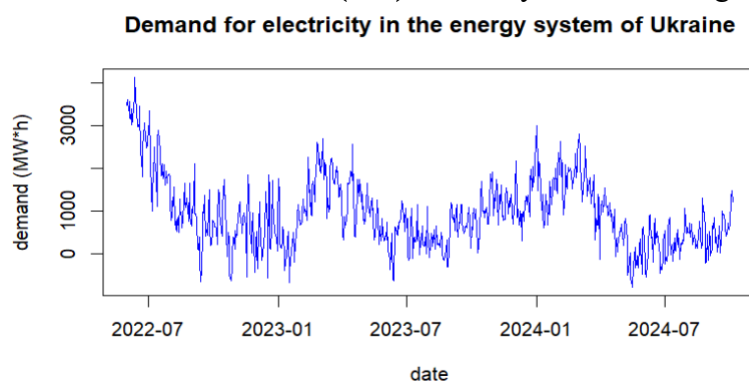


Рисунок 5 - Графік фрагмента часового ряду energy_demand

Важливою умовою побудови надійних прогнозних моделей є розуміння структури часових рядів. Декомпозиція ряду методом STL [25,26] дозволила визначити основні принципи моделювання. Гіпотетична нестационарність часового ряду підтверджується тестами Лjung-Бокса на незалежність, розширеним тестом Дікі-Фуллера, тестом KPSS на рівень стаціонарності та тестом Філіпса-Перрона на одиничний корінь.

Часові ряди були перевірені на нелінійність за допомогою набору статистичних тестів. Результати випробувань підтвердили візуальну нелінійність ряду, оскільки р-значення менше 0,05. Гетероскедастичність ряду підтверджена тестом Маклеода-Лі (р-значення менше 0,05). В результаті тестів визначається кількість необхідних диференціацій і сезонних диференціацій для отримання стаціонарного часового ряду. Для перевірки часових рядів на автокореляцію були використані тести Дарбіна-Ватсона та Брейша-Готфрі. Для обох тестів отримані р-значення значно менші за 0,05, що підтверджує автокореляцію часового ряду. Графіки вибіркової автокореляційної функції (ACF) і часткової автокореляційної функції (PACF) на рисунку 8 відповідають очікуванням: автокореляційна функція монотонно зменшується зі збільшенням часового зсуву.

Результати попереднього аналізу підтверджують належність досліджуваного процесу до класу нелінійних і нестационарних.

Побудова та оцінка прогнозних моделей. Етап моделювання починається з поділу набору даних на дві частини: навчальну та тестову вибірки. Останні 14 спостережень (двотижневий діапазон) зберігаються як тестові спостереження, що відповідає горизонту прогнозу в 14 днів для короткострокового прогнозування (рис.6).

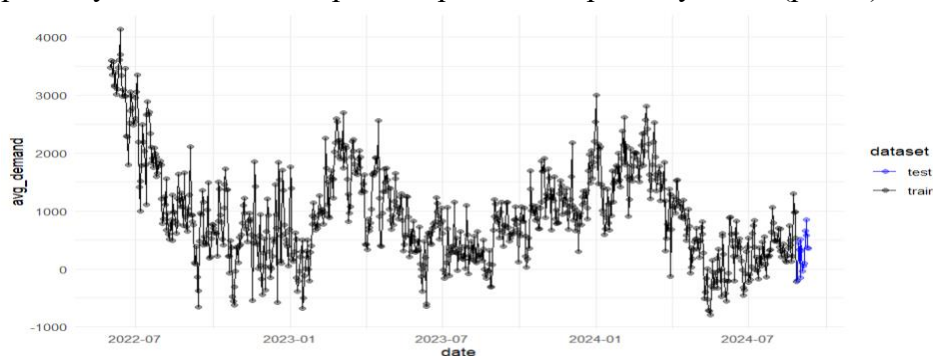


Рисунок 6 - Навчальні (чорний) та тестові (синій) дані щодо динаміки середньодобової потреби в електроенергії

На етапі моделювання в якості базових моделей прогнозу були використані наступні статистичні моделі: ARIMA, метод підгонки адитивних регресійних моделей (GAM), штучні нейронні мережі прямого поширення (NNAR), байєсовські структурні моделі часових рядів (BSTS). Вибір цих моделей обумовлений їх здатністю розпізнавати складні закономірності в рядах реального часу з урахуванням нелінійності та нестаціонарності досліджуваного процесу [27].

Прогнозування та оцінка результатів. Моделі з найкращими показниками якості були покладені в основу розрахунку прогнозних значень (табл. 1). Показники якості моделей визначали на дослідному зразку. Для вибору оптимальної моделі використовувалися такі показники: MAPE, MAE, MSE та RMSE.

На рисунку 7 показано візуалізацію прогнозних значень для часових рядів попиту на електроенергію в Україні, побудованих за допомогою моделі BSTS (M7). Чорна лінія представляє 50 навчальних даних, синя лінія представляє прогнозовані значення часового ряду. Жовті крапки на графіку – це дані досліджуваного зразка. Зелені пунктирні лінії обмежують 95% довірчий інтервал прогнозних значень.

Таблиця 1

Порівняльна таблиця критеріїв якості прогнозу для різних моделей				
Types of models	RMSE	MAE	MAPE	MSE
ARIMA (1, 1, 2) (2, 0, 0) ₇	360.778	320.009	3.578	130160.77
GAM (annual and weekly seasonal components)	387.664	339.114	3.704	150283.38
BSTS (robust local linear trend + autoregressive component + weekly seasonality component)	289.527	215.634	1.002	83825.84
NNAR (n=15, Sigmoid, maxit=5000)	352.032	314.993	3.289	123926.34

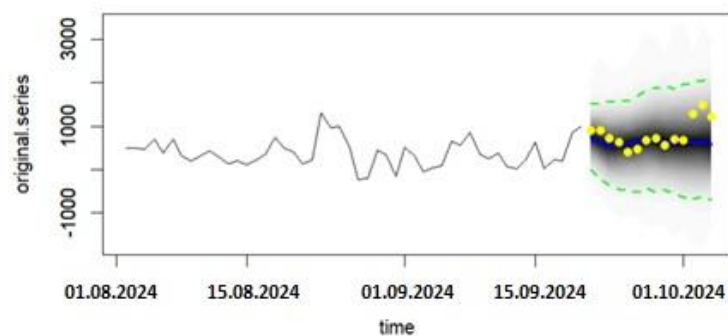


Рисунок 7 - Візуалізація прогнозних значень для фрагмента часового ряду

Представлені результати демонструють ефективність використання моделей BSTS для вирішення задач прогнозування. Подальше покращення результатів прогнозування можливе за рахунок використання комбінованих прогнозів [27, 28].

Висновки. У роботі представлено дослідження системного підходу до прогнозування. Була розглянута задача прогнозування попиту на електроенергію в Україні за допомогою методів машинного навчання. Дослідження проводили на основі даних 2019-2024 років. Розроблено та представлено послідовність етапів обробки даних при розв'язанні задачі прогнозування методами машинного навчання. Послідовність включає наступні кроки: збір даних, дослідження та підготовка даних, побудова та навчання моделей прогнозу, вибір найкращої моделі та розрахунок прогнозів, оцінка та перевірка якості прогнозів. Запропоновано загальну методику вирішення задач прогнозування часових рядів на основі методів машинного навчання. Рішення задачі прогнозування складається з п'яти етапів. На першому етапі здійснюється збір, аналіз та інтерпретація даних. На другому етапі проводяться дослідження та процедури підготовки даних. Третій етап - етап моделювання складається з трьох частин: підготовка набору даних для моделювання, вибір і навчання моделей і оцінка їх якості. Четвертий етап – етап прогнозування та визначення якості прогнозів. На п'ятому етапі виконуються процедури підвищення ефективності обраної моделі прогнозування. На етапі моделювання були використані такі моделі: ARIMA, GAM, ANN та BSTS. Було проведено детальний аналіз моделей і зроблено прогнози на основі кожної моделі. Для побудованих моделей з найкращими показниками якості розраховано прогнозні значення. Прогноз розроблявся на 2 тижні. Прогнози порівнювали з даними валідаційної вибірки. Для вибору оптимальної моделі та її оцінки використовувалися такі показники: MAPE, MAE, MSE, RMSE. Найкращі результати показала модель BSTS. Це підтверджує ефективність моделі BSTS при прогнозуванні на реальних даних.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. M. R. Kazemzadeh, A. Amjadian, T. Amraee. A hybrid data mining driven algorithm for long term electric peak load and energy demand forecasting. *Energy* 2020, 204, 117948.
2. J. Hao, X. Sun, Q. Feng. A Novel Ensemble Approach for the Forecasting of Energy Demand Based on the Artificial Bee Colony Algorithm. *Energies* 2020, 13, 550.
3. J. del Real, F. Dorado, J. Durán. Energy Demand Forecasting Using Deep Learning: Applications for the French Grid. *Energies* 2020, 13, 2242.
4. J. Bedi, D. Toshniwal. Deep learning framework to forecast electricity demand. *Appl. Energy* 2019, 238, pp. 1312–1326.
5. F. Kaytez. A hybrid approach based on autoregressive integrated moving average and least-square support vector machine for long-term forecasting of net electricity consumption. *Energy* 2020, 197, 117200.
6. S. Di Leo, P. Caramuta, P. Curci, C. Cosmi. Regression analysis for energy demand projection: An application to TIMES-Basilicata and TIMES-Italy energy models. *Energy* 2020, 196, 117058.

7. P. Ramsami, R. T. A. King. Neural Network Frameworks for Electricity Forecasting in Mauritius and Rodrigues Islands. In Proceedings of the 2021 IEEE PES/IAS PowerAfrica, Nairobi, Kenya, 2021, pp. 1–5.
8. D. Angelopoulos, Y. Siskos, J. Psarras. Disaggregating time series on multiple criteria for robust forecasting: The case of long-term electricity demand in Greece. *Eur. J. Oper. Res.* 2019, 275, pp. 252–265.
9. U. Şahin, S. Ballı, Y. Chen. Forecasting seasonal electricity generation in European countries under COVID-19-induced lockdown using fractional grey prediction models and machine learning methods. *Appl. Energy* 2021, 302, 117540.
10. R. Hou, S. Li, M. Wu, G. Ren, W. Gao, M. Khayatnezhad. Assessing of impact climate parameters on the gap between hydropower supply and electricity demand by RCPs scenarios and optimized ANN by the improved Pathfinder (IPF) algorithm. *Energy* 2021, 237, 121621.
11. Baba. Advanced AI-based techniques to predict daily energy consumption: A case study. *Expert Syst. Appl.* 2021, 184, 115508.
12. M. Pegalajar, L.G. B. Ruíz, M. P. Cuéllar, R. Rueda. Analysis and enhanced prediction of the Spanish Electricity Network through Big Data and Machine Learning techniques. *Int. J. Approx. Reason.* 2021, 133, pp. 48–59.
13. N. M. M. Bendaoud, N. Farah, S. Ben Ahmed. Applying load profiles propagation to machine learning based electrical energy forecasting. *Electr. Power Syst. Res.* 2022, 203, 107635.
14. R. Porteiro, L. Hernández-Callejo, S. Nesmachnow. Electricity demand forecasting in industrial and residential facilities using ensemble machine learning. *Rev. Fac. De Ing.* 2022, 102, pp. 9–25.
15. Y. Lu, G. Wang. A load forecasting model based on support vector regression with whale optimization algorithm. *Multimed. Tools Appl.* 2023, 82, pp. 9939–9959.
16. S. Li, X. Kong, L. Yue, C. Liu, M. A. Khan, Z. Yang, H. Zhang. Short-Term Electrical Load Forecasting Using Hybrid Model of Manta Ray Foraging Optimization and Support Vector Regression. *J. Clean. Prod.* 2023, 388, 135856.
17. J. Huang, M. Algahtani, S. Kaewunruen. Energy Forecasting in a Public Building: A Benchmarking Analysis on Long Short-Term Memory (LSTM), Support Vector Regression (SVR), and Extreme Gradient Boosting (XGBoost) Networks. *Appl. Sci.* 2022, 12, 9788.
18. C. E. Velasquez, M. Zocatelli, F. B. Estanislau, V. F. Castro. Analysis of time series models for Brazilian electricity demand forecasting. *Energy* 2022, 247, 123483.
19. F. Pallonetto, C. Jin, E. Mangina. Forecast electricity demand in commercial building with machine learning models to enable demand response programs. *Energy AI* 2022, 7, 100121.
20. E. C. May, A. Bassam, L. J. Ricalde, M. E. Soberanis, O. Oubram, O. M. Tzuc, A. Y. Alanis, A. Livas-García. Global sensitivity analysis for a real-time electricity market forecast by a machine learning approach: A case study of Mexico. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2022, 135, 107505.

21. W. J. Niu, Z. K. Feng, S. S. Li, H. J. Wu, J. Y. Wang. Short-term electricity load time series prediction by machine learning model via feature selection and parameter optimization using hybrid cooperation search algorithm. *Environ. Res. Lett.* 2021, 16, 055032.
22. R. Luzia, L. Rubio, C. E. Velasquez. Sensitivity analysis for forecasting Brazilian electricity demand using artificial neural networks and hybrid models based on Autoregressive Integrated Moving Average. *Energy* 2023, 274, 127365.
23. Energy Map. URL: <https://map.ua-energy.org/uk/resources/5a616fba-fbc9-4073-9532-9161592faca8/>
24. P. Bidyuk, I. Kalinina, A. Gozhyj. An Approach to Identifying and Filling Data Gaps in Machine Learning Procedures. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies (Switzerland)*. 2022. Vol. 77, pp. 164-176.
25. R. J. Hyndman, G. Athanasopoulos. *Forecasting: Principles and Practice* 3rd ed. Edition. Publisher: OTexts. 2021, 442 p.
26. T. Aggarwal. Master the Power of Seasonal Decomposition of Time Series (STL): Unveiling the Essence of Time. 2023. URL: https://medium.com/@tushar_aggarwal/master-the-power-of-seasonal-decomposition-of-time-series-stl-unveiling-the-essence-of-time-26c19a910314
27. Kalinina., P. Bidyuk., A. Gozhyj, P. Malchenko. Combining Forecasts Based on Time Series Models in Machine Learning Tasks. *CEUR-WS*. 2023. Vol. 3426. Pp. 25-35. [CEUR-WS.org/Vol-3426/paper2.pdf](https://ceur-ws.org/Vol-3426/paper2.pdf).
28. Kalinina, P. Bidyuk, A. Gozhyj. Construction of Forecast Models based on Bayesian Structural Time Series. *International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies. CSIT_2022*. 2022. Pp. 180-184. doi: 10.1109/CSIT56902.2022.10000484.

Received 31.03.2025.
Accepted 01.04.2025.

System approach to forecasting electricity demand based on machine learning

The article explores a systemic approach to solving the problem of forecasting electricity demand in Ukraine based on machine learning methods. The sequence of data processing stages when solving the forecasting problem using machine learning methods is presented. The methodology for solving the forecasting problem on time series is considered. The forecasting process consists of five stages. The first stage includes data collection, analysis and interpretation. The next stage includes data research and preparation procedures. The third stage - the modeling stage consists of three parts: preparation of a data set for modeling, selection and training of models and assessment of their quality. The fourth stage is the forecasting stage and calculation of quality indicators of forecasts. At the fifth stage, procedures are performed to increase the efficiency of the selected forecasting model. At the modeling stage, the following models were used: ARIMA, GAM, ANN and BSTS. The models were analyzed and forecasts were built based on each model. For the built models with the best quality indicators, forecast values were calculated. The forecasts were compared with the data of the validation sample. To select the optimal model, the following indicators were used: MAPE, MAE, MSE, RMSE. The BSTS model showed the best results.

Keywords: Forecasting, Electricity demand in Ukraine, Machine learning methods, Data processing, Methodology of forecasting, ARIMA, GAM, ANN, BSTS

Гожий Олександр Петрович – професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, д.т.н., професор.

Калініна Ірина Олександрівна – Професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, д.т.н., доцент.

Гожий Віктор Олександрович – старший викладач кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, к.т.н..

Димо Валерій Володимирович – аспірант, кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили.

Gozhyj Oleksandr Petrovych - professor of the Department of Intellectual Information Systems of the Black Sea National University named after Petra Mohyly, D.of I.S., professor.

Kalinina Iryna Oleksandrivna - Professor of the Department of Intellectual Information Systems of the Black Sea National University named after Petra Mohyly, D.of I.S., associate professor.

Gozhyi Viktor Oleksandrovych – Senior Lecturer, Department of Intellectual Information Systems, Petro Mohyla Black Sea National University, Candidate of Technical Sciences.

Dymo Valeriy Volodymyrovych – Postgraduate Student, Department of Intellectual Information Systems, Petro Mohyla Black Sea National University.

G. Shvachych, B. Moroz, P. Shcherbyna, I. Olishevskyi, D. Moroz

INTELLIGENT PROCESS CONTROL FORECASTING SYSTEM BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

Abstract. The research is aimed at developing a neural network model for network data processing, which can be used to control technological processes in modern metallurgical production at various stages of metal processing. The proposed system is characterized by high speed, accuracy, reliability and efficiency, which contributes to improving product quality. The system includes a cluster of network sensors that can be reconfigured and connected to a high-performance distributed system. It also provides a mechanism for redundancy of key components and is aimed at increasing the efficiency of the technological process at each stage.

Keywords: distributed computer system, reconfigurable network, neural network, computing nodes, sensor cluster, laser scanners, learning algorithms.

Problem statement. The need for modern systems for controlling process parameters is the basis of the strategic potential for the development of the industry and has important scientific, technological and economic significance. In metallurgical production, a number of problems arise related to the control of process parameters and their control systems. The main ones include:

Inaccuracy of the geometric parameters of rolled products, which is expressed in the deviation of its thickness and width. At the same time, unevenness of the thickness and width of the rolled products can lead to non-compliance of the product with quality standards due to roll wear, temperature fluctuations or other factors.

Problems with flatness, in this case, waviness or curvature of the rolled surface complicates its further processing and reduces the aesthetic characteristics of the product.

Surface defects are associated with various mechanical damage. Scratches, dents and other defects can occur due to contact with equipment or foreign particles during the process.

Metallurgical defects such as cracks, porosity, or inclusions of unwanted elements can occur due to imperfections in the starting material or process disruptions.

Uneven temperature distribution leads to internal stresses. In this case, uneven heating or cooling of the metal can lead to internal stresses that negatively affect the mechanical properties and durability of the product.

Thermal deformations, which are expressed as a difference in temperatures across the cross-section of the rolled product, can cause it to warp or other undesirable deformations.

Equipment wear due to roll deformation. Constant contact with hot metal leads to roll wear, which can affect the quality of the rolled product and require frequent replacement or repair work.

Breakdowns of auxiliary equipment. Malfunctions in the feed, cooling, or other auxiliary mechanisms can lead to downtime and reduced productivity.

Modern methods for solving these problems include the use of distributed systems with clusters of network sensors for data pre-processing. The use of neural networks in combination with infrared sensors and laser scanners opens up new horizons for improving the processes of rolling and rolling of metals, reducing costs and increasing product quality.

Monitoring and control of temperature regimes of rolled products in this case leads to the improvement of technological processes and increasing the efficiency of its functioning. At the same time:

- the use of non-contact infrared sensors allows for accurate monitoring of the metal temperature in real time, ensuring prompt response to deviations in temperature regimes.
- the use of neural networks for the purpose of analyzing data from infrared sensors allows for the prediction of possible deviations in temperature regimes and the suggestion of corrective actions for uniform heating and cooling of rolled products.

High-precision control of geometric parameters can be carried out on the basis of laser scanners and neural networks. Thus, the use of laser scanners allows you to obtain detailed three-dimensional models of rolled products in real time, detecting the slightest deviations from the specified parameters. At the same time, processing data from laser scanners, neural networks can detect patterns and predict possible deviations, which allows you to quickly adjust the process parameters.

Automated detection and classification of metal surface defects is implemented based on the use of convolutional neural networks (CNN). In this case, thanks to the ability to recognize complex visual patterns, CNN networks can effectively detect and classify defects on the surface of rolled products. Images of the metal surface obtained using laser scanners can be analyzed by the CNN network for quick detection of defects.

Forecasting and management of equipment wear can be controlled based on equipment condition sensors. Installing such sensors to track vibrations, temperature and other parameters of equipment operation allows you to obtain data on its condition in real time. By analyzing data from sensors, neural networks can predict the time until a possible failure of equipment components, which allows you to plan maintenance and prevent unexpected breakdowns.

This approach helps solve a number of problems, increasing product quality and overall production efficiency.

Analysis of recent research and publications. Modern cluster network interfaces are a key component of industrial distributed systems. They include high-speed data transmission technologies. Among them are: InfiniBand - provides low latency and high bandwidth, which makes it ideal for high-performance computing; Ethernet (10/25/40/100GbE) - widely used in industrial systems due to its compatibility and flexibility, as well as support for software-defined networks (SDN); Fiber Channel - used for high-performance data storage, providing

fast access to large amounts of information; PCIe over Fabric - allows for the effective combination of computing resources in distributed systems, improving scalability and efficiency of equipment use.

Consider the problem of rolling based on the use of infrared sensors in a cluster. Thus, in the process of rolling metals, especially when using high temperatures and high processing speeds, it is extremely important to constantly monitor technological parameters to ensure accuracy, quality and safety of the process. Infrared sensors are effective for this purpose, as they allow non-contact monitoring of temperature, movement and deformation of the material. The role of infrared sensors in the rolling process is as follows:

- Temperature control. Infrared sensors are used for non-contact measurement of the temperature of the metal passing through the rolls. This is critically important, since temperature determines the plasticity of the material and its ability to deform. The correct temperature regime ensures the efficiency of material processing and prevents its overheating or insufficient heating.

- Roll speed control. Infrared sensors can measure the speed of material movement through the rolls. This is important for adjusting the operating parameters of the rolls and achieving accuracy in processing, especially in cold rolling, where changes in the speed of rotation of the rolls can affect the properties of the finished product.

- Material condition monitoring. Infrared sensors located at several points in the rolling line allow monitoring of the condition of the metal at different stages of processing. This can include measuring material thickness, detecting defects or irregularities on the metal surface.

- Creating clusters of infrared sensors for rolling. To increase efficiency and reliability in the rolling process, several infrared sensors can be combined into a cluster. This allows for uniform monitoring of a large area or several parameters simultaneously.

- Temperature monitoring over the entire processing area. A cluster of sensors can create a network for measuring temperatures at all stages of rolling, from preheating to the final forming stage. This allows for real-time process adjustments, avoiding overheating or underheating of the metal.

- Surface defect analysis. Thanks to several sensors scanning the metal surface, defects, cracks or other problems can be effectively detected at the rolling stages. This allows for timely action to be taken to eliminate them and prevent product defects.

- Redundancy and safety. In the event of a sensor failure, the other sensors in the cluster can compensate for its functions, ensuring system continuity and reliability. This is important for ensuring smooth operation in the rolling process, where even minor failures can lead to significant losses.

The integration of infrared sensors into a cluster in the rolling process allows for high-precision monitoring and control, ensuring control of temperature, speed and material condition at all stages of processing. This allows not only to increase process efficiency, but also to improve product quality and ensure safety. The choice of an appropriate network interface significantly affects the efficiency of industrial distributed systems. At the same time, high-speed networks provide minimal delays in data exchange between cluster nodes,

which is especially important for real-time [1]. High throughput allows for simultaneous processing of large amounts of data without the formation of “bottlenecks”. Flexibility of configuration allows for adapting the system to specific production requirements, including dynamic load distribution. The reduction in energy consumption is explained by the fact that the latest interfaces use less energy-consuming data transmission mechanisms, which reduces the overall cost of system maintenance [1].

The advantages of using neural networks in controlling metallurgical production parameters can be considered as follows:

- Improved accuracy of ANN measurements provide higher accuracy of parameter analysis compared to traditional methods. This is achieved through the use of deep learning algorithms for recognizing complex patterns, automatic error correction through self-learning [4].

Optimization of technological processes ANN allows you to automatically adjust process parameters to increase efficiency. At the same time, the following tasks are solved:

- Optimization of temperature regimes in metallurgy [5].
- Control of material dosing in chemical production [6].
- Control of engine rotation speed in robotics [7].
- Automation of control and reduction of the human factor.

The use of neural network systems reduces the likelihood of human errors: reduced dependence on operators, automatic detection of deviations and quick decision-making [8], prediction of malfunctions. Fault prediction algorithms can prevent accidents and reduce repair costs: predicting equipment wear, determining the risk of engine overheating, analyzing product quality, and predicting defects [9].

It is worth noting the challenges and limitations that arise in this context. One of the key aspects is the high computational complexity, since the effective operation of neural networks requires significant computing resources, in particular, the use of GPUs and TPUs for training models. In addition, such systems are characterized by high energy consumption requirements [10].

Another important factor is the need for large volumes of training data, since the quality of neural networks directly depends on their quantity and reliability. At the same time, there may be difficulties with access to real production data, as well as the risk of retraining on incomplete or incorrect data sets [11].

Special attention should be paid to the requirements for explainability of decisions, which is especially relevant for critical industries such as aviation, medicine, and energy. In these areas, it is important to understand the logic of the ANN decisions made, which necessitates the development of algorithms to explain the results obtained [12].

Unsolved part of the problem. Modern systems do not provide a comprehensive approach to the implementation of the technological process, combining product quality optimization and parameter matching to accelerate data processing. In addition, such systems lack mechanisms for system parameter prediction, which limits their effectiveness.

To date, the impact of the type of network interface and the performance of a distributed system on the overall efficiency of operation has also not been sufficiently studied. Most

existing solutions are either too simplified at the controller level or excessively complex due to the complex architecture of the equipment and the high need for additional computing resources. This significantly complicates the universalization and scaling of such systems, making them unsuitable for widespread implementation.

The purpose. The purpose of the research is to develop a neural network for analyzing data from a cluster of sensors, which will ensure maximum versatility, efficiency and productivity in metal pressure processing systems. In addition, the system must be highly reliable and energy-efficient. The device units must be equipped with mass-production computing equipment.

The research also aims to:

- Development of methods for optimizing the rolling and rolling process by integrating the obtained data into the production control system.
- Automation of detection and classification of metal surface defects to improve product quality.
- Forecasting and prevention of technical equipment malfunctions based on analysis of wear and condition of rolls and auxiliary mechanisms.
- Development of algorithms for adaptive control of rolling parameters to ensure process stability under variable conditions.
- Reduction of production costs and increased energy efficiency through precise temperature control and optimization of rolling parameters.

These goals will allow us to create an intelligent process control system that will ensure high product quality, minimize defects, and increase productivity.

Main research material presentation. Let us define the design features of the neural network construction (fig. 1). The graphical model of the constructed neural network includes:

Input layer:

Input data: 6 values from infrared temperature sensors and 3 values from laser scanners.

Total: 9 input neurons.

Hidden layers:

One or more hidden layers for detecting complex patterns in the data. The number of neurons depends on the complexity of the task. Two hidden layers: the first hidden layer: 64 neurons, the second hidden layer: 32 neurons.

Output layer:

The output layer depends on the purpose of the analysis. If the classification task is considered, then there will be one or more neurons for each class. If the regression task is, then the output can be one neuron for predicting a certain value. For simplicity, let's assume that the task is regression, then one neuron at the output for predicting the value.

Activation functions:

ReLU (Rectified Linear Unit) is usually used for hidden layers, as it works well for tasks where nonlinearities need to be modeled. For the output layer, depending on the task, Linear can be used for regression or Softmax for classification.

Training algorithm:

To train the network, you can use the Backpropagation algorithm with an optimizer, such as Adam or SGD.

Algorithm and data processing. To build a graphical model of a neural network that analyzes data from six infrared sensors and three laser scanners, the following structure was proposed:

Infrared sensors (6 pieces): Used to measure temperature, distance, or object detection. Data from these sensors is represented as a vector of six elements, where each element corresponds to a measurement from a specific sensor.

Laser scanners (3 pieces): Generate high-precision data on the distance to objects in space. Data can be represented as a vector or matrix that describes the spatial geometry taking into account several measurements from each scanner.

The received input data is pre-processed, normalized, and transmitted to the neural network for further analysis, pattern recognition, and prediction of key parameters of the production process.

Let's consider the data processing algorithm in a neural network.

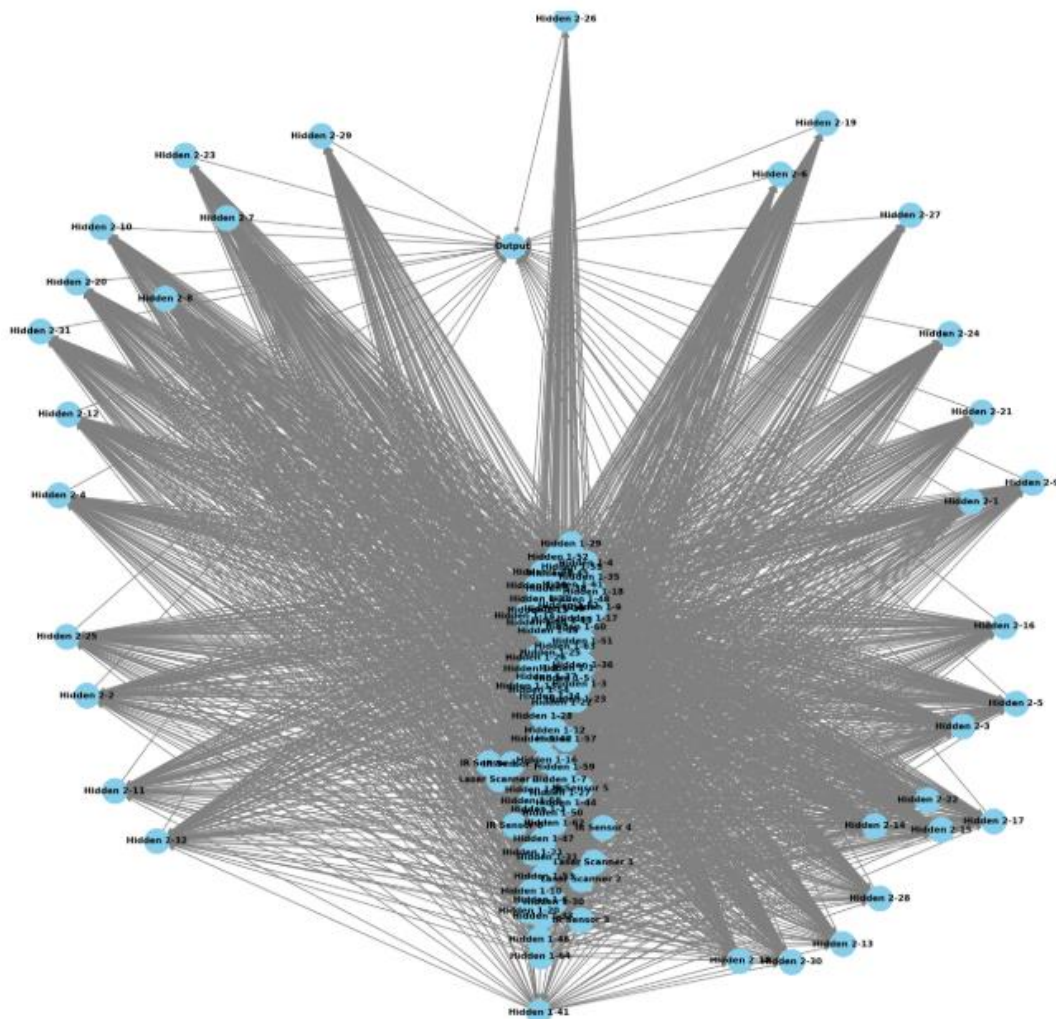


Figure 1 - Structural diagram of a neural network

Neural network architecture. For the combined analysis of data from infrared sensors and laser scanners (fig.2), a multilayer neural network with the following structure is used:

Input layers:

Layer 1: Input data from 6 infrared sensors (vector of 6 values).

Layer 2: Input data from 3 laser scanners. If each scanner transmits several measurement points, the data can be represented as a vector or matrix.

Data processing:

Layers for infrared sensors: Processing can be carried out through several fully connected or convolutional layers, allowing to highlight key features.

Layers for laser scanners: Data is processed using convolutional layers or even recurrent neurons, if it is important to take into account spatio-temporal variability.

Data fusion and further processing:

After separate processing, the data from both groups of sensors is combined through a concatenation layer, which allows taking into account all available characteristics.

Then, it is possible to use several fully connected layers, the number of which depends on the complexity of the task.

The output layer depends on the purpose of the network:

If a classification problem is solved, then a layer with several neurons is used (according to the number of classes).

If a regression problem is investigated, then the output layer contains one neuron for predicting a numerical value.

Functionality of infrared sensors:

Infrared sensors are used to measure temperature and distance, which helps to determine the position of objects, their proximity and temperature state in the production process.

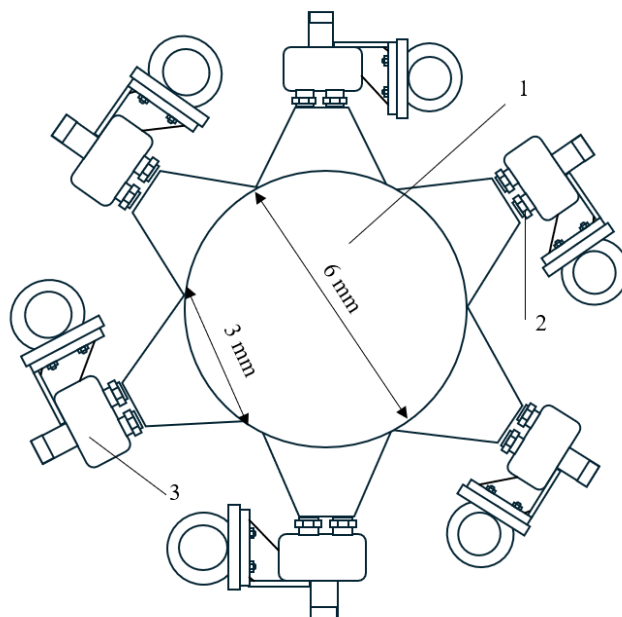


Figure 2 - Layout of infrared sensors: 1 – sample (rod of the required diameter),
2 – measurement zone (segment), 3 – infrared sensor in the cluster

Let us consider the features of using laser scanners. It should be noted that laser scanners provide more accurate and detailed data on spatial geometry. They can also be used to create 3D models of objects or map the environment, which is important for analyzing the shape, location and movement of objects.

The analysis also allowed us to identify the types of neural networks for solving the problems set in this study. These are:

- *Convolutional Neural Network (CNN)*: most suitable for analyzing spatial data, such as images or 3D objects, so it can be used to process information from laser scanners.

- *Fully Connected Neural Network*: best suited for working with tabular data, in particular information obtained from infrared sensors.

Data preparation and effective training of a neural network consists of the following:

- *Cleaning and normalizing data*, since different types of sensors can operate in different ranges of values.

- *Selection of the appropriate loss function*:

For regression tasks – mean square error (MSE).

For classification tasks – cross-entropy.

To implement individual neural networks that analyze data from six infrared sensors and three laser scanners, the Keras library with TensorFlow in the Python programming language environment was used.

Conclusions. The conducted research has shown that the use of neural networks, clusters of infrared sensors and laser scanners opens up significant opportunities for improving product quality, optimizing production processes and reducing costs. The integration of modern technologies not only automates parameter control, but also allows you to predict deviations, ensuring stability and efficiency of production.

The key benefits of implementing the proposed intelligent technology are as follows.

Increasing the accuracy of the geometric parameters of rolled products.

Laser scanners provide continuous measurement of the thickness, width and flatness of rolled products, which helps to minimize deviations from standards. Neural networks analyze the data received and automatically adjust the operating modes of the rolling mill, ensuring stable quality of the final product.

Reducing surface defects.

The use of deep neural networks (CNN) in combination with laser scanners allows you to detect even the smallest defects on the metal surface in real time. This allows you to quickly eliminate problems, reducing the need for reprocessing or product scrapping.

Optimization of temperature regimes.

Infrared sensors provide precise control of metal temperature at all stages of processing, which allows to avoid non-uniform heating or cooling. Neural networks predict temperature fluctuations and automatically adjust heating and rolling regimes, which helps to reduce internal stresses and thermal deformations.

Forecasting and reducing equipment wear.

Intelligent analysis of the condition of rolls and auxiliary equipment allows to predict their wear and prevent emergency situations. This significantly reduces repair costs and extends the service life of the equipment.

Automation of control and increasing energy efficiency.

Intelligent algorithms provide adaptive control of the rolling process, which allows to reduce energy costs and optimize the use of materials. This not only improves the economic performance of production, but also reduces the environmental load.

In addition, the implementation of modern technologies allows: to ensure stable product quality without the need for frequent manual checks, to reduce waste and minimize costs for additional processing, to speed up production processes through real-time parameter control, to reduce equipment failure rates and ensure continuous production.

The implementation of the technologies presented in this study is a key stage in the modernization of production, which contributes to the creation of intelligent metallurgical enterprises.

REFERENCE

1. Seonjin Na, Sunho Lee, Yeonjae Kim, Jongse Park, Jaehyuk Huh Compressed Encryption Counters for Secure GPU Memory. *The 27th IEEE International Symposium on High-Performance Computer Architecture (HPCA-27)*. 2021. №3 URL: https://jaehyuk-huh.github.io/slides/2021_03_HPCA_Common_Counters.pdf
2. Goyal P., Sharma R. Robotics and Neural Networks. Amsterdam, Netherlands, Elsevier, Book, 2019. p. 215–240.
3. McAfee A., Brynjolfsson E. Machine Platform Crowd, New York, USA, Norton & Co. 2017. p. 55–89.
4. Jain, A., Aggarwal, A. Transactions on Industrial Electronics. New York, USA, *Journal IEEE*, 2021. p. 67–102.
5. Smith J., Brown R. Machine Learning for Chemical Process Optimization. Hoboken, USA, Wiley. Book, 2020. p. 190–220.
6. Goyal P., Sharma R. Robotics and Neural Networks. Amsterdam, Netherlands, Elsevier, Book, 2019. p. 301–325.
7. McAfee A., Brynjolfsson E. Machine Platform Crowd. New York, USA Norton & Co, Book, 2017. p. 140–175.
8. Jain A., Aggarwal A. Transactions on Industrial Electronics. New York, USA, *Journal IEEE*, 2021. p. 45–78.
9. NVIDIA. *GPU Computing in Industry 4.0*, Santa Clara, USA, NVIDIA, *Technical Report*. 2022. p. 88–130. URL: <https://blogs.nvidia.com/blog/2022-predictions-ai-global-industries/>
10. Domingos P. The Master Algorithm. New York, USA, Basic Books, Book, 2015. p. 35–90.
11. Doshi-Velez F., Kim B. (). *Preprint (arXiv). Towards a Rigorous Science of Interpretable Machine Learning*. Ithaca, USA, arXiv, 2017. p. 12–47. DOI: 10.48550/arXiv.1702.08608
12. Ren J., Wang Z. "AI-Based Quality Control in Automotive Manufacturing". Berlin, Germany, Springer, Book, 2021. p. 175–210.

13. Patel D., Kumar R. AI in Chemical Engineering. Amsterdam, Netherlands, Elsevier, Book. 2020, p. 99–134.

Received 01.04.2025.
Accepted 03.04.2025.

***Інтелектуальна система прогнозування управління технологічним процесом
на основі штучної нейронної мережі***

Дослідження спрямовані на розробку моделі нейронної мережі для обробки мережевих даних, яка може бути використана для управління технологічними процесами в сучасному металургійному виробництві на різних етапах обробки металу. Запропонована система відзначається високою швидкістю, точністю, надійністю та ефективністю, що сприяє покращенню якості продукції. Система включає кластер мережевих датчиків, які можна реконфігурувати та підключити до високопродуктивної розподіленої системи. Вона також забезпечує механізм резервування ключових компонентів і спрямована на підвищення ефективності технологічного процесу на кожному його етапі.

Швачич Геннадій Григорович – доктор технічних наук, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна.

Мороз Борис Іванович – доктор технічних наук, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна.

Щербина Павло Олександрович – асистент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна.

Олішевський Ілля Геннадійович – доктор PhD, доцент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна.

Мороз Дмитро Максимович – доктор PhD, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

Gennady Shvachych – Doctor of science, Professor, Department of Computer Systems Software, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

Borys Moroz – Doctor of science, Professor, Department of Computer Systems Software, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

Pavlo Shcherbyna – Assistant, Department of Computer Systems Software, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

Ilya Olishkevskyi – Doctor PhD, associate professor, Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

Dmytro Moroz – Doctor PhD, associate professor, Department of Computer Systems Software, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

CLASSIFICATION OF EYE STATE BASED ON EEG DATA USING RECURRENCE ANALYSIS

Abstract. The relevance of this study is driven by the growing interest in portable EEG devices and the need to develop efficient algorithms for analyzing brain activity with limited technical resources. This paper addresses the problem of classifying brain states based on electroencephalography (EEG) data to distinguish between two specific states: relaxation and concentration. The classification of open and closed eyes is examined, as eye closure is associated with increased relaxation. A classification method based on the quantitative analysis of recurrence plots, which is one of the approaches of chaos theory, is proposed and compared with traditional brain rhythm analysis. Experimental results showed that the recurrence analysis method outperforms spectral analysis in classification accuracy, particularly for the O1 point, where accuracy increased from 86% to 95%. The optimal parameters for phase space reconstruction were determined: delay 25 ms and dimension of the embedding space 4, which are consistent with the spectral characteristics of the signal. Feature importance analysis revealed that the most significant parameters for classification are entropy, the length of white vertical and diagonal lines in recurrence plots, as well as determinism and laminarity. The obtained results may be useful for developing EEG analysis algorithms in portable devices and applications in the fields of brain-computer interfaces and cognitive training.

Keywords: EEG classification, open and closed eyes, recurrence analysis, recurrence plots, chaos theory, brain rhythms, phase space, spectral analysis, SVM, determinism.

Statement of the problem. This paper addresses the problem of classifying brain states based on EEG, specifically distinguishing between relaxation and concentration. The classification of open and closed eyes is examined, as eye closure is typically associated with increased relaxation. Therefore, analyzing this phenomenon may contribute to a better understanding of relaxation mechanisms.

Recently, an increasing number of portable EEG devices, such as MyndPlay and Muse [1], have emerged. These devices are relatively low-cost, making them accessible to a wide range of users. This creates a demand for data processing algorithms capable of operating with fewer electrodes and lower-quality signals compared to full-scale medical equipment.

Processed brain state data can be useful for self-monitoring, allowing users to analyze how their habits affect brain activity. This may contribute to increased productivity or improved rest quality. Additionally, such technologies can help individuals train their ability to

consciously adjust their state according to situational needs, for example, enhancing concentration during work or facilitating relaxation during rest.

A promising direction is also the use of such technologies for controlling devices “by the power of thought,” which can be especially useful for people with paralysis.

This article explores the classification of brain states using chaos theory methods, particularly through the analysis of recurrence plots. Additionally, this approach is compared with classification based on brain rhythm analysis, a classical method of EEG signal processing.

Analysis of the latest research and publications. Currently, there are several main approaches to EEG signal processing. The first approach is based on brain rhythm analysis using spectral analysis, which was examined in a previous study [2]. That study focused on signal classification based on the alpha rhythm. The essence of this approach is to calculate the amplitudes of each signal frequency, after which the power of the corresponding frequency bands is determined. These bands are known as rhythms: delta rhythms (0.5–4 Hz), theta rhythms (4–8 Hz), alpha rhythms (8–12 Hz), beta rhythms (12–30 Hz), and gamma rhythms (>30 Hz). As demonstrated in the cited work, the alpha rhythm contains the most information regarding the state of open or closed eyes.

An alternative approach is based on the application of chaos theory. Since brain signals are quasi-periodic, this method also demonstrates effective results. The study by Farzad [3] reviews 55 studies on the application of chaos theory to EEG analysis. The author states: *“The evidence from 55 articles suggests that cognitive function is more frequently assessed than other brain functions in studies using chaos theory. The most frequently used techniques for analyzing chaos include the correlation dimension and fractal analysis. Approximate, Kolmogorov and sample entropy account for the largest proportion of entropy algorithms in the reviewed studies.”* This work emphasizes that the choice of delay and dimension of the embedding space are critical parameters that significantly affect the analysis results.

A notable study by Kusuma Mohanchandra [4] examines theoretical approaches of chaos theory to EEG data analysis for brain-computer interfaces (BCI). The study states that correlation dimension is widely used as a quantitative parameter for describing attractors and has proven effective in characterizing brain dynamics at different sleep stages. Moreover, this parameter is applied to differentiate between normal subjects and patients with pathologies such as epilepsy, Alzheimer’s disease, dementia, and Parkinson’s disease.

Another important study [5] focuses on the use of various approaches to three-dimensional phase space reconstruction for five different brain activity states. EEG signals corresponding to these states in seven subjects were analyzed using methods such as determinism, phase graph, power spectrum, approximate entropy, correlation dimension, and Lyapunov exponents. Although each method has its advantages and limitations, the results confirm the nonlinear dynamic nature of brain activity. In particular, determinism analysis showed that the EEG signal occupies an intermediate position between a random and a deterministic process, indicating a possible chaotic nature of brain activity.

The study by Furman [6] proposes a combined approach of short-time Fourier Transform and recurrence quantitative analysis to improve classification accuracy (STFT-RQA)

and compares it with classification based on time-delay embedding and recurrence quantitative parameters (TD-EMB-RQA). The STFT-RQA method demonstrated high efficiency, achieving an overall accuracy of 88.2%. Parameter optimization increased accuracy to 95.9% when using 194 selected features. At the same time, TD-EMB-RQA classification proved less effective than STFT, as the analysis of RQA features did not reveal significant discriminative ability, yielding an average accuracy of 80%. However, the removal of redundant components in the cross-validation scheme improved accuracy to 89.2% for 80 selected parameters.

Studies conducted in this and previous works have highlighted the importance of the 10 Hz frequency for the closed-eye state, which can be considered a fundamental frequency of brain activity. This phenomenon was examined in detail by Garcia-Rill [7], where it is explained that 10 Hz represents the brain's natural "idling" frequency in a resting state. A decrease in this frequency may lead to impaired sensorimotor function, as perception at frequencies below 10 Hz becomes less effective. Conversely, an increase in the alpha rhythm frequency to the beta or gamma range occurs when the reticular activating system (RAS) is activated in response to sensorimotor stimulation. Indirect evidence from fMRI studies of cerebral blood flow supports this concept, as alpha rhythms (particularly the occipital and mu rhythms) correlate with reduced cerebral blood flow, indicating lower brain activity.

Objective. The aim of this article is to develop an algorithm that classifies the given dataset and evaluates its accuracy in comparison with the results obtained through spectral analysis. Special attention is given to a qualitative analysis of the obtained data, which will help identify the most influential parameters of recurrence analysis in the classification process.

Additionally, the study explores the nature of the relaxed state, particularly by analyzing the key characteristics of signals. Identifying the most significant parameters and their impact on the analysis results will provide a deeper understanding of the underlying mechanisms of the system's state and contribute to improving classification approaches for similar data in the future.

Presentation of the main material of the research. The *EEG Motor Movement/Imagery Dataset* [8] was used for analysis. It contains over 1,500 EEG recordings lasting from one to two minutes, collected from 109 participants. During the experiment, participants performed various motor and imagery tasks while 64-channel EEG signals were recorded using the *BCI2000* system [9].

Each participant underwent 14 experimental sessions, including two baseline trials (one-minute each) - one with open eyes and the other with closed eyes. Additionally, three two-minute trials were conducted for each of the four tasks. Participants were instructed to open and close their fists in response to a target appearing on the left or right side of the screen or to imagine performing this movement. Furthermore, additional tasks required them to open and close both fists or both feet, depending on the target position.

The recordings are presented in the *EDF+* format, containing 64 EEG signals recorded at a frequency of 160 Hz, along with an annotation channel. The annotations include codes indicating different states: *T0* for rest, *T1* for the initiation of movement (real or imagined) of the left fist or both fists, and *T2* for the movement of the right fist or both legs. The recordings

were obtained using electrodes based on the international 10-10 system, which excludes certain specific electrodes. The *EDF+* format is adapted for use with the *PhysioToolkit* software [10].

Each participant has a unique identifier ranging from *S001* to *S109*, along with 14 files labeled *R01–R14*, containing the corresponding EEG recordings. Thus, each recording file is represented in the format *SsssRrr.edf*, where *s* denotes the participant number and *r* represents the experiment stage. In this study, recordings from the following stages were used:

- 1 – resting state, eyes open;
- 2 – resting state, eyes closed.

Signal Normalization. Preprocessing of the signal is critical for recurrence analysis. In particular, noise removal is an important step, as demonstrated in previous studies. In this experiment, the following types of noise were eliminated: low-frequency noise (<2 Hz), which may reflect head movements and blinking; 50/60 Hz noise caused by interference from the AC power grid; and high-frequency noise from muscle activity (>50 Hz). To achieve this, the Short-Time Fourier Transform (STFT) was applied using a Hann window with a segment size of 1 second [2].

The next important step is signal normalization, which allows data obtained from different electrodes, participants, and time points to be brought into a unified numerical range. In Rolink's study [11], Z-score normalization was applied for electrocardiogram processing, as well as normalization of 30-second segments based on standard deviation.

In this study, Z-score normalization with 1-second segments was used for EEG signal processing. To ensure the continuity of the normalized signal, the segments were merged using a Hann window.

The Hann function [12] is defined as:

$$w[n] = 0.5 \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \right] = \sin^2\left(\frac{\pi n}{N}\right), \quad 0 \leq n \leq N.$$

A key feature of this window is that the sum of the function and its copy, shifted by half the window size $\frac{N}{2}$, equals one:

$$\begin{aligned} w[n] + w[n + N/2] &= \sin^2\left(\frac{\pi n}{N}\right) + \sin^2\left(\frac{\pi\left(n + \frac{N}{2}\right)}{N}\right) = \\ &= \sin^2\left(\frac{\pi n}{N}\right) + \cos^2\left(\frac{\pi n}{N}\right) = 1. \end{aligned}$$

Thus, if the signal segments overlap by half, following the scheme

$$[0, 2H], [H, 3H], [2H, 4H], [3H, 5H], \dots, \quad H = \frac{N}{2},$$

then their recombination results in a restored signal without distortions. This processing technique is known as windowing.

Since the signal recording has finite boundaries, their handling must be considered. The simplest approach is to pad the signal with zero values at the beginning and end, and then remove these values after recombination.

The formula for Z-score normalization [11] is given by:

$$z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma}, \quad i = 0, \dots, N,$$

where x_i is the value of a discrete data array, N is the size of the array, z_i is the normalized value, μ is the mean of the array, and σ is the standard deviation.

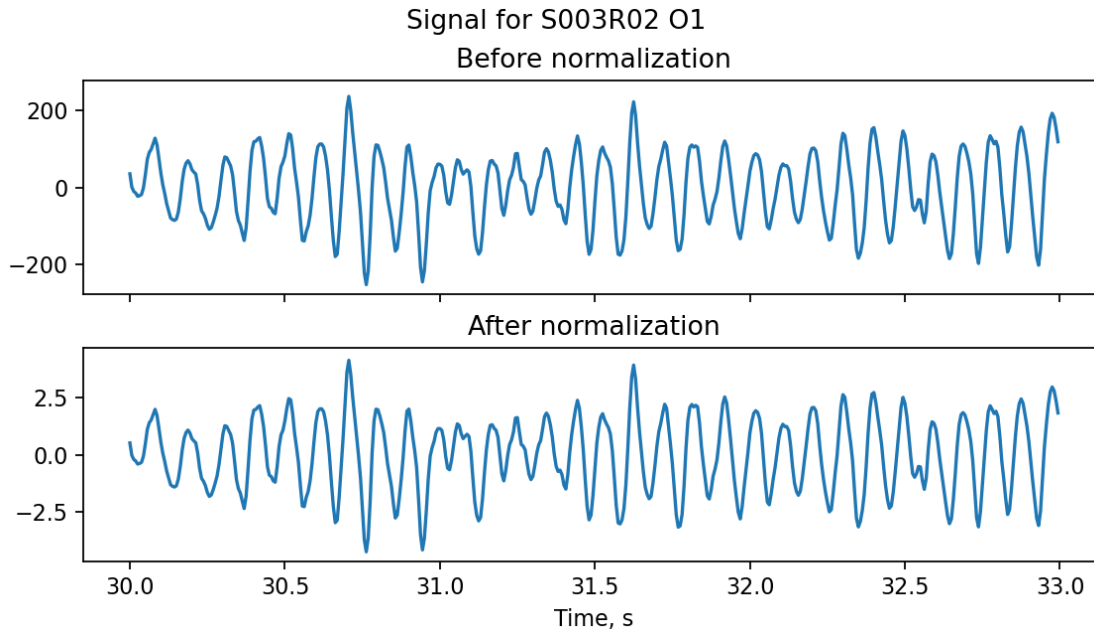


Figure 1 - Signal normalization

Figure 1 shows the normalized signal for the O1 electrode with eyes closed. It can be seen that the signal values after normalization fall within the range $[-3, 3]$. In some cases, such as during blinking, the values may reach up to 5, but the overall distribution remains approximately within the range $[-2.5, 2.5]$.

Recurrence Analysis. Recurrence analysis is used to study dynamical systems that may exhibit complex and nonlinear behavior. To analyze time series data such as EEG signals, a phase space is constructed. Let u_i be the time series of the EEG signal. To represent it in the phase space, the method of time delay embedding is used. The embedding vector is defined [13] as:

$$\mathbf{x}_i = (u_i, u_{i+\tau}, \dots, u_{i+(m-1)\tau})$$

where τ is the time delay, m is the number of dimensions (embedding), u_i is the input signal, and $\mathbf{x}_i$ is the resulting point in the m -dimensional phase space. This approach allows for the construction of a multidimensional representation of the original signal.

Next, to analyze recurrence, the recurrence matrix $R_{i,j}$, $i, j = 1, \dots, m$ is introduced, which determines whether the system returns to one of its previous states:

$$R_{i,j} = \theta(\varepsilon - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|)$$

where $\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|$ is the distance between two points $\mathbf{x}_i$ and $\mathbf{x}_j$ in the phase space, ε is the threshold that determines when two points are considered recurrent, and θ is the Heaviside function, which takes the value 1 if the condition is satisfied, and 0 otherwise.

A recurrence plot is a visualization of the matrix $R_{i,j}$, $i, j = 1, \dots, m$, where recurrent events are shown as black dots. Patterns in this plot help identify features of the signal's dynamics, such as differences between the eyes-open and eyes-closed states.

Additionally, numerical quantitative measures can be computed from the recurrence matrix [14], such as:

- L_{min} (Minimum diagonal line length): the minimum length of a diagonal line in the recurrence plot considered for the calculation of determinism.
- V_{min} (Minimum vertical line length): the minimum length of a vertical line considered for laminarity.
- W_{min} (Minimum white vertical line length): the minimum length of a white vertical line used to calculate trapping time.
- RR (Recurrence rate): a measure of recurrence that indicates the percentage of recurrent points in the matrix:

$$RR = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}.$$

- DET (Determinism): the proportion of points forming diagonal lines:

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{min}}^N l P(l)}{\sum_{l=1}^N l P(l)}.$$

- L (Average diagonal line length): the average length of diagonal lines:

$$L = \frac{\sum_{l=l_{min}}^N l P(l)}{\sum_{l=l_{min}}^N P(l)}.$$

- L_{max} (Longest diagonal line length): the length of the longest diagonal line in the plot.
- DIV (Divergence): the reciprocal of the longest diagonal line length:

$$DIV = \frac{1}{L_{max}}.$$

- L_{entr} (Entropy of diagonal lines): the entropy of diagonal line lengths, which reflects their diversity:

$$L_{entr} = - \sum_{l=l_{min}}^N P(l) \log P(l).$$

- LAM (Laminarity): the proportion of points forming vertical lines:

$$LAM = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N v P(v)}{\sum_{v=1}^N v P(v)}.$$

- TT (Trapping time): the average length of vertical lines:

$$TT = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N v P(v)}{\sum_{v=v_{\min}}^N P(v)}.$$

- V_{max} (Longest vertical line length): the length of the longest vertical line in the plot.
- V_{entr} (Entropy of vertical lines): the entropy of vertical line lengths.
- W (Average white vertical line length): the average length of white vertical lines (gaps between recurrent events).
- W_{max} (Longest white vertical line length): the length of the longest white vertical line.
- W_{div} (Longest white vertical line divergence): the reciprocal of the longest white vertical line.
- W_{entr} (Entropy of white vertical lines): the entropy of white vertical lines.
- $\frac{DET}{RR}$ (Ratio of determinism to recurrence rate): the ratio of determinism to recurrence rate.
- $\frac{LAM}{DET}$ (Ratio of laminarity to determinism): the ratio of laminarity to determinism, indicating the proportion of trapped states in the system.

Here:

- N is the number of points in the analyzed time series, or the number of points in the phase space forming the recurrence matrix.
- l is the length of a diagonal line in the recurrence plot. It corresponds to the number of consecutive recurrent points forming a diagonal.
- v is the length of a vertical line in the recurrence plot. It corresponds to the number of consecutive recurrent points forming a vertical line.
- $P(l)$ is the number of diagonal lines of length l in the recurrence plot.
- $P(v)$ is the number of vertical lines of length v in the recurrence plot.

Determining the parameters τ and m is a crucial step in the reconstruction of the phase space. There are several approaches for selecting the optimal value of the delay τ , with two main methods being: the mutual information (MI) method and the autocorrelation method [15].

The MI method is used to analyze the interdependence between the values of the time series and its time-shifted version. However, in the case of quasi-periodic series with harmonics of decreasing amplitude, this approach may yield incorrect results, as the choice of τ may be based on insignificant high-frequency components.

The autocorrelation method is a more traditional way of determining τ and is based on calculating the correlation coefficient between the original signal $x(t)$ and its delayed copy by τ . This approach was introduced in the book [16]. The value of τ is typically chosen at the

point where the autocorrelation coefficient ρ drops to the level of $1/e^{24}$. The most common types of autocorrelation used are Pearson correlation and Spearman correlation.

There are various methods for determining the dimension of the embedding space, with the most common being the box-counting method, the correlation dimension method, and the false nearest neighbors (FNN) method.

The false nearest neighbors (FNN) method is one of the most widely used approaches for geometrically determining the minimal dimension of the embedding space n when reconstructing the state space [15]. It is based on the idea that, in an insufficiently dimensional embedding space, neighboring points may appear close to each other due to the projection of a higher-dimensional space onto a lower-dimensional one. The method allows determining the optimal n at which the relative number of false neighbors becomes minimal.

To apply this method, the time series is repeatedly embedded into a sequence of m -dimensional Euclidean spaces over a range of increasing values of m . The core idea is that once the minimum dimension of the embedding space m is reached (i.e., $m \geq n$), the distance between neighboring points does not change significantly with further increases in m . In other words, the Euclidean distance $d_m(i, j)$ between a point $P_i \in \mathbb{R}^m$ and its nearest neighbor $P_j \in \mathbb{R}^m$ changes minimally when the dimension of the embedding space increases to $m + 1$.

If the dimension of the embedding space m is too small, then the points are considered false neighbors if their pairwise distance increases significantly when m is incremented. This change in distance between nearest neighbors embedded in $\mathbb{R}^m$ and $\mathbb{R}^{m+1}$ is quantitatively assessed using the false nearest neighbors ratio:

$$R_i = \sqrt{\frac{d_{m+1}^2(i, j) - d_m^2(i, j)}{d_m^2(i, j)}}.$$

Next, R_i is compared to a tolerance threshold R_{tol} to distinguish false neighbors, considering them false when $R_i > R_{tol}$. In this study, we choose $R_{tol} = 15$. By applying this threshold to all points, we can compute the percentage of false nearest neighbors, FNN P_{FNN} .

If the system is noise-free, P_{FNN} should reach zero once a sufficient dimension of the embedding space is achieved. However, in the presence of additional noise, P_{FNN} may never reach zero. Therefore, it is common practice to use a cutoff percentage for FNN to determine a sufficient dimension of the embedding space n . We use the commonly adopted threshold $P_{FNN} < 10\%$, which is suitable for most applications involving moderate noise.

Both methods are implemented in the Teaspoon mathematical package for the Python programming language for signal processing [17], which was chosen for use in the experiments.

During the experiments, it was found that determining the parameters τ and m without windowed normalization led to ambiguous results. However, after normalization, it became possible to clearly identify the values of these parameters. When analyzing EEG signals in the eyes-closed state across different participants, it was determined that the dimension of the embedding space is $m = 4$ and the time delay is $\tau = 4$, which corresponds to 25 ms ($\tau = 4/160$), based on a sampling rate of 160 Hz. Figure 2 shows the computed values of τ and m for all recordings.

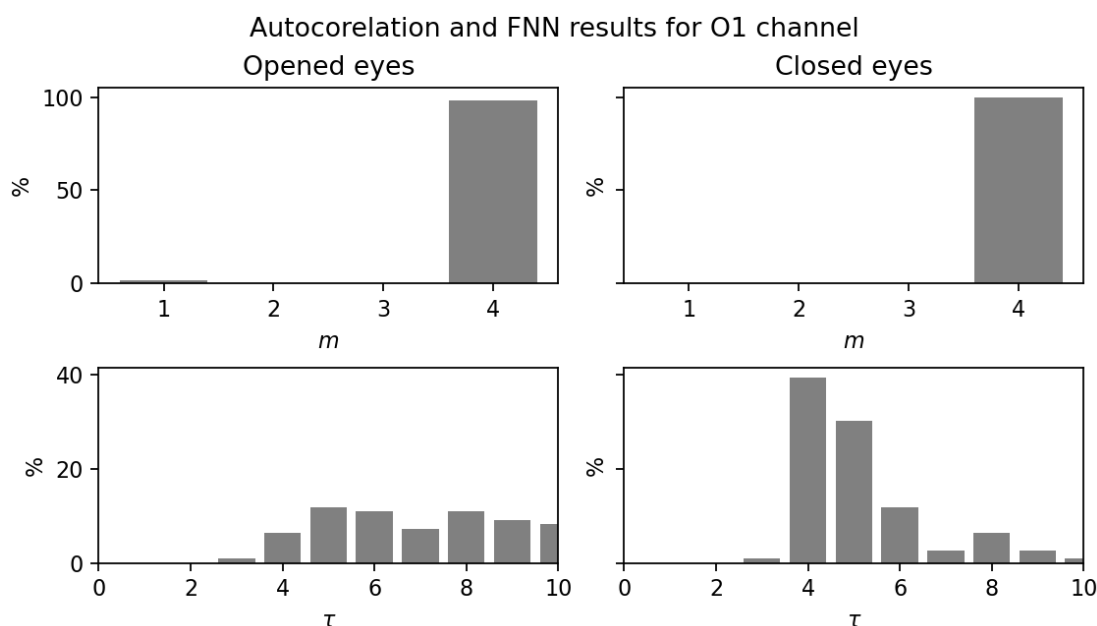


Figure 2 - Calculated τ and m for dataset recording

These results are consistent with spectral analysis, where a peak in power at 10 Hz is observed in the eyes-closed condition. This indicates that the system returns to approximately the same state every 100 ms. Thus, in the eyes-closed state, brain dynamics can be represented as periodic motion in a 4-dimensional space with a time delay of 25 ms, forming a complete cycle over 100 ms. This confirms that the chosen parameters align with the physiological characteristics of brain activity.

Recurrence Plots. To construct recurrence plots, the PyRQA module [18] was used, which provides optimized computational efficiency. PyRQA is based on OpenCL technology, allowing the use of a GPU to accelerate mathematical operations through parallel execution. This significantly reduces computation time compared to traditional approaches.

According to the study [19], using OpenCL speeds up the construction of recurrence plots by more than 5 times compared to OpenMP, which utilizes all CPU cores. When compared to single-core execution, the speedup can reach up to 28 times. This makes PyRQA an

efficient tool for analyzing large EEG datasets, which is crucial for studying the complex dynamics of brain signals.

Analysis of recurrence plots for eyes-open and eyes-closed states revealed significant differences in the behavior of the brain's dynamical system. The eyes-open state is characterized by a chaotic structure or a focus on a single state, indicating more complex and variable activity. In contrast, the eyes-closed state shows long diagonal lines, which indicate periodicity in the process. Frequency spectrum analysis confirmed that this periodicity corresponds to 10 Hz, which aligns with the concept of the 10 Hz rhythm as the brain's "idling" state. An example of this phenomenon is presented in Figure 3.

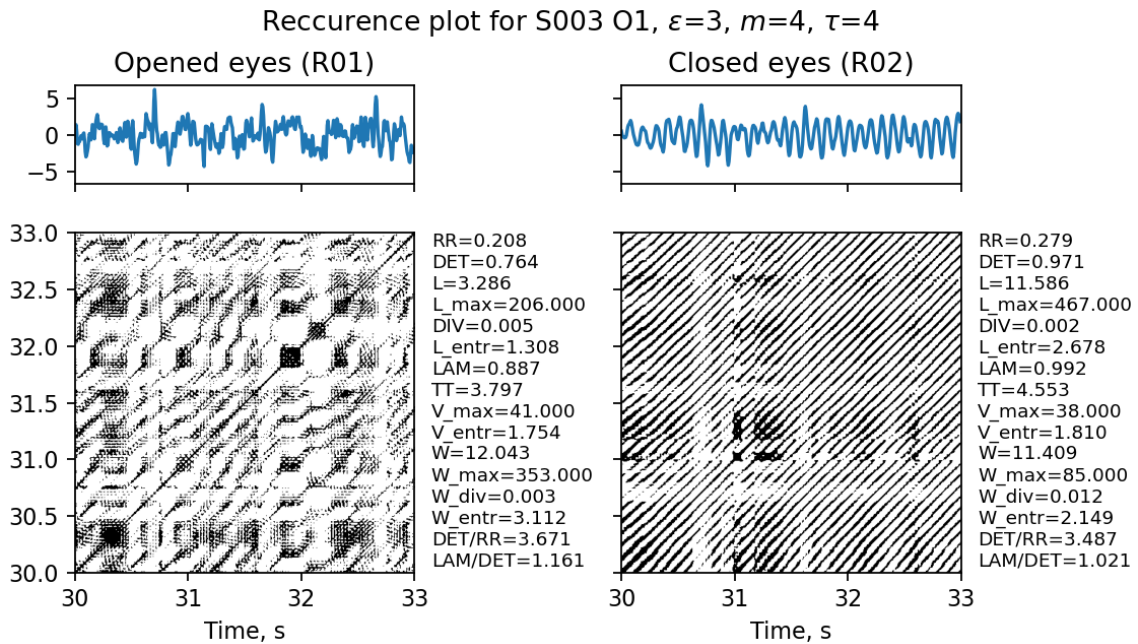


Figure 3 - Recurrence plot

Recurrence Quantitative Analysis. To analyze the obtained recurrence plots, quantitative measures were computed using the PyRQA module. Calculations were performed for all 109 recordings in the dataset, separately for the eyes-open and eyes-closed states, as well as for the Af7, Af8, O1, and O2 electrode locations. The data were segmented into 2-second intervals to compute time-dependent metrics.

To identify the parameter that best separates the eyes-open and eyes-closed classes, a metric R was introduced. Classification accuracy was evaluated separately for the eyes-open (A_o) and eyes-closed (A_c) cases. The overall classification accuracy was defined as $A = \min(A_o, A_c)$ to ensure balance between the classes.

The mean absolute difference between R_{avg} and R was calculated for each participant using the formula:

$$D_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{s=0}^n |R_{avg} - R|.$$

This value reflects how much the obtained R values for each participant deviate from the average value R_{avg} .

Analysis of Table 1 shows that the most informative features for classifying the eye state (open or closed) are determinism (DET), entropy of vertical lines (V_{entr}), average length of white vertical lines (W), and longest white vertical line divergence (W_{div}).

These recurrence analysis parameters make it possible to distinguish the structure of time series in eyes-open and eyes-closed states. In particular, high DET values indicate greater regularity and predictability in signal dynamics, which is characteristic of the eyes-closed state. Similarly, the entropy of vertical lines (V_{entr}) reflects the variability of transitions between states, which tends to be more chaotic with eyes open.

Thus, the obtained results confirm that recurrence analysis can be an effective approach for automatic classification of eye state based on EEG signals.

Table 1
results of a simple classification of open and closed eyes

Parameter	Point	A	A_o	A_c	R_{avg}	D_{avg}
DET	Af7	60.91%	60.91%	72.73%	0.26	0.04
DET	Af8	61.82%	61.82%	70.00%	0.25	0.04
DET	O1	58.18%	58.18%	58.18%	0.23	0.01
DET	O2	55.45%	55.45%	62.73%	0.23	0.01
V_{entr}	Af7	66.36%	66.36%	70.91%	54.77	15.29
V_{entr}	Af8	60.00%	60.00%	73.64%	54.11	14.85
V_{entr}	O1	58.18%	58.18%	68.18%	45.81	5.28
W	O1	55.45%	55.45%	55.45%	1.95	0.04
W	O2	55.45%	55.45%	55.45%	1.95	0.05
W_{div}	Af7	69.09%	77.27%	69.09%	407.38	48.20
W_{div}	Af8	70.00%	80.00%	70.00%	399.70	53.55

Classification Using Support Vector Machine. The Support Vector Machine (SVM) method with C-support vector classification [20] was applied to improve the accuracy of eye state classification. The RBF (Radial Basis Function) kernel was used, enabling effective handling of nonlinearly separable classes. The model was configured with parameters $C = 100$ and $\gamma = 1$, which control the classifier's flexibility and the scale of influence of individual data points.

The implementation was carried out using the scikit-learn library [21], which utilizes LIBSVM. This ensures efficient optimization of the separating hyperplane and improves classification accuracy compared to the threshold-based method using recurrence features.

Eye state classification (open or closed) was initially performed based on brain rhythms divided into frequency bands: delta (0–4 Hz), theta (4–8 Hz), low alpha (8–10 Hz), high alpha

(10–12 Hz), low beta (12–16 Hz), mid beta (16–20 Hz), high beta (20–30 Hz), low gamma (30–40 Hz), and mid gamma (40–50 Hz).

For classifier training, the first half of each participant's recording was used, and the second half was used for testing. The resulting classification accuracies for different electrodes were: Af7 – 89.38%, Af8 – 87.40%, O1 – 86.80%, O2 – 86.51%.

Next, recurrence quantitative measures were used for classification, which significantly improved the results. Accuracy increased to: Af7 – 94.41%, Af8 – 93.85%, O1 – 95.38%, O2 – 95.77%. This indicates that recurrence features are more informative for classifying eye states compared to brain rhythm frequency analysis.

Thus, classification based on recurrence measures demonstrated higher accuracy, especially in the occipital region of the brain (O1, O2), where primary visual processing takes place. This confirms that recurrence analysis methods more effectively capture patterns associated with changes in eye state than frequency-based approaches.

Thus, classification based on recurrence measures demonstrated higher accuracy, particularly in the occipital region of the brain (O1, O2), where primary visual processing occurs. This confirms that recurrence analysis methods are more effective at detecting patterns associated with changes in eye state than brain rhythm frequency analysis.

Analysis of the influence of individual parameters using the SHAP module (Figure 4) showed that the most significant features for classification are the inverse of the longest white vertical line (W_{div}), the entropy of white vertical lines (W_{entr}), the average diagonal line length (L), the longest white vertical line (W_{max}), the longest vertical line in the plot (V_{max}), and laminarity (LAM). This indicates that the structure of white vertical and diagonal lines in recurrence plots plays a key role in recognizing the eye state.

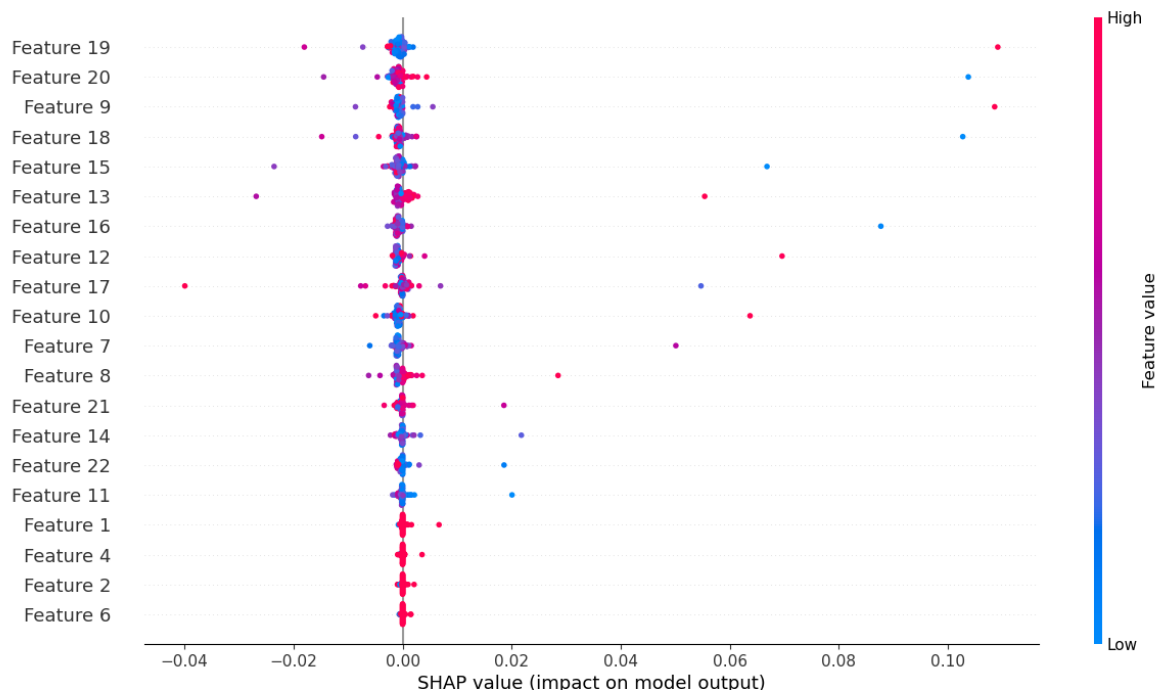


Figure 4 - Determining the most influential classifier parameters

Conclusions. Thus, the use of quantitative recurrence measures for eye state classification proved to be more effective than traditional brain rhythm analysis. For the O1 electrode, classification accuracy based on recurrence features reached 95%, compared to 86% when using brain rhythms. This confirms that methods from chaos theory may be more effective for analyzing quasi-periodic brain signals.

The optimal minimum segmentation length for the signal is one second. Smaller segments result in the loss of useful information. At the same time, the complete absence of segmentation makes the signal more susceptible to low-frequency noise, which distorts its dynamics, increases the system's dimensionality, and significantly degrades the quality of the recurrence plots.

The delay τ used for phase space reconstruction is 25 ms, and the dimension of the embedding space m is 4. This is consistent with the results of spectral analysis, where a peak at approximately 10 Hz is observed in the eyes-closed condition. Since the period of oscillations at this frequency is 100 ms, the chosen delay $\tau = 25$ ms corresponds to one-quarter of the cycle, which is optimal for accurate phase space reconstruction. Therefore, the selected values of τ and m are well-justified. In future work, we will attempt to construct a system of differential equations that describes the chaotic behavior of signals in the human cerebral cortex. Studying the attractors of such a system using the methods proposed in [22] may provide additional insights into brain states associated with relaxation and concentration.

When constructing a simple classifier using optimal threshold search, it was found that the most influential parameters are determinism (DET), entropy of vertical lines (V_{entr}), average length of white vertical lines (W), and longest white vertical line divergence (W_{div}). Analysis of influential parameters in the SVM classifier revealed that the key features for class separation are the inverse of the longest white vertical line (W_{div}), entropy of white vertical lines (W_{entr}), average diagonal line length (L), longest white vertical line (W_{max}), longest vertical line in the plot (V_{max}), and laminarity (LAM). This highlights the importance of various aspects of the structural organization of recurrence plots for accurate differentiation of eye states.

LITERATURE / REFERENCES

1. *Muse™ EEG-Powered Meditation & Sleep Headband*. (n.d.). Retrieved April 1, 2025, from <https://choosemuse.com/>
2. Ye. S. Panasenko, & V. Ye. Belozyorov. (2024). THE APPLICATION OF SPECTRAL ANALYSIS OF EEG DATA FOR THE IDENTIFICATION OF OPEN AND CLOSED EYE STATES. *System Technologies*, 6(155, 155), 101–115. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-6-155-2024-11>
3. Kargarnovin, S., Hernandez, C., Farahani, F. V., & Karwowski, W. (2023). Evidence of Chaos in Electroencephalogram Signatures of Human Performance: A Systematic Review. *Brain Sciences*, 13(5), 813. <https://doi.org/10.3390/brainsci13050813>

4. Mohanchandra, K., Saha, S., & Murthy, K. S. (2016). Evidence of Chaos in EEG Signals: An Application to BCI. In A. T. Azar & S. Vaidyanathan (Eds.), *Advances in Chaos Theory and Intelligent Control* (pp. 609–625). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30340-6_25
5. Wang, X., Meng, J., Tan, G., & Zou, L. (2010). Research on the relation of EEG signal chaos characteristics with high-level intelligence activity of human brain. *Nonlinear Biomedical Physics*, 4(1), 2. <https://doi.org/10.1186/1753-4631-4-2>
6. Furman, Ł., Duch, W., Minati, L., & Tołpa, K. (2023). Short-time Fourier transform and embedding method for recurrence quantification analysis of EEG time series. *The European Physical Journal Special Topics*, 232(1), 135–149. <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-022-00683-7>
7. Garcia-Rill, E., D’Onofrio, S., Luster, B., Mahaffey, S., Urbano, F. J., & Phillips, C. (2016). The 10 Hz Frequency: A Fulcrum For Transitional Brain States. *Translational Brain Rhythmicity*, 1(1), 7–13. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4990355/>
8. *EEG Motor Movement/Imagery Dataset*. (n.d.). Retrieved February 21, 2024, from <https://archive.physionet.org/pn4/eegmmidb/>
9. Schalk, G., McFarland, D. J., Hinterberger, T., Birbaumer, N., & Wolpaw, J. R. (2004). BCI2000: A general-purpose brain-computer interface (BCI) system. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 51(6), 1034–1043. <https://doi.org/10.1109/TBME.2004.827072>
10. Goldberger, A. L., Amaral, L. A., Glass, L., Hausdorff, J. M., Ivanov, P. C., Mark, R. G., Mietus, J. E., Moody, G. B., Peng, C. K., & Stanley, H. E. (2000). PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a new research resource for complex physiologic signals. *Circulation*, 101(23), E215–220. <https://doi.org/10.1161/01.cir.101.23.e215>
11. Rolink, J., Kutz, M., Fonseca, P., Long, X., Misgeld, B., & Leonhardt, S. (2015). Recurrence quantification analysis across sleep stages. *Biomedical Signal Processing and Control*, 20, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2015.04.006>
12. Joab R Winkler. (1993). Numerical recipes in C: The art of scientific computing, second edition. *Endeavour*, 17(4), 554. [https://doi.org/10.1016/0160-9327\(93\)90069-F](https://doi.org/10.1016/0160-9327(93)90069-F)
13. Chelidze, T., & Matcharashvili, T. (2015). Dynamical Patterns in Seismology. In Jr. Webber Charles L. & N. Marwan (Eds.), *Recurrence Quantification Analysis: Theory and Best Practices* (pp. 291–334). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07155-8_10
14. Webber, C. L. (n.d.). *Chapter 2. Recurrence Quantification Analysis of Nonlinear Dynamical Systems*.
15. Myers, A., & Khasawneh, F. A. (2020). On the automatic parameter selection for permutation entropy. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 30(3), 033130. <https://doi.org/10.1063/1.5111719>
16. *Time Series Analysis: Forecasting and Control, 5th Edition* | Wiley. (n.d.). Wiley.com. Retrieved March 16, 2025, from <https://www.wiley.com/en-us/Time+Series+Analysis%3A+Forecasting+and+Control%2C+5th+Edition-p-9781118675021>

17. Khasawneh, F. A., Munch, E., Barnes, D., Chumley, M. M., Güzel, İ., Myers, A. D., Tanweer, S., Tymochko, S., & Yesilli, M. (2025). Teaspoon: A Python Package for Topological Signal Processing. *Journal of Open Source Software*, 10(107), 7243. <https://doi.org/10.21105/joss.07243>
18. Rawald, T., Sips, M., & Marwan, N. (2017). PyRQA—Conducting recurrence quantification analysis on very long time series efficiently. *Computers & Geosciences*, 104, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.11.016>
19. Rawald, T., Sips, M., Marwan, N., & Dransch, D. (2014). Fast Computation of Recurrences in Long Time Series. In N. Marwan, M. Riley, A. Giuliani, & Jr. Webber Charles L. (Eds.), *Translational Recurrences* (pp. 17–29). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09531-8_2
20. Chang, C.-C., & Lin, C.-J. (2011). LIBSVM: A library for support vector machines. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2(3), 1–27. <https://doi.org/10.1145/1961189.1961199>
21. SVC. (n.d.). scikit-learn. Retrieved March 16, 2025, from <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.svm.SVC.html>
22. V. Ye. Belozyorov. (2018). On novel conditions of chaotic attractors existence in autonomous polynomial dynamical systems. *Nonlinear Dynamics*, 91(4), 2435–2452. <https://doi.org/10.1007/s11071-017-4023-y>

Received 01.04.2025.
Accepted 03.04.2025.

Класифікація стану очей на основі ЕЕГ-даних з використанням рекурентного аналізу

Актуальність цієї статті зумовлена зростаючим інтересом до портативних ЕЕГ-пристроїв та необхідністю розробки ефективних алгоритмів аналізу мозкової активності за обмежених технічних ресурсів. У цій статті розглядається проблема класифікації станів мозку за даними електроенцефалографії (ЕЕГ) з метою розрізнення конкретних двох станів розслабленості та концентрації. Досліджується класифікація відкритих і закритих очей, оскільки закриття очей асоціюється з підвищеною розслабленістю. Запропоновано метод класифікації на основі кількісного аналізу рекурентних діаграм, що є одним із підходів теорії хаосу, та проведено його порівняння з традиційним аналізом мозкових ритмів. Результати експериментів показали, що метод рекурентного аналізу перевершує спектральний аналіз за точністю класифікації, зокрема для точки ОІ точність зросла з 86% до 95%. Визначено оптимальні параметри реконструкції фазового простору: затримка 25 мс і розмірність простору вкладення 4, що узгоджується зі спектральними характеристиками сигналу. Аналіз важливості ознак показав, що найбільш значущими параметрами для класифікації є ентропія та довжина білих вертикальних і діагональних ліній на рекурентних діаграмах, а також детермінізм і ламінарність. Отримані результати можуть бути корисними для розробки алгоритмів аналізу ЕЕГ у портативних пристроях та застосувань у сфері нейроінтерфейсів і когнітивного тренування.

Панасенко Єгор Сергійович - аспірант кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, Факультет Прикладної Математики, спеціальність 113 "Прикладна математика".

Білозьоров Василь Євгенєвич - доктор фізико-математичних наук, професор кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Panasenko Yehor Serhiyovych - PhD student, Department of Computer Technologies, Oles Honchar Dnipro National University, Faculty of Applied Mathematics, specialty 113 "Applied Mathematics".

Belozyorov Vasily Yevhenovych - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of computer Technologies, Oles Honchar Dnipro National University.

G. Shvachych, P. Shcherbyna, O. Kabachenko, I. Olishevskyi, P. Ishchuk

DEVELOPMENT AND EXPLORATION OF PARALLEL TECHNOLOGIES IN STOCHASTIC PROGRAMMING TASKS

Abstract. This research examines parallel technologies for modeling tasks using the Monte-Carlo method. The actuality of these studies is explained by the fact that the Monte-Carlo method has had and continues to have a significant impact on the development of computational mathematics. It is shown that the main essence of the method lies in the random simulation of a large number of scenarios and statistical processing of the results, which explains the inherent possibility of its parallelization. It is noted that since individual iterations of the Monte-Carlo method are typically independent of one another, they can be easily distributed among several threads or nodes of a cluster system. This makes the method ideal for parallel and distributed computing. The main aim of the research is to highlight peculiarities of parallelizing computations in solving a wide range of applied tasks. Calculation schemes that ensure increased performance and speed are presented. The effectiveness of the proposed approach is illustrated by studies and graphical interpretations of convergence and approximation of the developed approach.

Keywords: parallel computing, stochastic modeling, random process, method convergence, approximation, computation scheme.

Problem statement. The Monte-Carlo method has significantly influenced and continues to influence on the development of computational mathematics methods, particularly numerical integration methods. In solving many problems, it successfully combines with other computational methods, complementing them.

The essence of the Monte-Carlo method is as follows. Let it be required to find the value a of a certain studied value. To do this, a random variable X is chosen, whose mathematical expectation is equal to a , i.e. $M(X) = a$.

Practically, this is done as follows: n experiments are conducted, resulting in n possible values of X ; their arithmetic mean is calculated: $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$, and $\bar{x}$ is considered as the estimate (approximate value) a^* of the desired number a , that is, $a \simeq a^* = \bar{x}$.

Since the Monte-Carlo method requires large number of experiments, it is often referred to as the method of statistical trials. The theory of this method shows how to choose the most appropriate random variable X and find its possible values. In particular, methods for reducing the dispersion of the involved random variables are being developed, which leads to

a decrease in the error that occurs when replacing the sought mathematical expectation a with its estimate, a^* .

The most important characteristic of the method is the estimation of its error. Since this is of significant importance, let's consider some approaches to error estimation for the Monte-Carlo method to understand its essence.

Let n independent trials (n possible values of X were experimentally implemented) be conducted to obtain the estimate a^* of the mathematical expectation a of the random variable X , and let the sample mean $\bar{X}$ be found based on these trials and accepted as the desired estimate when $a^* = \bar{X}$. It is clear that in the case of repeating the experiment, different possible values of X will be obtained, leading to different mean values and, consequently, a different estimate a^* . Hence, it follows that obtaining an exact estimate of the mathematical expectation is impossible. Naturally, the question arises about the magnitude of the permissible error. For clarity, let's limit ourselves to finding only the upper bound δ of the permissible error with a given probability (reliability) γ , namely: $P(|\bar{X} - a| \leq \delta) = \gamma$.

It is worth noting that the upper bound of the error δ , which we are interested in, is nothing other than the "accuracy of the estimate" of the mathematical expectation based on the sample mean value in confidence intervals. Let's consider the following three cases.

1. The random variable X is normally distributed, and its standard deviation σ is known.

In this case, with confidence γ , the upper bound of the error is

$$\delta = \frac{t_\gamma \cdot \sigma}{\sqrt{n}}, \quad (1)$$

where n is the number of trials (experimental values of X); t_γ is the argument value of the Laplace function at which $\Phi(t_\gamma) = \gamma$; σ is the known standard deviation of the random variable X .

2. The random variable X is normally distributed, and its standard deviation σ is unknown.

In this case, the upper bound of the error with reliability γ is determined as follows:

$$\delta = \frac{t_\gamma \cdot S}{\sqrt{n}}, \quad (2)$$

where n is the number of trials; S is the "corrected" standard deviation; t_γ is the Student's t -statistic.

3. The random variable X is distributed according to a law that differs from the normal distribution.

Under this condition, with a sufficiently large number of trials ($n > 30$) and reliability approximately equal to γ , the upper bound of the error can be calculated using formula (1), if the standard deviation σ of the random variable X is known; if the value of σ is unknown, its estimate S – the "corrected" standard deviation — can be substituted into formula (1), or formula (2) can be used.

Let's emphasize, that the larger the value of n , the smaller the difference between the results, given by both formulas. This is explained by the fact that as $n \rightarrow \infty$, the Student's distribution approaches the normal distribution.

From relations (1) and (2), it follows that the error of the Monte-Carlo method is inversely proportional to the square root of the number of trials. This characteristic will be used as the basis for further study of this method's error.

From the above description, it follows that the Monte-Carlo method is closely related to the tasks of probability theory, mathematical statistics, and computational mathematics. When considering the task of modeling random variables (especially uniformly distributed ones), number theory methods also play an important role in this case.

The given statements show that the convergence of the Monte-Carlo method is convergence in probability. This circumstance should hardly be considered disadvantage, as probabilistic methods largely justify themselves in practical applications. As for problems that have a probabilistic description, the convergence in probability is, to some extent, even natural when solving them.

Analysis of recent research and publications. Among numerical methods in mathematical calculations, there has been a recent resurgence of Monte-Carlo methods [1–4]. This name refers to a group of numerical methods based on obtaining a large number of realizations of a stochastic process, which is constructed in such way that its probabilistic characteristics coincide with the corresponding parameters of the problem at hand. Monte-Carlo methods are used for solving problems in industries of physics, mathematics, economics, optimization, control theory, and others. Fundamental works on Monte-Carlo methods appeared in 1955–1956. Since then, many scientific works have been written, describing the application of this method [5–10]. Even a superficial review of the titles of these works allows one to conclude that the Monte-Carlo method is applicable for solving practical problems in various fields of science and engineering.

The distinctive feature of Monte-Carlo methods is their experimental nature. For clarity, we will refer to a procedure as a Monte-Carlo method, if it involves the use of statistical sampling techniques for an approximate solution given mathematical or physical problem.

Monte-Carlo methods have had a significant impact on the development of computational mathematics and continue to do so, while in solving certain classes of problems, they successfully combine with other computational methods and complement them. Their application is particularly justified for problems that allow a probabilistic theoretical description. This is explained both by the naturalness of obtaining a response with a certain given probability in problems with probabilistic content, and by the significant simplification of the solution procedure. Currently, there are statistical methods for solving certain classes of partial differential equations, integral equations, eigenvalue problems, and systems of linear algebraic equations.

Among other computational methods, the Monte-Carlo method stands out for its simplicity and versatility. Slow convergence is a significant drawback of the method, but this article will describe its computational modifications, that ensure high convergence rates under

certain assumptions. However, the computational procedure becomes more complex, bringing it closer to other procedures in computational mathematics. The convergence of the Monte-Carlo method is probabilistic convergence. This fact should hardly be considered a disadvantage, as probabilistic methods are often highly effective in practical applications. The convergence of the Monte-Carlo method is probabilistic convergence. This circumstance should hardly be considered disadvantage, as probabilistic methods largely justify themselves in practical applications. As for problems with probabilistic descriptions, when solving them, convergence in probability is, to some extent, even natural. This explains the inherent possibility of parallelizing the method. Since individual Monte-Carlo iterations are typically independent of each other, they can be easily distributed across multiple threads or nodes in a cluster system. This makes the method ideal for parallel and distributed calculations.

Finally, it should be noted that the accuracy of the method's calculations heavily depends on the quality of the pseudo-random number generator used, while the speed of calculations is determined by the function describing the analyzed process and, of course, the performance of the "compute unit" itself. Today, the clock speed of modern processors has surpassed the GHz threshold, and the amount of random access memory in personal computers is measured in gigabytes. Considering that the relevant class of tasks will be processed using parallel computing, the performance of the "compute unit" is no longer a limiting factor (but rather a determining one) for the application of power-sensitive numerical algorithms in solving multidimensional problems. A practical illustration of the method's operational mechanism and some fundamental features of its implementation will be examined in the context of solving typical applied problems.

The purpose. The research aim is to improve understanding of the behavior of the Monte Carlo method in parallel computing and to identify optimal load distribution strategies to ensure fast and accurate convergence. Development and analysis of the efficiency of parallelizing the Monte-Carlo method is implemented using the *Python* programming language. Main focus is on studying the convergence of the method, examining the impact of parallelization on the accuracy and convergence speed, as well as assessing the scalability of computations on multi-core processors.

Main research material presentation. Many software applications developed for single-processor computing systems lack an adequate level of parallelism. Attempts to parallelize them at the level of individual loops often do not yield the desired results, leading to low code performance.

The Monte-Carlo method occupies a prominent position among different numerical methods in mathematical calculations. However, its use has been limited in the past due to the substantial computational resources it requires.

It is important to highlight, that the Monte-Carlo method allows finding an approximate solution to a problem at a specific fixed point, without requiring knowledge of the solutions at all points in the grid domain. This makes it notably different from, for instance, traditional methods of solving the Dirichlet problem.

The simplified computation scheme using the Monte-Carlo method is shown in Fig. 1.

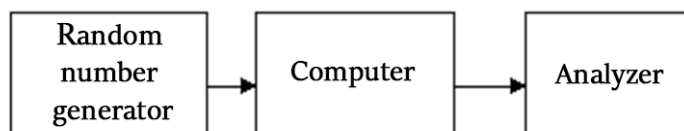


Figure 1 - Monte-Carlo method calculation scheme

The application of this method provides a new way to view the idea of parallelizing computations and using parallel computing technologies. As intermediate calculations can be carried out independently across different processor cores, their results can be consolidated on a dedicated "analyzer" core. This allows the parallel computing algorithm to be represented with a scheme, as illustrated in Fig. 2.

According to this scheme, a single random number generator assigns a specific random value to each "compute unit". However, this architecture has a significant drawback: the constant transmission of information through communication channels creates delays and reduces system's performance. Additionally, the quality of random number generator can affect the result, as repetitions or similar values may occur in the sequence of random numbers. However, these factors do not have a significant impact on the calculation error.

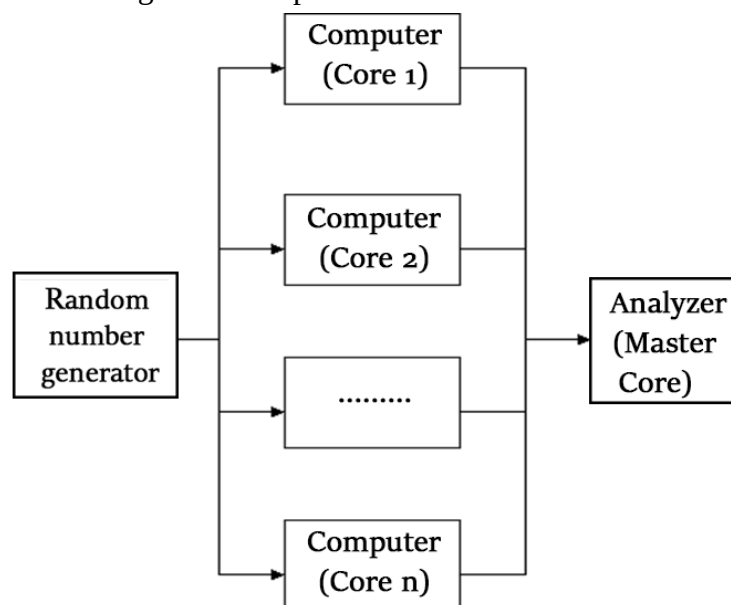


Figure 2 - Monte-Carlo parallel computing algorithm

The experience in developing parallel computations allowed to improve this scheme. The modified algorithm, shown in Fig. 3, assumes that each compute unit has a separate random number generator. This removes the necessity for constant data transmission between the generator and the processing cores, greatly accelerating the computation process.

Thus, Monte-Carlo algorithms demonstrate high resilience to changes in input data, provide maximum parallel efficiency, and minimize computation time. By appropriately distributing computing cores, it is possible to organize parallel execution of calculations across the entire domain, thereby improving the overall system performance.

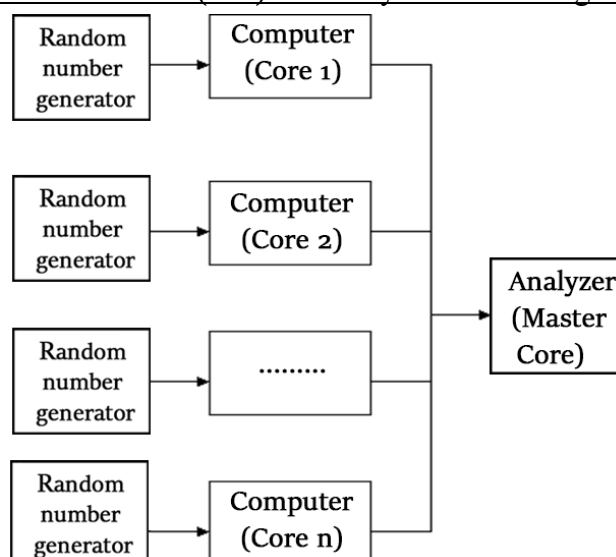


Figure 3 - Modified Monte-Carlo parallel computing algorithm

Realization of parallel computations was carried out using the *Python* programming language. It is worth mentioning that *Python* is currently one of the most widely used programming languages for developing and modeling parallel computations. This is attributed to its ease of use, extensive library ecosystem, and an active developer community, that continuously enhances tools and shares expertise. The use of *Python* for realization parallel computations is explained by several key factors, including ease of modeling, the availability of specialized libraries, a wide range of tools for handling large volumes of data, as well as integration with modern hardware accelerators such as graphics processing units (GPUs) and tensor processing units (TPUs).

The popularity of *Python* continues to grow rapidly alongside the development of parallel computing and artificial intelligence. This makes it an ideal option for both academic research and commercial use in the field of deep learning. A number of prominent companies, such as Google, Facebook, and OpenAI, extensively utilize *Python* in their developments, thereby reinforcing its dominance in the realms of artificial intelligence and parallel programming.

One of *Python*'s key advantages is its convenience for rapid prototyping. Due to the interpreted nature of the language, developers can swiftly experiment with various parallel computation architectures, adjust model parameters, and obtain real-time results, which significantly accelerates the development process.

In addition, *Python* is renowned for its high compatibility with other programming languages and frameworks. For instance, modules such as Cython facilitate seamless interaction with C/C++, thereby significantly enhancing computational performance. *Python* also integrates seamlessly with leading big data processing tools, such as *Apache Spark*, making it a versatile solution for machine learning and data analysis tasks.

Thus, *Python* remains the leading programming language for implementing parallel computations, offering exceptional flexibility, ease of use, and a powerful toolkit for handling complex computational tasks.

The software implementation of the computations was developed based on the principles of object-oriented programming. This approach is justified by the fact that object-oriented programming facilitates the creation of modular, reusable, and scalable parallel computations. Through encapsulation, inheritance, and polymorphism, efficient systems for multi-threaded and multi-processor data processing can be built. Therefore, a class was created to perform the necessary calculations:

```
class Integral:
    def __init__(self, a, b, integrand, integral_mlt=1):
        self.__a = None
        self.__b = None
        self.__integrand = None
        self.__variables = None
        self.__integral_mlt = None
```

The following libraries were also utilized, enabling efficient work with computations in both numerical and symbolic mathematics, as well as facilitating the implementation of multiprocessing programming:

```
import numpy as np
from sympy import sympify, zoo, SympifyError
from multiprocessing import Pool, cpu_count
from functools import partial
import time
```

NumPy was used as the primary library for working with multidimensional arrays and performing numerical computations. For the purpose of these studies, it supported array manipulation and the use of optimized functions for efficient calculations.

sympify() function from the symbolic computation library *SymPy* was used to convert the necessary data into a symbolic expression; the symbol *zoo* was employed to denote undefined values arising in mathematical expressions; the *SympifyError* class was utilized to handle errors occurring due to incorrect input in the *sympify()* function. These elements facilitate symbolic computations, enabling the efficient handling of mathematical expressions and exceptional cases.

Multiprocessing library was utilized for the implementation of parallel computations. *Pool* class in the *multiprocessing* module allows creation of a pool of processes for parallel task execution. It creates a specified number of processes and distributes tasks among them, which allows efficient utilization of multi-core processor resources.

cpu_count() function returns an integer representing the number of processor cores available for computation. In this research, it was utilized to determine the optimal number of processes for multiprocessing tasks. This function enables the automatic configuration of a process pool (*Pool*) to ensure efficient resource utilization. It has proven to be exceptionally useful when handling intensive computational workloads, such as machine learning, big data processing, and parallel algorithms.

partial function from the *functools* module enabled the creation of new functions based on existing ones by predefining certain arguments. This not only streamlined function calls, where specific arguments are frequently used, but also facilitated the passing of functions as

parameters in multithreaded code. Moreover, it contributed to the development of new function variations without redundant code duplication.

time library has provided the capability to work with time.

monte_carlo_method_parall method performs parallel computations by leveraging the multiprocessing library, effectively distributing the computational load among several processes:

```
def monte_carlo_method_parall(n: int, integral: Integral,
**kwargs):
    cpu_cnt = cpu_count()
    if n <= cpu_cnt:
        chunks = [1] * n
    else:
        chunk_size = n // cpu_cnt
        remainder = n % cpu_cnt
        chunks = [chunk_size + 1 if i < remainder else
chunk_size for i in range(cpu_cnt)]
    monte_partial = partial(monte_carlo_method, inte-
gral=integral, **kwargs)
    with Pool(processes=cpu_cnt) as pool:
        results = pool.map(monte_partial, chunks)
    return np.mean(results)
```

At the first stage, method determines the number of available system cores, using the *cpu_count()* function. Then, if the number of cores is greater than or equal to the number of points to be generated, each process handles one point (if there are more points than cores, some processes may remain unused). If the number of points exceeds the available cores, method calculates cluster size – number of points each process should handle, by performing integer division of the total number of points by the number of cores. In cases where the points do not divide evenly, the remainder is distributed uniformly across the processes using the following expression:

```
chunks = [chunk_size + 1 if i < remainder else chunk_size for i
in range(cpu_cnt)]
```

Then method utilizes the *partial* function to create a partial function, that incorporates the common arguments required for all processes to compute the integral values (specifically, the integral object and additional parameters passed through *kwargs*). This partial function is based on the *monte_carlo_method*.

```
monte_partial = partial(Integrator.monte_carlo_method, inte-
gral=integral, **kwargs)
```

After the distribution of points, the *monte_carlo_method_parall* method utilizes the *Pool* from the multiprocessing module to initiate several parallel processes. *Pool* invokes the created partial function across multiple processes, passing it the corresponding number of points for processing. The results from each process are stored in the *results* variable:

```
results = pool.map(monte_partial, chunks)
```

Once all processes are completed, method calculates the average of the obtained partial results using the *mean* function and returns the final outcome.

The initial data for the class of problems under study are wrapped in the condition *if*

```
__name__ == "__main__":
    if __name__ == "__main__":
        integral = Integral(0, 1, "(exp(-x)+1)**2")
        n = 60000
        start_time = time.time()
        result = monte_carlo_method_parall(n, integral)
        end_time = time.time()
        exec_time = end_time - start_time
```

Furthermore, to evaluate the efficiency of parallelization, the computation time for both sequential and parallel algorithms is determined. In the given case, an integral is computed for a function that lacks analytical quadrature solutions.

The efficiency of the parallel code was assessed by measuring its acceleration and parallelization effectiveness. These metrics were calculated using well-established formulas from parallel computing theory.

speedup attained by executing a parallel algorithm on n cores, in comparison to sequential execution, is determined by the following formula:

$$S(n) = \frac{t_1}{t_n}, \quad (3)$$

where S is the acceleration; t_1 is the time taken to solve the task on a scalar processor; t_n is the time taken to solve the task on a processor with n cores.

Therefore, acceleration is calculated as the ratio between the execution time of a task on a scalar processor and the time taken by the parallel algorithm. The parameter n serves to represent the computational complexity of the problem at hand.

The *efficiency* of parallelization is determined by the following formula:

$$E(n) = \frac{t_1}{t_n \cdot n} = \frac{S(n)}{n}. \quad (4)$$

For this type of computation, the effectiveness of parallelization represents the average duration of the algorithm's execution during which processor cores are actively involved in solving the task.

It should be noted that the control experiments were conducted using a computer with the following specifications:

Processor type: Core(TM) i5-11400H; clock frequency: 2.70GHz; number of cores: 6.

In accordance with expressions (3) and (4), the following efficiency estimates of the code parallelization were obtained: $S(n) = 4,469$; $E(n) = 0,745$.

Analysis of the conducted research revealed the following. Efforts to improve the quality of parallel computing based on one metric (such as speedup or efficiency) may lead to a deterioration in another metric, as the quality indicators of parallel computations are often conflicting. An increase in acceleration is typically achieved by increasing the number of processor cores, which, however, often results in a efficiency decrease. Conversely, enhanced efficiency is frequently attained by reducing the number of processor cores (with the ideal case of perfect efficiency, $E(n) = 1$, being effortlessly achieved by using a single-core processor.

As a result, the development of parallel computation methods often involves selecting a certain compromise, taking into account the desired acceleration and efficiency metrics, as it demonstrated by the presented studies.

The peculiarities of studying the accuracy using the Monte-Carlo method were as follows. It is known that the accuracy of the Monte-Carlo method possesses several distinctive features. The initial test revealed, that the computational error is dependent on the number of tests, denoted as n . This indicates that as n increases, the obtained results approach the actual value, and the absolute error gradually diminishes. On average, the theoretical convergence rate of the Monte-Carlo method is determined as follows $O(1/\sqrt{n})$, meaning that the error decreases inversely proportional to the square root of the number of trials.

To verify this, nine series of approximations were conducted: first approximation involved 50 points, second 100 points, and so on up to 50,000 points. Each experiment was repeated 30 times for each set of points, after which the average absolute error was calculated. Since the Monte-Carlo method relies on randomly generated points, the error can vary depending on the quality of the random sampling. Therefore, to minimize the impact of randomness, each experiment was repeated multiple times, and the resulting outcomes were averaged. Based on this data, a graph of the mean absolute error was constructed for sample sizes of 50, 100, 500, 1000, 2000, 2500, 5000, 10,000, and 50,000 tests.

Fig. 4 illustrates the convergence of the Monte-Carlo method.

Let us analyze the obtained results. The graph illustrates the dependence between the absolute error and the number of points, n , in the Monte-Carlo method. Upon examining it, the following conclusions can be drawn:

- the typical convergence behavior $O(1/\sqrt{n})$ of the Monte-Carlo method is confirmed;

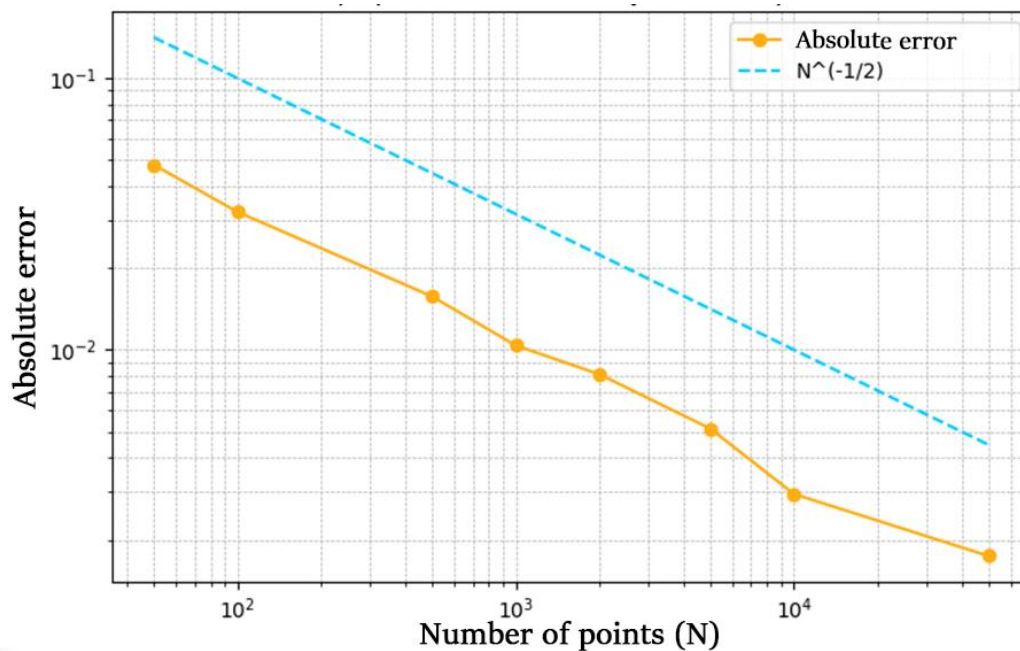


Figure 4 - Monte-Carlo convergence graph

- increasing n leads to a decrease in the error, albeit slowly, which is a characteristic feature of this method;
- the actual error aligns well with the theoretical estimate, indicating the correct implementation of the parallel algorithm;
- the x-axis (number of points) and y-axis (absolute error) are presented on a logarithmic scale, providing a clear depiction of the power-law relationship.

Fig. 5 presents a graph depicting the convergence approximation of the Monte-Carlo method.

An analysis of this dependency reveals, that for small values of n (up to 500–1000), significant deviations from the exact value occur, due to the high variance of the method when the number of samples is insufficient. In some cases, certain values may even fall outside the expected range, which is characteristic of the stochastic nature of the Monte-Carlo method.

At the same time, as the value of n increases, the method begins to stabilize. Starting from approximately 3000–4000 points, the results converge almost entirely with the exact value. This confirms the fundamental principle of Monte-Carlo: as the sample size grows, the method yields increasingly accurate results.

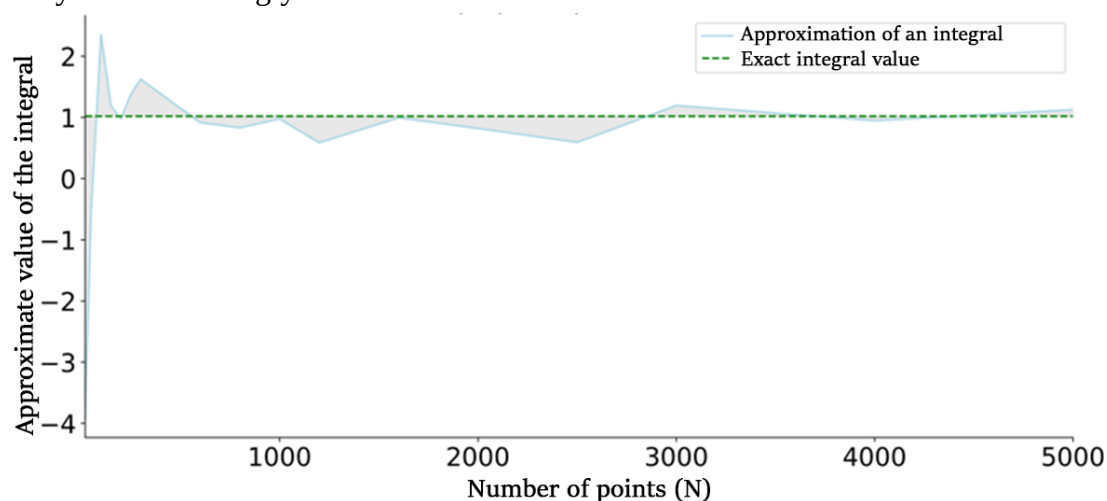


Figure 5 - The approximation convergence curve of the Monte-Carlo method

Conclusions. Research explores parallel technologies for modeling Monte-Carlo tasks. The relevance of the conducted studies is underscored by the fact that the Monte-Carlo method has had, and continues to have, a profound impact on the development of computational mathematics techniques. It has been shown that its use is especially appropriate for solving problems that can be described in theoretical and probabilistic terms. This is due to both the natural process of obtaining a solution with a given probability in probability-based tasks and the considerable simplification of the solution procedure.

This inherent ability to parallelize the method arises from the fact that individual Monte-Carlo iterations are generally independent of each other, making them easy to distribute across multiple threads or nodes within a cluster system. This characteristic makes the method especially well-suited for parallel and distributed computing. As a result, the main focus of

the research was to explore the intricacies of parallelizing computations in the context of solving a diverse array of applied problems.

It is worth noting that parallelizing the Monte-Carlo method is an important and relevant area in contemporary computational science, as it significantly enhances the speed and efficiency of calculations. With the availability of powerful processors and GPUs, this approach is widely applied across various fields of science and industry.

The calculation schemes that enhance productivity and performance are presented. The effectiveness of the proposed approach is demonstrated through research and graphical interpretations, showcasing the convergence and approximation of the developed method.

Finally, it should be highlighted that the Monte-Carlo method is a highly effective technique for addressing a broad spectrum of practical problems. It is easy to implement, and its error can be minimized by increasing the sample size.

Like any method, Monte-Carlo has its drawbacks. For instance, when working with a small amount of data, the variance becomes excessively high, and in such cases, it is often preferable to turn to alternative approaches.

REFERENCE

1. Rud O. Theoretical aspects of using the monte carlo method for modeling the evaluation of investment projects efficiency. *Market Infrastructure*. 2024. No. 79.
URL: <https://doi.org/10.32782/infrastructure79-24>
2. Sirenko K. A., Mazur V. L., Derecha D. O. Application of the monte carlo method in charge calculations and regulation of the chemical composition of pig iron in the process of its smelting. *Casting processes*. 2023. Vol. 154, no. 4. P. 44–57.
URL: <https://doi.org/10.15407/plit2023.04.044>
3. Nekrasova M. Monte-Carlo method and artificial intelligence: application of Monte-Carlo method in reinforcement learning. *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: Dynamics and Strength of Machines*. 2024. No. 2. P. 47–52.
URL: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2024.2.315342>
4. Velikova T., Mileva N., Naseva E. Method “Monte Carlo” in healthcare. *World Journal of Methodology*. 2024. Vol. 14, no. 3. URL: <https://doi.org/10.5662/wjm.v14.i3.93930>
5. Kroese D. P., Rubinstein R. Y. *Simulation and the Monte Carlo Method*. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2016. 432 p.
6. Caflisch R. E. Monte Carlo and quasi-Monte Carlo methods. *Acta Numerica*. 1998. Vol. 7. P. 1–49. URL: <https://doi.org/10.1017/s0962492900002804>
7. Kroese D. P., Taimre T., Botev Z. I. *Handbook of Monte Carlo Methods*. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2013. 772 p.
8. Binder K., Heermann D. W. *Monte Carlo Simulation in Statistical Physics: An Introduction*. Springer, 2019. 258 p.
9. Wang H. *Monte Carlo Simulation with Applications to Finance*. Taylor & Francis Group, 2012. 292 p.
10. Kalos M. H. *Monte Carlo Methods in Quantum Problems*. Dordrecht : Springer Netherlands, 1984. 291 p.

Received 02.04.2025.
Accepted 04.04.2025.

**Розробка та дослідження паралельних технологій
задач стохастичного програмування**

У дослідженнях розглядаються паралельні технології моделювання задач методом Монте-Карло. Показано, що основна суть методу полягає у випадковому моделюванні великої кількості сценаріїв та статистичній обробці результатів, що пояснює природну можливість його розпаралелювання. Відзначається, що оскільки окремі ітерації методу Монте-Карло зазвичай незалежні одна від одної, їх легко розподілити між кількома потоками або вузлами кластерної системи. Це робить метод ідеальним для паралельних і розподілених обчислень. Приводяться схеми обчислень, які забезпечують збільшення продуктивності та швидкодії. Ефективність запропонованого підходу ілюструється дослідженнями та графічними інтерпретаціями збіжності та апроксимації розробленого підходу.

Швачич Геннадій Григорович – доктор технічних наук, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна.

Щербина Павло Олександрович – асистент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна.

Кабаченко Олег Вікторович – студент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна.

Олішевський Ілля Геннадійович – доктор PhD, доцент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна.

Іщук Павло Олександрович – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна.

Shvachych Gennady – Doctor of science, Professor, Department of Computer Systems Software, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

Shcherbyna Pavlo – Assistant, Department of Computer Systems Software, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

Kabachenko Oleg – student of the Department of Computer Systems Software, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

Olishevskiy Ilya – Doctor PhD, associate professor, Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

Moroz Dmytro – Doctor PhD, associate professor, Department of Computer Systems Software, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

Ishchuk Pavlo – PhD student of the Department of Computer Systems Software, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

HYBRID MODELING OF EEG: THE FITZHUGH-NAGUMO-LORENZ MODEL

Abstract. The paper presents a method of modeling electroencephalographic (EEG) signals using a hybrid biophysical model that combines the FitzHugh-Nagumo dynamics and the chaotic Lorenz system. A comprehensive approach to optimizing the model parameters based on neural networks is developed, which automatically adjusts the parameters to maximize the fit to real EEG data. The proposed model demonstrates the ability to reproduce the characteristic features of EEG signals, including the main rhythms and the corresponding spectral characteristics. An interactive software tool developed in MATLAB provides a convenient interface for use. The results demonstrate the potential of this approach for both neuroscientific research and clinical applications in the diagnosis and modeling of pathologies.

Keywords: EEG, FHN, FHNL, Lorenz system, neural network, modeling, parameter optimization, MATLAB.

Problem definition. The study of the principles of human brain functioning remains one of the most difficult scientific challenges in history. Significant progress has been made thanks to comprehensive research at the intersection of biology, neurochemistry, genetics, and more. However, with each new discovery of the functions and areas of brain activity, more and more additional questions arise, which is why there is still no generally accepted comprehensive theory of brain function. Therefore, one of the key tasks of the analysis and adaptability of existing research methods is to create a dynamic system that will cover the dependence of those activity parameters that most characteristically affect the studied condition factor, disease symptom, or physiological process.

Research goal. Develop a mathematical model of EEG and a controlled parameter space with manual or neural network control of brain dynamics.

Overview. Electroencephalography (EEG) is widely used in both basic neuroscience research and clinical practice. Despite significant advances in signal recording accuracy, the full potential of EEG remains unrealized. A promising area of development is the introduction of computational models for the comprehensive integration of electrophysiological data, network models (at the level of neuroimaging), and behavioral aspects.

The main objective of this work is to create a computational model that integrates cellular processes at different spatial levels and establishes clear correlations with empirical EEG data.

A model is represented as a set of equations describing the relationships between variables. It is noteworthy that there are models for various spatial scales [1, 2, 3], ranging from

single-cell impulse activity to macroscopic oscillations. Equations are used to model the changes in each variable over time or, in some cases, to find analytical solutions to the interdependencies between variables. The dynamics of the resulting time series is influenced by a set of parameters that can be calculated from available data (for example, a model that simulates the excitation of a certain type of neuron may include a time constant determined from rodent experiments) or systematically modified for research purposes. The main task is to create time series that can be compared with empirical data.

The clinical application of EEG patterns is of great importance. Psychiatric and neurological disorders affect an increasingly large proportion of the population, including both patients and their caregivers, causing enormous economic and humanitarian costs to healthcare systems worldwide [4]. One of the main obstacles to improving patient care is the lack of individualized diagnosis, prognosis, and treatment planning [5]. Computational models can be adapted to individual characteristics by adjusting parameters to fit specific data (by directly setting measured parameters or by searching for values that match time series to recorded data). The optimized parameters can be linked to clinical markers, symptoms, and behaviors, which allows, for example, to differentiate pathologies. The use of personalized models provides additional diagnostic capabilities in the form of modeling parameters and results, significantly assisting clinicians in diagnosis and treatment planning [6, 7].

FitzHugh-Nagumo model (FHN). The FitzHugh-Nagumo (FHN) model was developed in the early 1960s as a simplified version of the more complex Hodgkin-Huxley model. In 1961, Richard FitzHugh proposed a mathematical simplification that preserved the key qualitative properties of neuronal dynamics but significantly reduced the computational complexity. Independently of him, Jinichi Nagumo and his colleagues created an electronic circuit in 1962 that realized these equations.

The FitzHugh-Nagumo model describes the dynamics of the neuronal membrane potential and the recovery variable through a system of two differential equations:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = V - \frac{V^3}{3} - W + I(t) \\ \frac{dW}{dt} = \epsilon(V + a - bW) \end{cases} \quad (1)$$

where V represents the membrane potential, W - recovery variable, $I(t)$ - external current (input signal), ϵ, a, b - model parameters. The parameter ϵ reflects the difference in the time scales of the potential dynamics and the recovery variable, while a and b affect the bifurcation properties of the system.

The model demonstrates important biophysical properties, including threshold excitation, all-or-nothing action potential generation, refractory period, and various dynamic modes arising from bifurcations in the parameters.

Lorentz system. The Lorentz system, developed by meteorologist Edward Lorentz in 1963 while studying atmospheric convection, is a classical three-dimensional system of non-

linear differential equations that has become a fundamental contribution to the development of chaos theory and nonlinear dynamics.

The Lorentz system is described by the following equations:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = \sigma(Y - X) \\ \frac{dY}{dt} = X(\rho - Z) - Y \\ \frac{dZ}{dt} = XY - \beta Z \end{cases} \quad (2)$$

where X , Y та Z — state variables, σ , ρ and β - system parameters. This system demonstrates chaotic behavior at certain parameter values, in particular, the classical values $\sigma = 10$, $\rho = 28$ and $\beta = \frac{8}{3}$ lead to the formation of the Lorentz attractor.

Lorentz's key discovery was the demonstration of deterministic chaos, a phenomenon in which minimal differences in initial conditions lead to radically different trajectories over time, which revolutionized the understanding of the predictability of dynamical systems and established fundamental limitations to long-term forecasts.

Hybrid model FHNL. We integrate the FHN model and the Lorentz system into a single hybrid model. For a system with cap N neurons, the model is described by a system of $2N + 3$ differential equations:

$$\begin{cases} \frac{dV_i}{dt} = V_i - \frac{V_i^3}{3} - W_i + I_{EEG}(t) + \sum_{j=1}^N g_{syn} W_{ij} V_j, \quad i = \overline{(1, N)} \\ \frac{dW_i}{dt} = \epsilon(V_i + a - bW_i), \quad i = \overline{(1, N)} \\ \frac{dX}{dt} = \sigma(Y - X) \\ \frac{dY}{dt} = X(\rho - Z) - Y \\ \frac{dZ}{dt} = XY - \beta Z \end{cases} \quad (3)$$

where $I_{EEG}(t)$ - interpolated real EEG signal or generated input noise, g_{syn} - strength of synaptic connection, W_{ij} — matrix of connections between neurons.

Signal generation and optimization methods. The synthetic EEG signal is generated as a weighted sum of neuronal membrane potentials with the addition of high-frequency components:

$$EEG(t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i V_i(t) + \eta(t) \quad (4)$$

where α_i - weighting coefficients for each neuron, $\eta(t)$ - high-frequency noise that provides realistic signal characteristics. Additionally, bandpass filtering is applied in the range of 0.5-40 Hz, which corresponds to standard EEG frequencies.

For further effective neural network training, a set of time and frequency characteristics is extracted from the EEG signal: mean value, standard deviation, skewness, kurtosis, maximum and minimum values, median, median absolute deviation, variance, power in key frequency bands, relative power, power ratio, and entropy indicators.

To predict the optimal model parameters, a feed-forward neural network with the following architecture is used:

- Input layer: the dimension corresponds to the number of extracted features;
- Two hidden layers with 20 and 10 neurons, respectively;
- Output layer: 7 neurons corresponding to the model parameters;
- Activation function: hyperbolic tangent;
- Learning algorithm: Levenberg-Marquardt.
- Inputs are normalized before training to ensure better performance.

Software implementation. The software implementation of the FHNL hybrid model, developed in MATLAB, is a comprehensive toolkit that integrates the numerical solution of a system of differential equations using the fourth- or fifth-order Runge-Kutta method (ODE45) with machine learning-based parameter optimization mechanisms and an interactive graphical interface. The core of the system consists of functions for modeling neuronal dynamics, calculating the error between real and simulated EEG signals, and generating synthetic EEG data, supplemented by components for working with neural networks, including extracting time and frequency characteristics from EEG signals, automatically generating training data sets, training a neural network, and predicting optimal model parameters (Fig. 1).

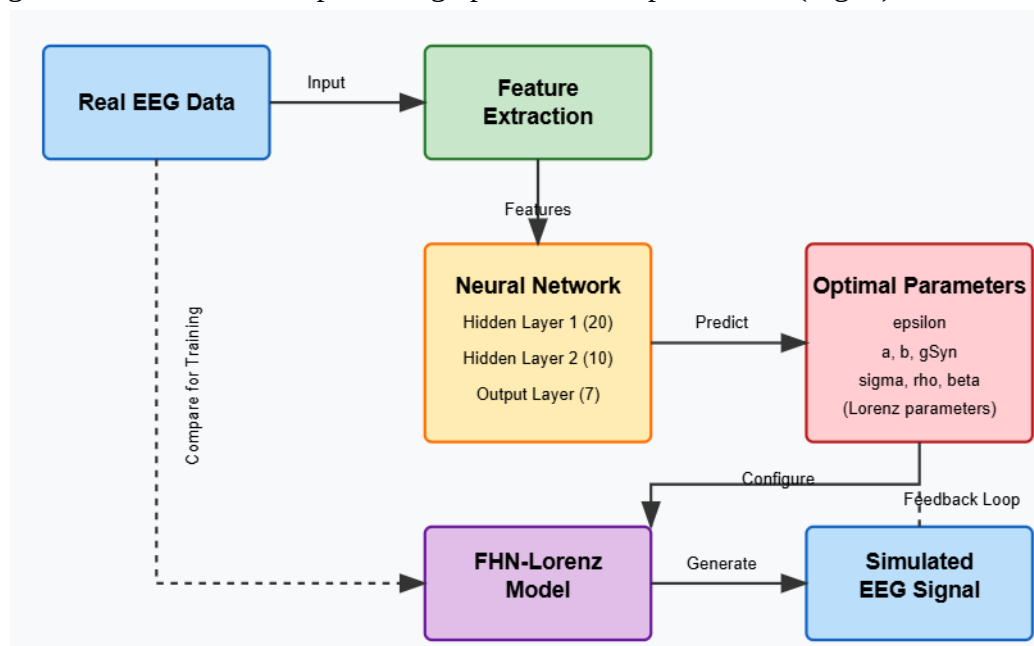


Figure 1 - Structure of the program implementation

The intuitive graphical interface (Fig. 2) provides interactive control of model parameters via sliders, real-time visualization of real and simulated EEG signals, neural activity, and Lorenz attractor, and provides functionality for loading EEG data in various formats (CSV, MAT, EDF), training a neural network, and exporting results, demonstrating an effective combination of computational neuroscience, machine learning methods, and interactive visualization in a single software solution for researchers and clinicians.

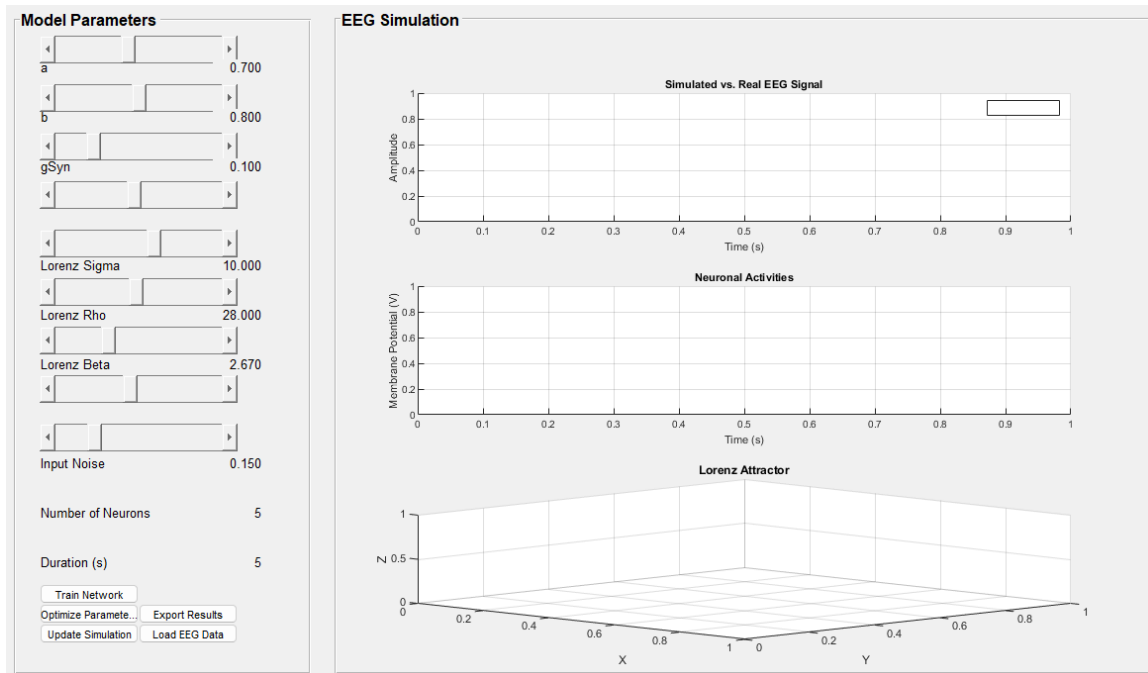


Figure 2 - Graphical interface with interactive elements for EEG modeling

To demonstrate the modeling results, the parameters of different EEG scenarios were determined and the corresponding model was synthesized (Fig. 3).

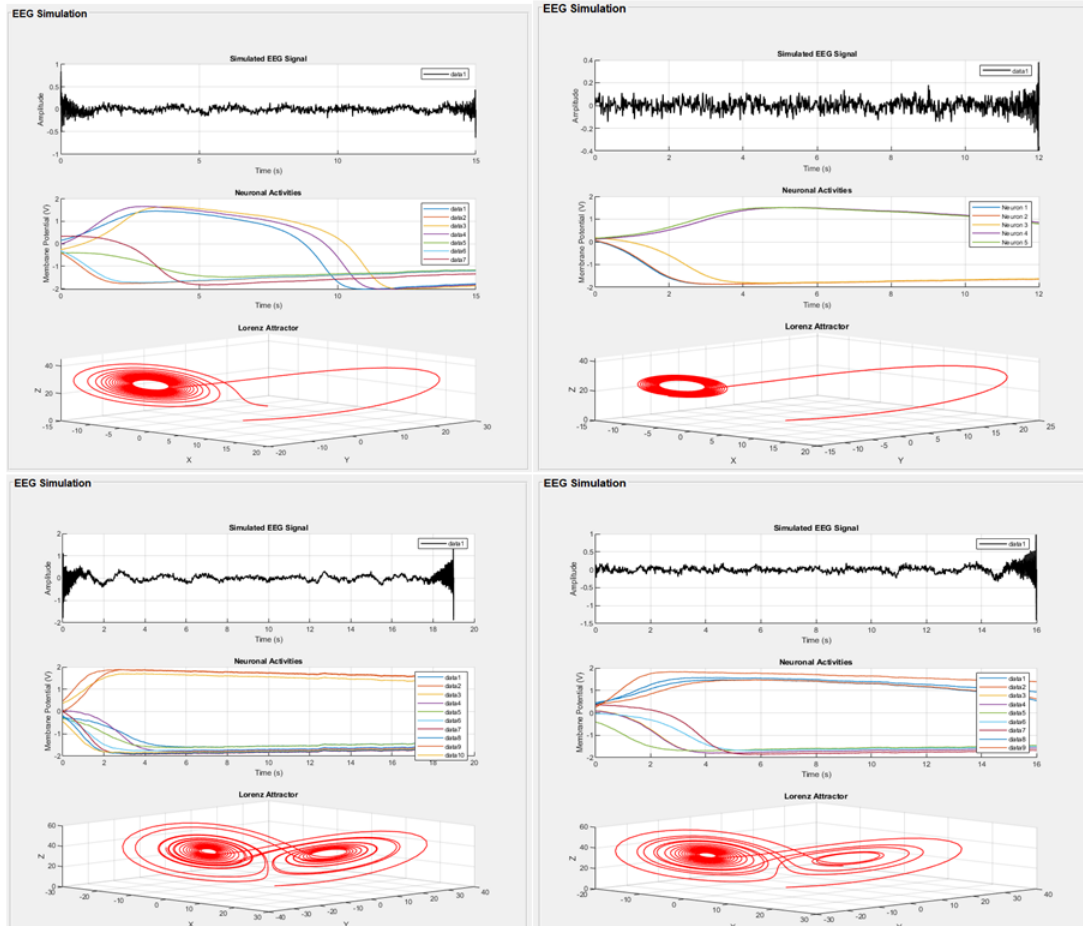


Figure 3 - (a) anxious cognitive processing $\epsilon = 0.1, a = 0.75, b = 0.85, g_{syn} = 0.15, \sigma = 10, \rho = 30.0, \beta = 2.667$; (b) drowsy state $\epsilon = 0.05, a = 0.6, b = 0.7, g_{syn} = 0.09, \sigma = 9.5, \rho = 25.0, \beta = 2.5$; (c) primary epileptic seizure $\epsilon = 0.02, a = 0.4, b = 0.6, g_{syn} = 0.3, \sigma = 10, \rho = 35.0, \beta = 3$; (d) absence $\epsilon = 0.03, a = 0.45, b = 0.65, g_{syn} = 0.25, \sigma = 10, \rho = 32.0, \beta = 2.9$

The presented MATLAB script implements a comprehensive system for processing and analyzing real electroencephalographic (EEG) data using an integrated computational model. The system supports the loading of EEG data in various formats (MAT, CSV, EDF), after which the signal amplitude is normalized to ensure the stability of the simulation, and the loaded data is stored as a time series with an appropriate sampling rate (Fig. 4).

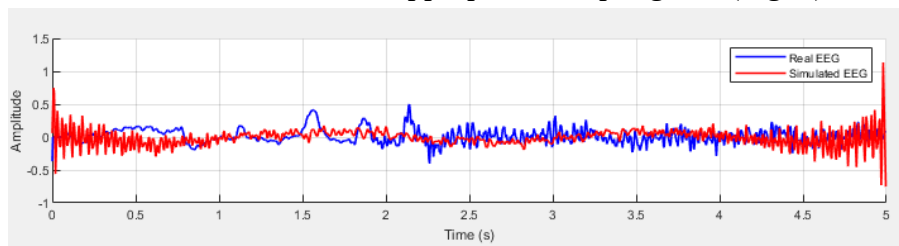


Figure 4 - Uploaded data compared to a synthetic signal without parameter optimization

Next, a comprehensive analysis of the EEG signal is performed, extracting significant characteristics in both the time domain (mean, standard deviation, variance, skewness, kurtosis, maximum and minimum values, signal range, median, interquartile range, median absolute deviation) and frequency domain (power in key EEG bands: delta, theta, alpha, beta, gamma; relative power in each band; ratio of powers between different bands), as well as non-linear characteristics such as approximate entropy to detect signal complexity and regularity.

To optimize the model parameters, a feed-forward neural network is used (Fig. 5), which has a multilayer architecture with two hidden layers (20 and 10 neurons, respectively), normalization of input characteristics and output parameters, a maximum number of training epochs of 1000, a minimum gradient of $1e-7$, a maximum number of validation runs without improvement of 20, and a data distribution of 70% for training, 15% for validation, 15% for testing. The process of generating training data for the neural network divides the input EEG data into separate segments, for each segment generates random combinations of model parameters in certain ranges, simulates the model with real EEG as an input signal, calculates the root mean square error between the simulated and real EEG, creates pairs of "EEG characteristics - optimal parameters" for training the neural network, and duplicates the best parameters in the data set to increase their significance.

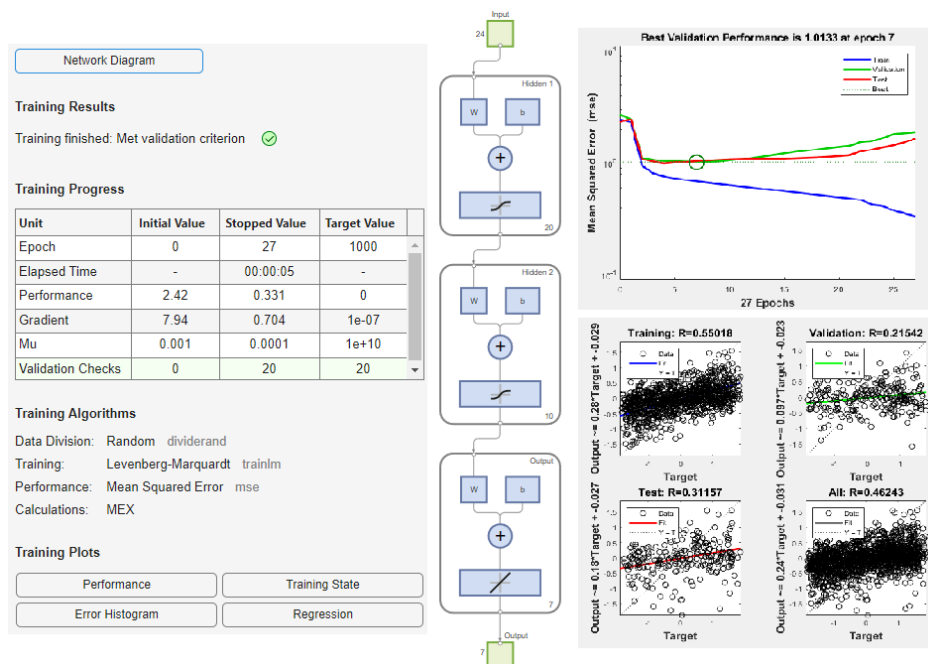


Figure 5 - Structure of the neural network

The next step is to use the trained neural network to predict the optimal model parameters based on the characteristics of the new EEG signal by extracting the characteristics, normalizing these characteristics using the parameters stored during training, passing the normalized characteristics through the neural network, denormalizing the output parameters to obtain real values, and generating a structure with the optimal model parameters. The neural network optimizes seven key parameters of the FHNL model: ϵ , α and β (define the dynamics of the neuron), g_{syn} (the strength of synaptic connection between neurons), and σ , ρ , β (parameters

of the Lorentz system that define chaotic dynamics). After optimizing the parameters, the system runs a simulation with the optimized parameters and evaluates the quality of the simulation through the root mean square error between the real and simulated EEG, correlation coefficient, and visual comparison on graphs, allowing you to export simulation results, model parameters, and quality metrics for further analysis and use (Fig. 6).

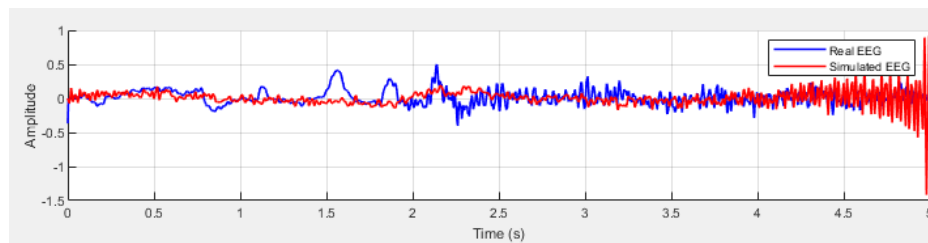


Figure 6 - Downloaded data with a synthetic signal after parameter optimization, $\epsilon = 0.396, a = 0.899, b = 0.1, g_{syn} = 0.094, \sigma = 20, \rho = 10, \beta = 5$

Thus, the presented script implements the full cycle of EEG data processing from downloading to optimized modeling using neural network technologies to automatically select the optimal parameters of the FHNL model, which allows to effectively simulate neural activity and reproduce real EEG signals with a certain accuracy and correspondence to the original data.

Conclusions. 1. This paper presents a new approach to modeling EEG signals using a hybrid FitzHugh-Nagumo-Lorenz model and parameter optimization based on machine learning. The developed model demonstrates a high ability to reproduce the characteristic features of real EEG signals, while maintaining the biophysical basis and interpretability.

2. The proposed neural network approach to parameter optimization greatly simplifies and speeds up the process of model tuning for specific EEG data. An interactive software tool developed in MATLAB provides a user-friendly interface for researchers and clinicians.

3. The results indicate the potential of this approach for both basic neuroscientific research and clinical applications in the diagnosis and modeling of pathologies. Further research will be aimed at expanding the model's capabilities and adapting it for specific practical tasks.

4. The Lorentz system made it possible to take into account some dynamic aspects of the behavior of signals arising in the human cerebral cortex. Therefore, one of the next tasks will be to study a new hybrid model, the chaotic behavior of which will be set by the systems presented in the works [8, 9].

REFERENCES

1. Najafi, T., Jaafar, R., Remli, R., Zaidi, W. A. W., & Chellappan, K. (2022). A Computational Model to Determine Membrane Ionic Conductance Using Electroencephalography in Epilepsy. *Physical Sciences Forum*, 5(1), 45. <https://doi.org/10.3390/psf2022005045>.
2. Vo, K., Vishwanath, M., Srinivasan, R., Dutt, N., & Cao, H. (2022). Composing Graphical Models with Generative Adversarial Networks for EEG Signal Modeling. *ICASSP 2022 - 2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 1231–1235. <https://doi.org/10.1109/icassp43922.2022.9747783>.
3. Seo, H., & Jun, S. C. (2017). Multi-Scale computational models for electrical brain stimulation. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00515>.

4. Zhao, S., Li, W., Wang, X., Foglia, S., Tan, H., Zhang, B., Hamoodi, A., Nelson, A., & Gao, Z. (2024). A Systematic review of Machine learning methods for Multimodal EEG data in Clinical application. arXiv (Cornell University).
<https://doi.org/10.48550/arxiv.2501.08585>.
5. Basak, M., Maiti, D., & Das, D. (2024). EEG Innovations in Neurological Disorder Diagnostics: A Five-Year Review. Asian Journal of Research in Computer Science, 17(6), 226–249. <https://doi.org/10.9734/ajrcos/2024/v17i6470>.
6. Inkin O.A., Pogorelov O.V. (2024). OA, I., & OV, P. (2024). Modeliuvannia EEG za dopomohoiu hlybokykh neironnykh merezh [Modeling of EEG using deep neural networks]. System Technologies, 3(152), 57–68. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-152-2024-06> [in Ukrainian].
7. Belozyorov V. Y., Inkin O. A. (2023). Systems of singular differential equations as the basis for neural network modeling of chaotic processes. Journal of Optimization, Differential Equations and Their Applications, 31(2), 24. <https://doi.org/10.15421/142309>.
8. Belozyorov, V. Y. (2016). A novel search method of chaotic autonomous quadratic dynamical systems without equilibrium points. Nonlinear Dynamics, 86(2), 835–860. <https://doi.org/10.1007/s11071-016-2927-6>.
9. Belozyorov, V.Y. (2018). On novel conditions of chaotic attractors existence in autonomous polynomial dynamical systems. Nonlinear Dynamics, 91, 2435-2452.

Received 02.04.2025.

Accepted 04.04.2025.

Гібридне моделювання ЕЕГ: модель Фіцхью-Нагумо-Лоренца

У статті представлено новий метод моделювання електроенцефалографічних (ЕЕГ) сигналів за допомогою гібридної біофізичної моделі, яка поєднує динаміку Фіцхью-Нагумо з хаотичною системою Лоренца. Розроблено комплексний підхід до оптимізації параметрів моделі на основі нейронних мереж, що дозволяє автоматично налаштовувати параметри для максимальної відповідності реальним ЕЕГ даним. Запропонована модель демонструє здатність відтворювати характерні особливості сигналів ЕЕГ, включаючи основні ритми та відповідні спектральні характеристики. Інтерактивний програмний інструмент, розроблений в середовищі MATLAB, забезпечує зручний інтерфейс для дослідників та клініцистів. Отримані результати свідчать про потенціал цього підходу як для фундаментальних нейронаукових досліджень, так і для клінічного застосування в діагностиці та моделюванні нейропатологій.

Ключові слова: ЕЕГ, FHN, FHNL, система Лоренца, нейронна мережа, моделювання, оптимізація параметрів, MATLAB.

Білозьоров Василь Євгенович - доктор фізико-математичних наук, професор кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Інкін Олександр Андрійович – аспірант, кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Belozyorov Vasily - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of computer Technologies, Oles Honchar Dnipro National University.

Inkin Oleksandr – postgraduate student, department of computer technologies, Oles Honchar Dnipro National University.

А.І. Гуда, О.П. Іванов, В.І. Шинкаренко, О.І. Саблін

АТРИБУТИВНЕ НАСИЧЕННЯ КОНСТРУКТИВНО-ПРОДУКЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ДІЛЯНКИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Анотація. Раніш розроблена загальна конструктивно-продукційна модель ділянки електропостачання тяги постійного струму збагачується інформацією значень атрибуту складових елементів. У залежності від того яким чином інтерпретується модель засобами алгоритмічного конструктора формуються різні конструктивні системи. Одна з них призначена для випадкового визначення значень атрибуту електроустаткування та поїзної ситуації з множини потенційно можливих з метою формування різних варіантів за якими приймає рішення експерт щодо використання енергії рекуперації. На основі експертних даних у подальшому буде формуватись система керування за нечіткою логікою. Друга – для збору інформації щодо стану електрообладнання та поїзної ситуації з реальних об'єктів для керування розподілом електроенергії у автоматичному режимі. Цей підхід продемонстровано на прикладі сформованої схеми лінійної ділянки електропостачання з трьома підстанціями.

Ключові слова: конструктивно-продукційне моделювання, тяга постійного струму, формальні граматики, конструктор, програмне забезпечення, інформаційні технології.

Вступ. Дана робота виконана у конструктивній парадигмі сприйняття світу людиною і відповідного підходу до програмування (основи якої закладені у [1, 2]).

Основні положення конструктивної парадигми [3]:

- світ сприймається як сукупність конструкцій і конструктивних процесів;
- конструкції складаються з деяких елементів і інших конструкцій;
- конструктивний процес складається з елементарних дій (дискретних або неперервних, детермінованих або стохастичних і т.і.) та інших процесів;
- елементи, конструкції, проміжні форми конструювання пов'язані між собою деякими відношеннями зв'язування;
- елементи конструкцій, проміжні форми конструювання, конструкції, відношення та операції – кожен має свій набір атрибутів;
- при формуванні конструкцій використовується тріада: відношення $\rightarrow$ операція $\rightarrow$ відношення.

Щодо останнього положення:

– у алгебрі, наприклад цілих чисел з заданою операцією додавання, запис «5+7» сприймається як відношення: треба скласти 5 і 7, в результаті операції складання отримаємо результат 12. Тобто за відношенням виконується операція в результаті якої зникає інформація про початкові складові;

– у конструктивній парадигмі, наприклад при виробництві авто дверцята слід причепити до корпусу. Маємо тріаду: відношення (слід причепити) → операція (причеплення) → відношення (причеплено). У результаті операції залишаються всі аргументи (елементи) з новим відношенням.

Дана робота є продовженням роботи [4] і направлена на використання можливостей часткового відновлення витраченої на тягу енергії шляхом її рекуперації, що дозволяє зменшити споживання енергії на перевезення за різними оцінками на 10...40 % [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Щодо конструктивного підходу (інструментарію). За метою використання конструктори поділяють на [3]:

- породжуючі, які заданими правилами виконують формування конструкцій (однієї або декількох) або конструктивних процесів;
- трансформуючі, які за однією конструкцією (її моделлю) формують іншу. Наприклад, програму у кодах процесору у конструктивний процес її виконання;
- аналізуючі, які виконують аналіз конструкцій. Наприклад, перевіряти чи може конструкція бути сформована за наявними правилами (наприклад, у трансляторах);
- оптимізуючі/адаптуючі, які здатні змінювати структуру конструкції (складові, їх порядок та зв'язки);
- алгоритмічні – в поєднанні з іншими конструкторами створюють конструктивну систему: модель елементів, проміжних форм і можливих операцій над ними поєднується з моделлю внутрішнього виконавця, який вміє виконувати всі операції.

У даній роботі запропонований новий вид конструктору – збагачувач, який дозволяє наситити інформацією сформовану породжуючим конструктором конструкцію для подальшого аналізу або використання.

Щодо задачі енергоефективності (прикладної задачі). Згідно з останніми дослідженнями, впровадження сучасних систем регенеративного гальмування значно підвищує ефективність роботи електричних залізничних транспортних систем [6].

Відновлення та зберігання значної частини енергії, втраченої під час гальмування, набувають особливої важливості. Розвиток технологій зберігання енергії, таких як батареї та суперконденсатори, дозволяє ефективніше використовувати регенеративну енергію, що в свою чергу покращує екологічну стійкість залізничного транспорту [7].

Рекуперативна енергія є суттєвою для підвищення енергоефективності, екологічності та безпеки високошвидкісних залізниць. Інноваційні підходи до управління енергією дозволяють значно зменшити витрати на електроенергію та знизити викиди

парникових газів, роблячи залізничний транспорт більш екологічно чистим та енергоефективним [8, 9].

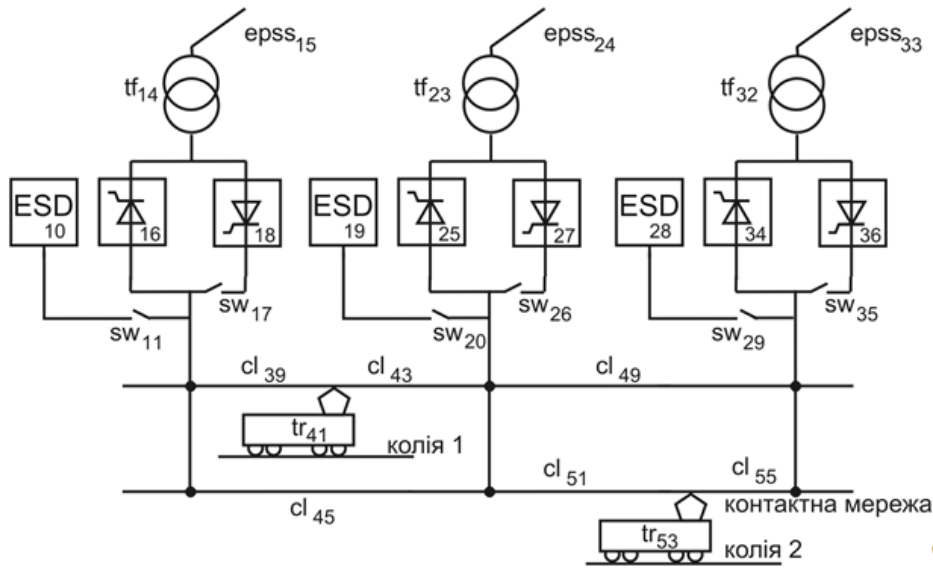


Рисунок 1 – Структурна схема ділянки електропостачання

1. Викладення основного матеріалу

1. Постановка задачі. У попередній роботі [4] представлена конструктивно-продукційна модель ділянки системи електропостачання тяги постійного струму.

Як приклад, сформована схема двоколіїної ділянки з двома потягами як на рис. 1. Одночасно сформована сентенційна форма:

$$l = ((esd_{10} \cdot sw_{11} \times (cr_{16} : (sw_{17} \cdot aci_{18}))) \cdot tf_{14} \cdot epss_{15}) \cdot (cl_{39} \cdot tr_{41} \cdot cl_{43}) : (cl_{45}) \cdot$$

$$(((esd_{19} \cdot sw_{20} \times (cr_{25} : (sw_{26} \cdot aci_{27}))) \cdot tf_{23} \cdot epss_{24}) \times (cl_{49} : (cl_{51} \cdot tr_{53} \cdot cl_{55}) \cdot$$

$$((esd_{28} \cdot sw_{29} \times (cr_{34} : (sw_{35} \cdot aci_{36}))) \cdot tf_{32} \cdot epss_{33}))). \quad (1)$$

Позначки до рис. 1 та сентенційної форми l (термінали алфавіту T_1 конструктору C_{ZE} [4]) з відповідною атрибутикою:

- $_{U_{ES}} epss$ – зовнішня система електропостачання з атрибутом U_{ES} – рівень вхідної напруги первинної мережі;
- $_{\eta, k, U_{in}, U_{out}} tf$ – понижуючий трансформатор з атрибутами η – к.к.д., k – коефіцієнт трансформації, U_{in} , U_{out} – вхідна та вихідна напруга;
- $_{\eta, U_{in}, U_{out}} cr$ – випрямляч з відповідними атрибутами;
- $_{\eta, U_{in}, U_{out}} aci$ – інвертор;
- $_{\eta, W, W_{max}, V} esd$ – накопичувач електроенергії з атрибутами: W – поточний рівень заряду накопичувача, W_{max} – максимальна енергетична ємність, V – швидкість енергообміну (заряду/розряду), η – коефіцієнт ефективності зберігання енергії;

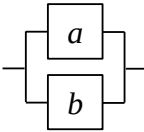
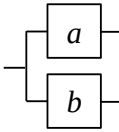
- $\rho, L, \bar{X}, n$ cl - тягова мережа з атрибутами: L – довжина ділянки, ρ – питомий опір мережі, $\bar{X}$ - вектор розмірності n , визначає положення перемичок на багатоколійних ділянках;
- v, l, P tr електрорухомий склад з атрибутами v – режим руху, l – положення на міжпідстанційній зоні, P – потужність яка споживається або виділяється;
- $\eta, U_{in}, U_{out}, \bar{U}, n$ rn – регулятор напруги випрямляча, $\bar{U}$ – вектор розмірності n , кожен елемент якого u_i – регульовані рівні вихідної напруги;
- pp, pt, tpt sw – перемикач, pp – постійне положення перемикача, pt – тимчасове положення на час tpt .

Крім зазначених вище атрибутів, всі термінали мають ідентифікуючий атрибут id , який позначається індексом терміналу або не терміналу і дозволяє однозначно визначити конкретне обладнання системи електропостачання.

Відношення зв'язування у сентенційній формі l задають послідовне і паралельне з'єднання елементів електричного кола (табл. 1)

Таблиця 1

Відповідність позначок відношень та структурних схем

Відношення	$a \cdot b$	$a : b$	$a \times b$
Структурна схема			

У даному дослідженні поставлена задача розробки конструктивних систем двох призначень: імітування інформації щодо стану електроустаткування та поїзної ситуації та відповідних експертних висновків щодо використання енергії рекуперації; автоматизованої системи керування розподілом потоків енергії рекуперації.

2. Спеціалізація конструктору атрибутивного насичення моделі ділянки електропостачання. Визначимо спеціалізацію конструктору – моделі (структурної схеми) системи тягового електропостачання:

$$C_{ZE} \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_{ZE} \rangle [4] \text{ та модифікації його } \tilde{C}_{ZE} \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_{ZE} \rangle, \quad (2)$$

де $\Lambda_{ZE} = \Lambda \cup \Lambda_1 \cup \Lambda_2$, $\Lambda_1 = \{M_{ZE} \supset T_1 \cup N_1$, $\Sigma_{ZE} = \{\Xi, \Theta, \Phi\}$, $\Xi = \{^2, :^2, \times^2\}$, $\Phi = \{:=^1, +^2, >^2, \uparrow^n, \downarrow^n, \updownarrow^n\}$, $\Theta = \{\Rightarrow, \mid\Rightarrow, \parallel\Rightarrow\}$, множини: Ξ – відносин (і відповідних операцій) зв'язування елементів конструкцій, Φ – операцій над атрибутами, Θ – операцій виведення, T_1, N_1 – терміналів та нетерміналів, Λ – інформаційне забезпечення конструювання (ІЗК) узагальненого конструктора.

Модифікований конструктор $\tilde{C}_{ZE}$ вирізняється від C_{ZE} множиною операцій над атрибутами $\Phi = \{:=^1, +^2, >^2, \uparrow^n, \downarrow^n, \updownarrow^n\}$.

ІЗК Λ_2 містить визначення, доповнення та обмеження, які уточнюють алфавіт, атрибути носія, відношення підстановки, задають особливості виконання операцій підстановки та виведення.

Правилами підстановки мають вигляд $\psi_r : \langle s_r, g_r = \langle g_{1,r}, g_{2,r} \rangle \rangle \in \Psi$, де s_r – набір альтернативних відношень підстановки, g_r – набір операцій над атрибутами які виконуються до операції підстановки ($g_{1,r}$) та після неї ($g_{2,r}$).

Відношення підстановки $\eta \rightarrow$ має атрибут доступності: якщо $\eta = true$ – відношення доступне для використання, в іншому випадку – ні.

Термінальним алфавітом T_1 є множина елементів системи тягового енергопостачання, споживання та перетворення електроенергії в мережі постійного струму залізниць, трамвайних та тролейбусних ліній та метрополітенів з їх суттєвими для цього завдання властивостями – атрибутами. Елементи будемо позначати малими латинськими символами, наприклад, a термінал a з атрибутом x , $x \dashv a$ атрибут x терміналу a .

Операції над атрибутами: $:=(a, b)$ – присвоєння значення b змінній a ; $+(a, b, c)$ – присвоєння суми значень b і c змінній a , $>(a, b, c)$ – присвоєння a значення $true$ якщо $b > c$ і $false$ в іншому випадку; $\uparrow(a, b, \dots)$, $\downarrow(a, b, \dots)$, $\updownarrow(a, b, \dots)$ введення виведення значень атрибутів відповідно.

Конкретизація конструктивно-продукційної структури полягає у розширенні аксіоматики множиною конкретних правил продукцій та завданні конкретних множин терміналів та нетерміналів:

$$\tilde{C}_{ZE} = \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_3, Z \rangle_K \mapsto \tilde{C}_{ZEK} = \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_3 \rangle, \quad (3)$$

де $\Lambda_3 = \Lambda_{ZE} \cup \Lambda_4$.

ІЗК Λ_4 містить наступні доповнення.

Нетермінальний алфавіт N_1 складається із допоміжних елементів $N_1 = \{\sigma, \alpha, \beta, \gamma\}$. Початковий нетермінал – σ .

ІЗК Λ_4 містить п правила продукції.

Перше правило містить відношення, що надає можливість експерту отримати екранну форму з зображенням схеми та можливістю введення експертних висновків:

$$\psi_1 = \langle s_1 = \langle \sigma \rightarrow \alpha \rangle, g_{1,1} = \varepsilon, g_{1,2} = \langle \uparrow(Sc), :=(i, 1), :=(m, 1) \rangle \rangle, \quad (4)$$

При розборі форми l друге правило призначено для пропуску з'єднуючих символів:

$$\psi_2 = \left\langle s_2 = \langle \alpha \rightarrow (\alpha \mid \alpha \rightarrow) \alpha \mid \alpha \rightarrow \cdot \alpha \mid \alpha \rightarrow : \alpha, \mid \alpha \rightarrow \times \alpha, \mid \rangle, g_{2,1} = \varepsilon, g_{2,2} = \varepsilon \right\rangle, \quad (5)$$

Правила $\psi_3 \dots \psi_{10}$ призначені для збору інформації щодо стану конкретного електричного обладнання ділянки та поїзної ситуації ($\otimes$ – позначення будь якої операції зв'язування у сенсентіальній формі l):

$$\psi_3 = \langle s_3 = \langle \alpha \rightarrow epss_i \otimes \alpha \rangle, g_{3,2} = \varepsilon, g_{3,2} = \langle \uparrow (U_{ES} \downarrow epss_i), + (i, i, 1) \rangle \rangle, \quad (6)$$

$$\psi_4 = \left\langle s_4 = \langle \alpha \rightarrow tf_i \otimes \alpha \rangle, g_{4,1} = \varepsilon, \right. \\ \left. g_{4,2} = \langle \uparrow (\eta \downarrow tf_i, k \downarrow tf_i, U_{in} \downarrow tf_i, U_{out} \downarrow tf_i), + (i, i, 1) \rangle \right\rangle, \quad (7)$$

$$\psi_5 = \left\langle s_5 = \langle \alpha \rightarrow cr_i \otimes \alpha \rangle, g_{5,1} = \varepsilon, \right. \\ \left. g_{5,2} = \langle \uparrow (\eta \downarrow cr_i, U_{in} \downarrow cr_i, U_{out} \downarrow cr_i), + (i, i, 1) \rangle \right\rangle, \quad (8)$$

$$\psi_6 = \left\langle s_6 = \langle \alpha \rightarrow aci_i \otimes \alpha \rangle, g_{6,1} = \varepsilon, \right. \\ \left. g_{6,2} = \langle \uparrow (\eta \downarrow aci_i, U_{in} \downarrow aci_i, U_{out} \downarrow aci_i), + (i, i, 1) \rangle \right\rangle, \quad (9)$$

$$\psi_7 = \left\langle s_7 = \langle \alpha \rightarrow esd_i \otimes \alpha \rangle, g_{7,1} = \varepsilon, \right. \\ \left. g_{7,2} = \langle \uparrow (\eta \downarrow esd_i, W \downarrow esd_i, W_{max} \downarrow esd_i, V \downarrow esd_i), + (i, i, 1) \rangle \right\rangle, \quad (10)$$

$$\psi_8 = \left\langle s_8 = \langle \alpha \rightarrow cl_i \otimes \alpha \rangle, g_{8,1} = \varepsilon, \right. \\ \left. g_{8,2} = \langle \uparrow (\rho \downarrow cl_i, L \downarrow cl_i, \bar{X} \downarrow cl_i, n \downarrow cl_i), + (i, i, 1) \rangle \right\rangle, \quad (11)$$

$$\psi_9 = \left\langle s_9 = \langle \alpha \rightarrow tr_i \otimes \alpha \rangle, g_{9,1} = \varepsilon, \right. \\ \left. g_{9,2} = \langle \uparrow (v \downarrow tr_i, l \downarrow tr_i, P \downarrow tr_i), + (i, i, 1) \rangle \right\rangle, \quad (12)$$

$$\psi_{10} = \left\langle s_{10} = \langle \alpha \rightarrow rn_i \otimes \alpha \rangle, g_{10,1} = \varepsilon, \right. \\ \left. g_{10,2} = \langle \uparrow (\eta \downarrow rn_i, U_{in} \downarrow rn_i, U_{out} \downarrow rn_i, \bar{U} \downarrow rn_i, n \downarrow rn_i), + (i, i, 1) \rangle \right\rangle, \quad (13)$$

$$\psi_{11} = \left\langle s_{11} = \langle \alpha \rightarrow sw_i \otimes \alpha \rangle, g_{11,1} = \varepsilon, \right. \\ \left. g_{11,2} = \langle \uparrow (pp \downarrow sw_i, pt \downarrow sw_i, tpt \downarrow sw_i), + (i, i, 1) \rangle \right\rangle, \quad (14)$$

Перевірка закінчення розбору сенсентіальної форми l для визначення значень атрибутів:

$$\psi_{12} = \left\langle s_{12} = \langle \alpha_{\eta_i} \rightarrow \beta \rangle, g_{12,2} = \langle := (k, 2), := (i, 1) \rangle \right. \\ \left. g_{12,1} = \langle = (b, k, 1), > (\eta_1, i, N), \& (\eta_1, \eta_1, b) \rangle \right\rangle, \quad (15)$$

Правила $\psi_{13} \dots \psi_{15}$ призначені для визначення керуючих дій для раціонального використання енергії рекуперації:

$$\psi_{13} = \left\langle s_{13} = \left\langle \begin{array}{l} \beta \rightarrow epss_i \cdot \beta \mid \beta \rightarrow tf_i \cdot \beta \mid \beta \rightarrow cr_i \cdot \beta \mid \\ \beta \rightarrow aci_i \cdot \beta \mid \beta \rightarrow esd_i \cdot \beta, \mid \beta \rightarrow cl_i \cdot \beta, \mid \\ \beta \rightarrow tr_i \cdot \beta, \mid \beta \rightarrow cl_i \cdot \beta, \mid \beta \rightarrow rn_i \cdot \beta \end{array} \right\rangle \right. \\ \left. g_{13,1} = \varepsilon, g_{13,2} = \langle + (i, i, 1) \rangle \right\rangle, \quad (16)$$

$$\psi_{14} = \left\langle s_{14} = \langle \beta \rightarrow (\beta \mid \beta \rightarrow) \beta \mid \beta \rightarrow \cdot \beta \mid \beta \rightarrow \times \beta, \mid \rangle, \right. \\ \left. g_{14,1} = \varepsilon, g_{14,2} = \varepsilon \right\rangle, \quad (17)$$

$$\psi_{15} = \left\langle s_{15} = \langle \beta \rightarrow sw_i \otimes \beta \rangle, g_{15,1} = \varepsilon, \right. \\ \left. g_{15,2} = \langle \downarrow (pp \dashv sw_i, pt \dashv sw_i, tpt \dashv sw_i), +(i, i, 1), +(m, m, 1) \rangle \right\rangle, \quad (18)$$

Перевірка закінчення розбору сентенціальної форми l для отримання запропонованих експертом рішень:

$$\psi_{16} = \left\langle s_{16} = \langle \beta_{\eta_2} \rightarrow \gamma \rangle, g_{16,1} = \langle = (b, k, 1), > (\eta_2, i, N), \& (\eta_2, \eta_2, b) \rangle, \right. \\ \left. g_{16,2} = \langle := (k, 1), := (i, 1) \rangle \right\rangle, \quad (19)$$

Формування циклу збору інформації та керуючих дій:

$$\psi_{17} = \left\langle s_{17} = \langle \gamma_{\eta_3} \rightarrow \alpha \rangle, g_{17,1} = \langle > (\eta_3, m, M) \rangle, g_{17,2} = \varepsilon \right\rangle, \quad (20)$$

3. Визначення алгоритмічних конструкторів. Алгоритмічний конструктор [2]:

$$C_A = \langle M_A, \Sigma_A, \Lambda_A \rangle, \quad (21)$$

вирізняється від інших тим, що носій M_A включає алгоритми та множини їх вхідних та вихідних даних – $M_A \supset \{A_i \mid_{X_i}^{Y_i}\} \cup (\bigcup_{A_i^0 \in V_A} (X(A_i) \cup Y(A_i)))$, де $A \mid_X^Y$ – деякий алгоритм (ідентифікований як A) з набором вхідних (X) та вихідних (Y) даних. M_A обов'язково включає базові алгоритми A_1^0 та A_2^0 які реалізують операції Σ_A та деякі сконструйовані алгоритми $A_i \mid_{X_i}^{Y_i}$.

Визначимо два алгоритмічні конструктори $C_{A,1} = \langle M_{A,1}, \Sigma_A, \Lambda_{A,1} \rangle$ та $C_{A,2} = \langle M_{A,2}, \Sigma_A, \Lambda_{A,2} \rangle$.

ІЗК $\Lambda_{A,1}$ включає аксіоматику узагальненого алгоритмічного [1, 2] конструктора та визначає семантику алгоритмів з $M_{A,1}$:

– $A_1^0 \mid_{A_i, A_j}^{A_i \cdot A_j}$ – композиція алгоритмів, послідовне виконання алгоритму A_j після алгоритму A_i ;

– $A_2^0 \mid_Z^{A_i}$ – умовне виконання: алгоритм A_i виконується якщо умова Z true;

– $A_3 \mid_{l_h, l_q, f_i}^{f_i}$ – реалізує операцію підстановки: згідно відношення підстановки $l_h \rightarrow l_q$ у поточній сентенціальній формі f_i виконує заміну l_h на l_q ;

– $A_4 \mid_{f_i, \Psi}^{f_j}$, $A_5 \mid_{\sigma, \Psi}^{\bar{\Omega}}$ – алгоритми які реалізують операції часткового та повного виводу, тут f_i, f_j – форми, σ – аксіома, Ψ – множина правил підстановки; $\bar{\Omega}$ – множина сформованих конструкцій;

а також алгоритми що реалізують операції над атрибутами:

- $A_6|_b^a$ – присвоєння;
- $A_7|_{b,c}^a$ – визначення суми чисел;
- $A_8|_{b,c}^a$ – порівняння на більше;
- $A_9|_{a,b \dots}^{\text{зображення на екранній формі}}$ – реалізація операції « $\uparrow$ »: формується і виводиться

екранна форма з зображенням електричної схеми і полями для вводу/виводу значень атрибутів;

- $A_{10}|_{a,b \dots}^{a,b \dots \text{у базі даних}}$ – реалізація операції « $\updownarrow$ »: випадковим чином визначаються

і виводиться на екранну форму та у базу даних значення атрибутів;

- $A_{11}|_{a,b \dots}^{a,b \dots \text{у базі даних}}$ реалізація операції « $\downarrow$ »: визначені експертом керування

зберігаються у базі даних.

Другий алгоритмічний конструктор $C_{A,2} = \langle M_{A,2}, \Sigma_A, \Lambda_{A,2} \rangle$ призначений для дистанційного збору інформації щодо стану електроустаткування та поїзної ситуації ділянки електропостачання постійного струму та автоматизованого керування розподілом енергії рекуперації. Він вирізняється від першого лише деякими алгоритмами, а саме:

- $A_9|_{a,b \dots}$ – пустий алгоритм;
- $A_{10}|_{a,b \dots}^{a,b \dots}$ – реалізація операції « $\updownarrow$ »: отримання вимірних значень показників роботи електроустаткування та поїзної ситуації;
- $A_{11}|_{a,b \dots}^{a,b \dots}$ реалізація операції « $\downarrow$ »: передача визначеного керування на засоби

керування.

4. Системи конструювання – інтерпретація конструктору

$\tilde{C}_{ZEK} = \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_3 \rangle$. У результаті інтерпретації конструктору отримуємо систему конструювання яка поєднує модель засобів конструювання і внутрішнього виконавця у вигляді алгоритмічного конструктора.

Перша конструктивна система здатна формалізувати знання експерта щодо розподілу енергії рекуперації на деякій ділянці енергозабезпечення:

$$\langle \tilde{C}_{ZEK} = \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_3 \rangle, C_{A,1} = \langle M_{A,1}, \Sigma_A, \Lambda_{A,1} \rangle \rangle_I \mapsto \tilde{C}_{ZEKI,1} = \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_5 \rangle, \quad (22)$$

де $\Lambda_5 = \Lambda_3 \cup \Lambda_{A,1} \cup \Lambda_6$, у свою чергу ІЗК Λ_6 встановлює відповідність операціям (у якості їх атрибутів) алгоритмів алгоритмічного конструктора:

$$\begin{aligned}
 \Lambda_6 = & \{(A_3 \mid_{l_h, l_q, f_i}^f \dashv \Rightarrow), (A_4 \mid_{f_i, \Psi}^f \dashv \Rightarrow), \\
 & (A_5 \mid_{\sigma, \Psi}^{\bar{\Omega}} \dashv \Rightarrow), (A_6 \mid_b^a \dashv :=), \\
 & (A_6 \mid_b^a \dashv :=), (A_7 \mid_{b,c}^a \dashv +), \\
 & (A_8 \mid_{b,c}^a \dashv >), \\
 & (A_8 \mid_{b,c}^a \dashv >), \\
 & A_9 \mid_{a,b \dots}^{\text{зображення на екранній формі}} \dashv \uparrow), \\
 & (A_{10} \mid_{a,b \dots}^{a,b \dots \text{у базі даних}} \dashv \updownarrow), \\
 & (A_{11} \mid_{a,b \dots}^{a,b \dots \text{у базі даних}} \dashv \downarrow)\}.
 \end{aligned} \tag{23}$$

Приклад реалізації цієї конструктивної системи наведено у таблицях 2 і 3.

Таблиця 2

Інформація для прийняття рішення (приклад)

esd_{10}				sw_{11}			tf_{14}				$epss_{15}$	
η , в.о.	W , МДж	$W_{\max}$, МДж	V , МДж/с	pp	pt	tpt , с	η , в.о.	k , в.о.	U_{in} , кВ	U_{out} , кВ	U_{ES} , кВ	
0,88	12	30	0,07	off	on	120	0,89	1,5	6	3,0	3,3	
0,87	10	30	0,13	off	on	150	0,9	10	35	3,5	3,3	
0,86	28	30	—	off			0,92	30	110	3,8	3,3	
aci_{16}			sw_{17}			cr_{18}			esd_{19}			
η , в.о.	U_{in} , кВ	U_{out} , кВ	pp	pt	tpt , с	η , в.о.	U_{in} , кВ	U_{out} , кВ	η , в.о.	W , МДж	$W_{\max}$, МДж	
0,89	2,8	3,8	off	on	20	0,89	2,95	2,8	0,88	47	50	
0,89	3,9	3,9	off	on	50	0,89	3,5	3,9	0,86	20	50	
0,88	3,6	3,7	off			0,89	3,8	3,6	0,89	40	50	
esd_{19}		sw_{20}			tf_{23}				$epss_{24}$	aci_{25}		
V , МДж/с		pp	pt	tpt , с	η , в.о.	k , в.о.	U_{in} , кВ	U_{out} , кВ	U_{ES} , кВ	η , в.о.	U_{in} , кВ	U_{out} , кВ
		off			0,89	1,5	110	3,5	3,3	0,88	3,6	3,5
0,16		off	on	180	0,9	10	35	3,5	3,3	0,87	3,8	3,7
0,33		off	on	30	0,92	30	110	3,7	3,4	0,85	3,9	3,8
sw_{26}			cr_{27}			esd_{28}				sw_{29}		
pp	pt	tpt , с	η , в.о.	U_{in} , кВ	U_{out} , кВ	η , в.о.	W , МДж	$W_{\max}$, МДж	V , МДж/с	pp	pt	

		с	в.о.	кВ	, кВ	в.о.	МДж	МДж	/с		
on			0,89	3,4	3,3	0,8	5	30	0,16	off	on
on			0,87	3,4	3,2	0,88	25	30	50	off	
on	off	190	0,9	3,3	3,3	0,87	10	30	0,67	off	on
sw_{29}	tf_{32}				$epss_{33}$	aci_{34}			sw_{35}		
tpt , с	η , в.о.	k , в.о.	U_{in} , кВ	U_{out} , кВ	U_{ES} , кВ	η , в.о.	U_{in} , кВ	U_{out} , кВ	pp	pt	tpt , с
150	0,89	32	110	3,4	3,4	0,88	3,8	3,9	on	off	50
	0,89	66	220	3,5	3,3	0,89	3,9	4,0	on	off	90
30	0,88	11	35	3,3	3,2	0,9	3,6	3,7	on		
cr_{36}			cl_{39}					tr_{41}			cl_{45}
η , в.о.	U_{in} , кВ	U_{out} , кВ	ρ , Ом/км	L , км	n	x_1 , км	x_2 , км	ν	l , км	P , МВт	ρ , Ом/км
0,9	3,4	3,3	0,057	15	2	6	8	рекуп.	8	2,5	0,057
0,88	3,5	3,4	0,057	18	2	4	10	тяга	10	0,8	0,057
0,89	3,3	3,2	0,057	14	2	8	6	тяга	6	1,5	0,057
cl_{45}				cl_{49}					cl_{51}		
L , км	n	x_1 , км	x_2 , км	ρ , Ом/км	L , км	n	x_1 , км	x_2 , км	ρ , Ом/км	L , км	n
15	off	4	8	0,059	17	2	4	8	0,057	15	1
18	off	4	8	0,06	19	1	2		0,057	15	1
14	off	4	8	0,057	15	1	2		0,057	15	1
cl_{51}			tr_{53}			cl_{55}					
x_1 , км	x_2 , км	ν	l , км	P , МВт	ρ , Ом/км	L , км	n	x_1 , км	x_2 , км		
1		тяга	10	1,7	0,058	15	1	2			
2		рек.	2	0,8	0,058	15	1	2			
2		рек.	4	1,1	0,059	12	2	4	6		

Рекомендації експерта (приклад)

№ п/п	sw_{11}			sw_{17}			sw_{20}		
	pp	pt	tpt, c	pp	pt	tpt, c	pp	pt	tpt, c
1	off	on	120	off	on	20	off		
2	off	on	150	off	on	50	off	on	180
3	off			off			off	on	30
	sw_{26}			sw_{29}			sw_{35}		
	pp	pt	tpt, c	pp	pt	tpt, c	pp	pt	tpt, c
1	on			off	on	150	on	off	50
2	on			off			on	off	90
3	on	off	190	off	on	30	on		

Друга конструктивна система моделює реальну систему розподілу енергії рекуперації на деякій ділянці енергозабезпечення:

$$\langle \tilde{C}_{ZEK} = \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_3 \rangle, C_{A,2} = \langle M_{A,1}, \Sigma_A, \Lambda_{A,2} \rangle \rangle_I \mapsto \tilde{C}_{ZEK,1} = \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_7 \rangle, \quad (22)$$

де $\Lambda_7 = \Lambda_3 \cup \Lambda_{A,2} \cup \Lambda_6$.

Цим показано як у теорії конструктивно-продукційного моделювання зміна інтерпретації кардинально змінює функціональність системи.

5. Обговорення результатів. У попередній статті [4] представлена модель яка дозволяє формувати множину потенційно можливих схем ділянок системи електропостачання. Ця стаття є її продовженням. Тут представлені конструкторі які дозволяють:

- наповнити моделі представлені у [4] значеннями атрибутики і рішеннями експерта щодо розподілу енергії рекуперації;
- керувати станом електроустаткування у реальній системі електропостачання ділянки електропостачання постійного струму для ефективного розподілу енергії рекуперації.

Залишається питання яким чином формується саме керування. Ця задача на основі керування з нечіткою логікою буде розглянута у наступній статті.

Висновки. Одним із основних напрямків розвитку економіки України є енергозбереження, що пов'язано зі складною ситуацією на ринку енергоносіїв.

Рациональне використання енергії рекуперації на підставі використання моделей на сучасних принципах дозволяє значно заощаджувати енергоресурси.

Представлені результати розширюють можливості конструктивно-продукційного моделювання у частині інформаційного наповнення атрибутики електроустаткування з метою подальшої автоматизації керування розподілом енергії рекуперації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Shynkarenko V.I. Constructive-Synthesizing Structures and Their Grammatical Interpretations. I. Generalized Formal Constructive-Synthesizing Structure / V.I. Shynkarenko, V. M. Ilman // Cybernetics and Systems Analysis, 50(3), 2014, 655-662. DOI: 10.1007/s10559-014-9655-z
2. Shynkarenko V.I. Structural Models of Algorithms in Problems of Applied Programming. I. Formal Algorithmic Structures / V.I. Shynkarenko, V.M. Ilman, V.V. Skalozub // Cybernetics and Systems Analysis, 45(3), 2009, 329-339. DOI : 10.1007/s10559-009-9118-0
3. Shynkarenko, V. Constructive-Synthesizing Modelling of Multifractals Based on Multi-constructors / V. Shynkarenko, R. Chyhir // 14th International Scientific and Practical Programming Conference, UkrPROG 2024, CEUR Workshop Proceedings. Vol.3806, pp. 75–88.
4. Шинкаренко В. І. Конструктивно-продукційне моделювання системи електропостачання тяги постійного струму / В.І. Шинкаренко, А.І. Гуда, О.І. Саблін, О.П. Іванов // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2024. – Випуск 6 (155). – С. 145-158. DOI : 10.34185/1562-9945-6-155-2024-14
5. Sablin O. Rational distribution of excess regenerative energy in electric transport systems on the basis of fuzzy logic application / O. Sablin, V. Kuznetsov, V. Shinkarenko, A. Ivanov // The archives of transport, 42(2), 2017, 7-17. DOI: 10.5604/01.3001.0010.0527
6. Khodaparastan M., Mohamed A.A., Brandauer W. Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 20(8), 2019, 2831–2847. DOI: 10.1109/TITS.2018.2886809
7. Chen J., Hu H., Ge Y., Wang K., Huang W., He Z. An Energy storage system for recycling regenerative braking energy in high-speed railway. IEEE Trans. Power Deliv. 36(1), 2021, 320–330. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.2980018
8. Deng W. et al. Back-to-back hybrid energy storage system of electric railway and its control method considering regenerative braking energy recovery and power quality improvement // Proceedings of the CSEE, –. 39(10), 2019, 2914-2924. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123263.
9. Hu H., Liu Y., Li Y. Traction power systems for electrified railways: evolution, state of the art, and future trends. Rail. Eng. Science 32, 2024, 1–19,. DOI: 10.1007/s40534-023-00320-6

REFERENCES

1. Shynkarenko V.I. Constructive-Synthesizing Structures and Their Grammatical Interpretations. I. Generalized Formal Constructive-Synthesizing Structure / V.I. Shynkarenko, V. M. Ilman // Cybernetics and Systems Analysis, 50(3), 2014, 655-662. DOI: 10.1007/s10559-014-9655-z
2. Shynkarenko V.I. Structural Models of Algorithms in Problems of Applied Programming. I. Formal Algorithmic Structures / V.I. Shynkarenko, V.M. Ilman, V.V. Skalozub // Cybernetics and Systems Analysis, 45(3), 2009, 329-339. DOI : 10.1007/s10559-009-9118-0
3. Shynkarenko, V. Constructive-Synthesizing Modelling of Multifractals Based on Multi-constructors / V.Shynkarenko, R.Chyhir // 14th International Scientific and Practical Programming Conference, UkrPROG 2024, CEUR Workshop Proceedings. Vol. 3806, pp. 75–88.

4. Shynkarenko V. I. Konstruktyvno-produktsiine modeliuвання systemy elektropostachania tiahы postiinoho strumu / V.I. Shynkarenko, A.I. Huda, O.I. Sablin, O.P. Ivanov // Systemni tekhnolohii. Rehionalnyi mizhvuzivskyi zbirnyk naukovykh prats. – 2024. – Vypusk 6 (155). – S. 145-158. [in Ukrainian] DOI : 10.34185/1562-9945-6-155-2024-14
5. Sablin O. Rational distribution of excess regenerative energy in electric transport systems on the basis of fuzzy logic application / O. Sablin, V. Kuznetsov, V. Shinkarenko, A. Ivanov // The archives of transport, 42(2), 2017, 7-17. DOI: 10.5604/01.3001.0010.0527
6. Khodaparastan M., Mohamed A.A., Brandauer W. Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 20(8), 2019, 2831–2847. DOI: 10.1109/TITS.2018.2886809
7. Chen J., Hu H., Ge Y., Wang K., Huang W., He Z. An Energy storage system for recycling regenerative braking energy in high-speed railway. IEEE Trans. Power Deliv. 36(1), 2021, 320–330. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.2980018
8. Deng W. et al. Back-to-back hybrid energy storage system of electric railway and its control method considering regenerative braking energy recovery and power quality improvement //Proceedings of the CSEE, –. 39(10), 2019, 2914-2924. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123263.
9. Hu H., Liu Y., Li Y. Traction power systems for electrified railways: evolution, state of the art, and future trends. Rail. Eng. Science 32, 2024, 1–19,. DOI: 10.1007/s40534-023-00320-6

Received 03.04.2025.

Accepted 07.04.2025.

Attribute saturation of the constructive-synthesizing model of the DC traction power supply system section

This article is one of three that collectively explore the solution to the problem of recuperative energy distribution for its rational use. The solution is achieved through constructive-production modeling, and the fundamental principles of this approach are outlined.

Building on the previous article, a general constructive-synthesizing model for the DC traction power supply section was introduced. This model tackles several challenges, including reducing electricity consumption in both railway and urban public electric transport systems. Its core objectives involve identifying the availability and specifications of traction substation equipment and optimizing the use of recuperation energy. Furthermore, it can address other issues related to the design of traction power supply systems. An illustrative example of a linear power supply section layout with three substations is also presented.

In the current article, additional attribute data of the constituent elements enriches the previously developed general constructive-production model of the DC traction power supply section. By interpreting the model through algorithmic constructor tools, various constructive systems can be formed. One such system is designed to randomly determine the attributes of electrical equipment and train scenarios from a set of potentially possible options. These alternatives are then evaluated by experts to inform decisions regarding the use of recuperation energy. Future development will focus on creating a fuzzy logic-based control system using this expert data. Another system is aimed at collecting real-world data on the state of electri-

cal equipment and train scenarios to enable automated energy distribution management. The approach is exemplified by a developed scheme of a linear power supply section featuring three substations.

The next article will show how the system for managing recuperation energy distribution using fuzzy logic is constructed.

Keywords: constructive-synthesizing modeling, direct current traction, formal grammars, constructor, software, information technologies.

Гуда Антон Ігорович – доктор технічних наук, професор Дніпровського металургійного інституту Українського державного університету науки і технологій.

Іванов Олександр Петрович – кандидат технічних наук, доцент Дніпровського інституту інфраструктури і транспорту Українського державного університету науки і технологій.

Шинкаренко Віктор Іванович – доктор технічних наук, професор Дніпровського інституту інфраструктури і транспорту Українського державного університету науки і технологій.

Саблін Олег Ігорович – доктор технічних наук, професор Дніпровського інституту інфраструктури і транспорту Українського державного університету науки і технологій.

Guda Anton – doctor of engineering's sciences, professor SEI DMI Ukrainian State University of Science and Technology.

Ivanov Oleksandr candidate of technical sciences, associate professor , SEI DIIT Ukrainian State University of Science and Technology.

Shynkarenko Viktor – doctor of engineering's sciences, professor SEI DIIT Ukrainian State University of Science and Technology.

Sablin Oleg – doctor of engineering's sciences, professor SEI DIIT Ukrainian State University of Science and Technology.

К.Ю. Островська, А.Ю. Зимогляд, А.О. Козакова

МОДЕЛЮВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО АЛГОРИТМУ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДЕФЕКТІВ ВІДЕОПОТОКУ

Анотація. В роботі зроблено огляд на існуючі наукові роботи з аналізу відео на виявлення дефектів та технологій цифрового мовлення. Розглядається створення датасета, розподілу даних по вибіркам. Описується навчання нейромережеских моделей та отримання результатів навчання. Реалізації методу використання навченої нейронної мережескої моделі.

Ключові слова: нейромережа, згорткова нейронна мережа, дата-сет, дефект, відеофайл, відеотрансляція, відеомовлення.

Вступ. Сучасні джерела інформації витіснили телебачення з графіка повсякденного життя. Зараз замість аналогового телебачення перевагу використовують цифрове. Протоколи передачі аудіо та відео в цифрових пакетах продовжують активно використовуватися не тільки в цифровому телебаченні, але і в інших сферах.

Метою роботи є моделювання нейромережеского алгоритму для аналізу дефектів відеопотоку.

Опис вимог для вирішення поставленого завдання. На основі проведеного аналізу для виконання поставленого завдання необхідно виконати такі пункти.

1. Зробити набір зображень, що містять кадри з дефектами трансляції.
2. Розмітити отриманий набір зображень типи помилок, зображені на кадрі.
3. Вибрати існуючу нейромережеску модель та навчити її на створеному датасеті.
4. Написати програму, яка використовуватиме навчену модель для виявлення дефектів на відео.

Для реалізації поточних вимог також необхідно використовувати додаткове ПЗ:

1. Для відтворення потокового відеотрансляції буде використано VLC media player. Цей медіаплеєр має можливість відтворення файлів потокового мовлення, програв більшість кодеків, має відкритий вихідний код. Для навчання нейронної мережі необхідно створити датасет із зображеннями дефектів відеотрансляції.

2. Для створення зображень із дефектами потрібно отримати файл відеотрансляції із пріоритетом помилок пакетів третього рівня. Для внесення в пакет помилок буде використано програмне забезпечення TSDuck.

TSDuck це open source ПЗ для маніпуляцій з TS-потоками. Як вхід вміє працювати з IP, http, hls, dvb-тюнерами, dektec dvb-asi демодулятором, є внутрішній генератор TS-потоків та читання з файлів. Як вихід може бути запис у файл, IP, hls, dektec dvb-asi

та HiDes модулятори, плеєри (mplayer, vlc, xine) та drop. Між входом і виходом можна включити різні процесори трафіку.

3. Щоб отримувати технічну інформацію про файл, що містить відеотрансляцію, буде використано програму Mediainfo.

MediaInfo – це невелика безкоштовна утиліта, яка дозволяє отримувати технічну інформацію про медіафайли.

4. Для вирізання кадрів із відео використовується програма Kdenlive.

Kdenlive – це абревіатура від KDE Non-Linear Video Editor. Це доступний редактор з відкритим вихідним кодом, сумісний із пристроями Linux, Mac та Windows. Він надає стандартні для галузі параметри редагування та широкий спектр аудіо-, відео- та композиційних ефектів.

Набір використаних даних. Підбір відео для створення набору даних. Для навчання нейромережевої моделі необхідно мати датасет із зображеннями дефектів трансляції. Вирішили створити свій датасет даних використовуючи вільні джерела. Завантажено відео з вільних джерел, які транслюються цифровим телебаченням. Було завантажено відеотрансляцію цифрових телепередач наступних форматів: мультфільми, спорт, новини, наука, детективи, твори художньої культури, передачі про тварин, реклама, ситкоми та комедійні шоу. На кожен формат було завантажено близько 10 відеозаписів. У сумі було завантажено 100 відео файлів. Усі відеозаписи були конвертовані у формат потокового мовлення ".TS" з використанням програми VLCMediaPlayer.

Для створення первинного набору даних використовується програмне забезпечення TSDuck.

Експериментальним шляхом було виявлено, що для отримання максимальної кількості дефектів відеопотоку, необхідно збільшити максимальну кількість бітових помилок на пакет (max_pkt_err).

Щоб перейти до розмітки датасета, необхідно з файлів відеотрансляції вирізати кадри, що містять дефекти зображення.

Програма для відеомонтажу Kdenlive має інструментарій для обробки файлів відеотрансляції «TS». За допомогою цього програмного забезпечення було вирізано 1000 кадрів з роздільною здатністю високої чіткості (1280x720) у форматі «.png».

Зображення з низькою якістю видалено.

Розмітка первинних даних. Для розмітки зображень було використано програму Label Studio.

Для навчання нейромережевої моделі вирізаний набір кадрів з дефектами було розміщено у програмі Label Studio. Для кожного типу дефекту було визначено клас. Спосіб розмітки сегментів – Bounding boxes.

Основне завдання нейромережевої моделі – виявлення лише кадру з дефектом.

Кількість розмічених областей кожного класу. У роботі нейромережі було використано самостійно підготовлений набір даних з урахуванням файлів відеотрансляцій з дефектами кадрів.

Датасет складається з 1016 зображень: 816 зображень із дефектами та 200 зображень із звичайними кадрами відеотрансляції, які не містять дефектів (Рисунок 1).

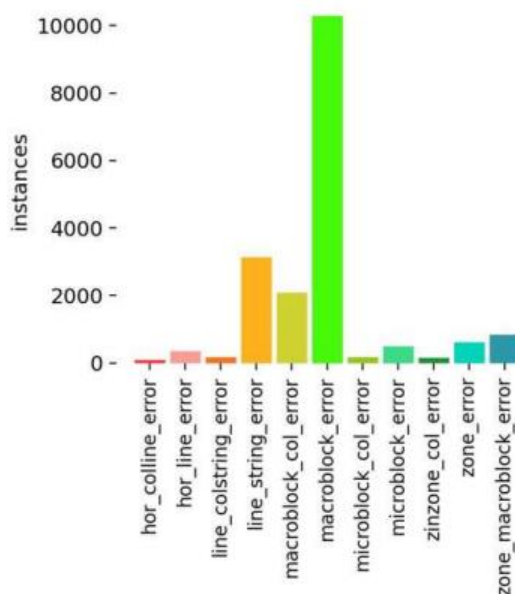


Рисунок 1 - Кількість розмічених областей кожного класу

Збір тренувальної, тестової, валідаційної вибірки. У даному випадку, щоб неймережа правильно навчилася виявляти помилки відеотрансляції, необхідно розподілити зображення на тренувальну, тестову та валідаційну вибірку так, щоб кількість зображень з певним класом приблизно задовольняла співвідношенню: 70x20x10. Після розподілу даних, вийшло: 686 зображень у тренувальній вибірці, 225 у тестовій, 105 у валідаційній (Рисунок 2).

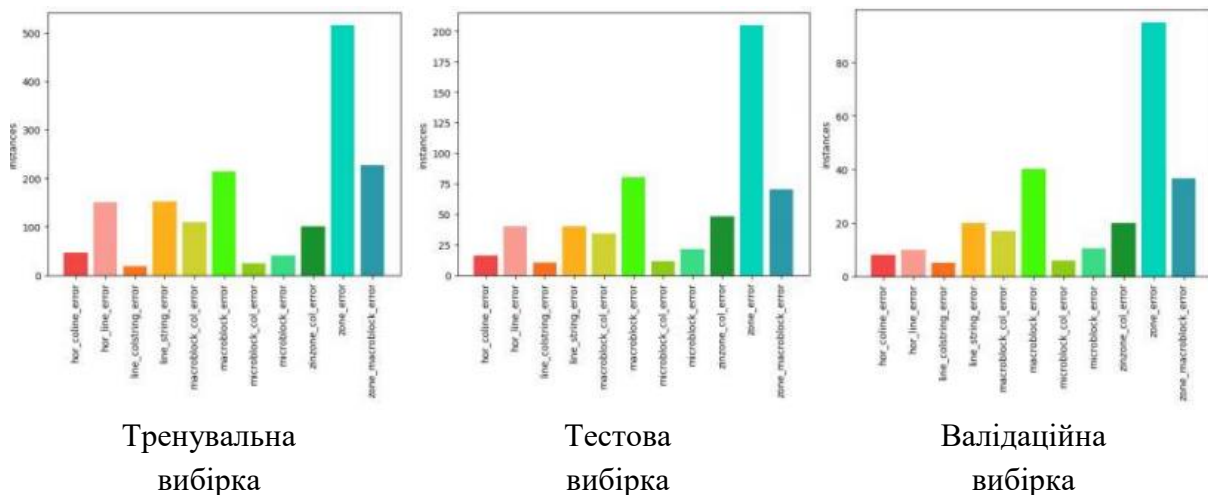


Рисунок 2 - Збір тренувальної, тестової, валідаційної вибірки

Реалізація неймережної моделі. Для навчання було обрано модель виявлення об'єктів, YOLO.

YOLO – це система (мережа) виявлення об'єктів. Моделі YOLO підходять для завдань: виявлення об'єктів, сегментації екземплярів, класифікації, орієнтованого виявлення. Найбільшою перевагою YOLO над іншими архітектурами є швидкість.

Для подальшого навчання були обрані найшвидша та найточніша модель версій YOLOv5 та YOLOv8, щоб дізнатися яка з моделей продемонструє найкращий результат. У таблиці 1 представлено кілька вибраних моделей YOLO та його показники.

Таблиця 1

Показники моделей YOLO

№	Найменування моделі YOLO	Максимальний розмір зображення	Швидкість обробки однієї фотографії (мс)	mAPval (середня точність виявлення об'єктів)
1	yolov5x6u.pt	1280	1,06	56,8
2	yolov5n6u.pt	1280	3,81	42,1
3	YOLOv8x.pt	640	3,53	53,9
4	YOLOv8n.pt	640	0,99	37,3

Щоб зрозуміти які необхідні параметри, необхідно було провести перше оцінне навчання. Була обрана модель з найбільшою швидкістю навчання – YOLOv8n.pt, з кількістю епох – 50, та роздільною здатністю зображень – 400x400. Результати навчання представлені на рисунках 3 і 4

З рисунків 3 і 4 можна дійти невтішного висновку, що модель не відрізняє помилки відеотрансляції від звичайних об'єктів, що знаходяться на кадрі, але знаходить зону кадру, де знаходяться помилки.

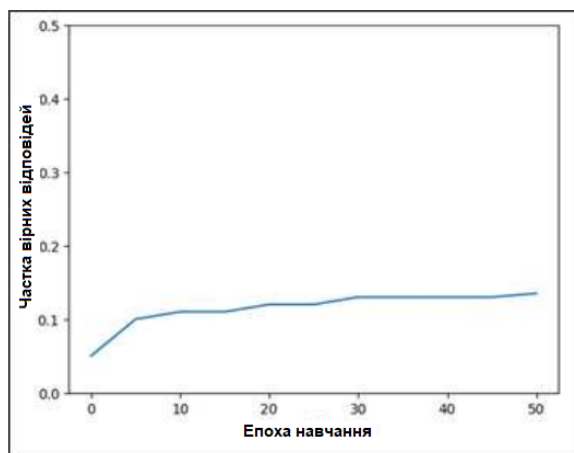


Рисунок 3– Результат навчання моделі

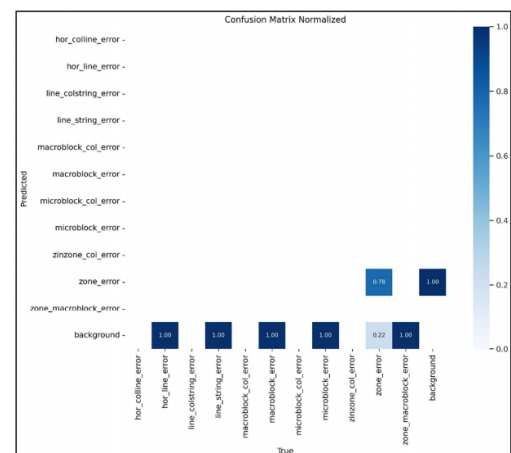


Рисунок 4 – Матриця помилок першого навчання

Для повторного тестового навчання змінимо показник роздільної здатності картини до максимуму (640). Кількість епох навчання залишається незмінною, для більш точних моделей кількість епох буде зменшена, у зв'язку з обмеженням на обчислювальні ресурси. Модель навчання не змінюється.

На рисунках 5 та 6 показані результати повторного тестового навчання моделі.

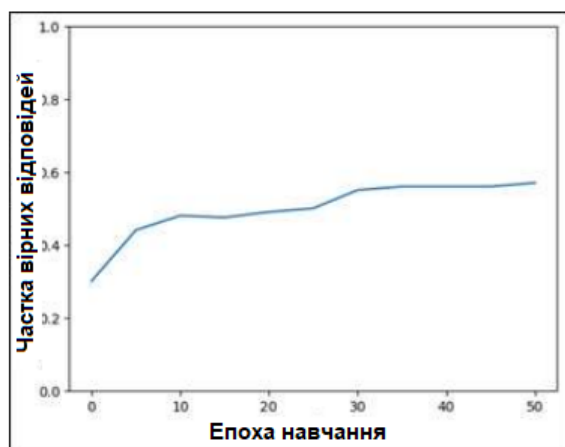


Рисунок 5 – Результат другої спроби навчання моделі

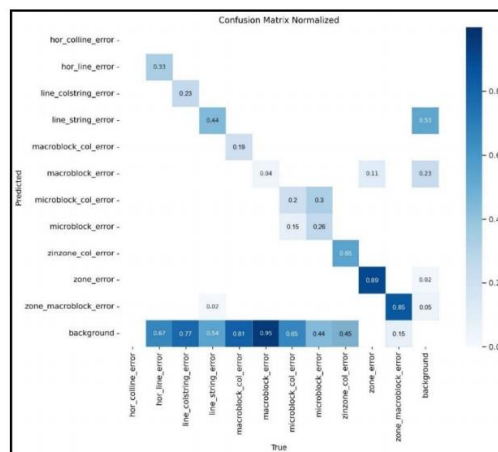


Рисунок 6 – Матриця помилок другої спроби навчання

Навчання моделей YOLO та результати навчання. На основі перших тестових спроб навчання можна зробити висновок, що роздільна здатність зображень – вкрай важливий параметр. Якщо якість зображення надто низька, то нейромережа не зможе відрізнити дрібні помилки зображення від об'єктів розташованих на зображенні, таким чином, необхідно встановити максимально можливий дозвіл для навчання кожної моделі. Також для отримання найкращих результатів змінювалися гіперпараметри моделей. Під час навчання моделей було помічено, що на підсумковий результат впливає значення гіперпараметра "batch" (кількість зображень, що обробляються за один прохід).

Нейросетевые моделі YOLO захищені від ефекту перенавчання – це досягається автоматичним збереженням параметрів, у яких нейронна мережу має мінімальне значення помилки.

У таблиці 2 наведено фінальні значення змінних навчання кожної моделі.

Таблиця 2

Значення параметрів навчання моделей

№	Модель YOLO	Максимальний розмір зображення	Швидкість обробки однієї фотографії (мс)	mAPval (середня точність виявлення об'єктів)	Кількість зображень, що обробляються за один прохід
1	yolov5x6u.pt	1280	1,06	56,8	8
2	yolov5n6u.pt	1280	3,81	42,1	4
3	YOLOv8x.pt	640	3,53	53,9	16
4	YOLOv8n.pt	640	0,99	37,3	12

Найкращі результати навчених моделей навчання наведені на рисунках 7 – 10.

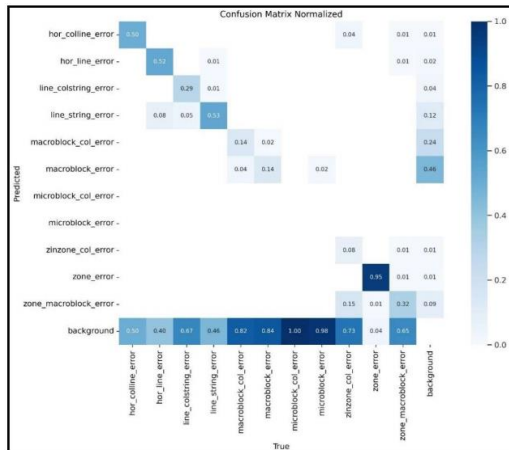


Рисунок 7 – Найкращий результат матриці помилок моделі yolov5x6u.pt

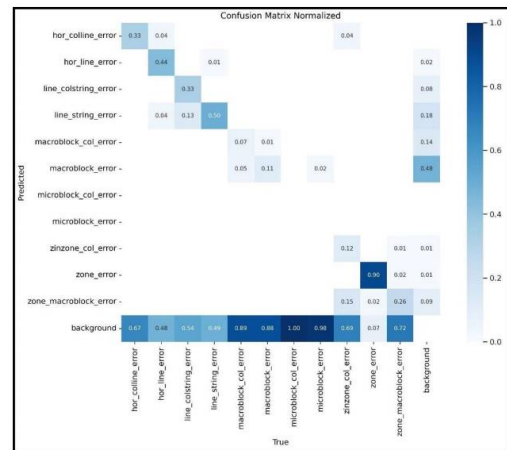


Рисунок 8 – Найкращий результат матриці помилок моделі yolov5n6u.pt

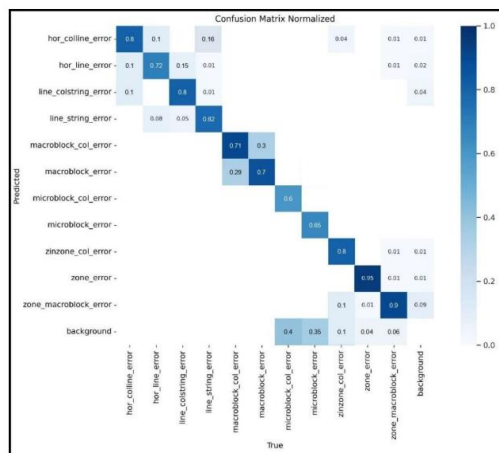


Рисунок 9 – Найкращий результат матриці помилок моделі YOLOv8x.pt

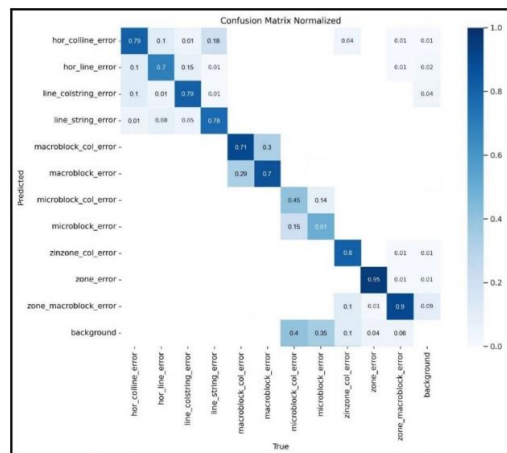


Рисунок 10 – Найкращий результат матриці помилки моделі YOLOv8n.pt

Висновок. З отриманих результатів можна дійти неутішного висновку, що найбільшій точністю у виявленні дефектів має навчена модель YOLOv8x.pt.

Після отримання найкращих результатів навчання моделей було виявлено, що найбільший дозвіл впливає якість виявлення помилок лише до певного значення.

На даній вибірці навчання достатньою роздільною здатністю для детектування зображень є 540x540 пікселів.

Обчислювальні ресурси сервісу Google Colaboratory обмежені для безкоштовного використання, тому для моделей YOLOv8x.pt та yolov5x6u.pt було скорочено кількість епох навчання. Навіть із меншою кількістю епох навчання модель YOLOv8x.pt змогла показати найкращий результат.

Для подальшого використання буде використовуватись навчена нейромережева модель YOLOv8x.pt.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Mehedi H., Tasneem R., Kiok A., Oksam C. Artifacts Detection and Error Block Analysis від Broadcasted Videos. // arXiv preprint, 2018 – 14 с.

2. Glavota I., Kaprocki Z., Vranjes M., Herceg M. No-reference realtime video transmission artifact detection for video signals. // Journal of RealTime Image Processing, 2020. - С. 799-821.
3. Morals D., Silva A.F., Mylene C.Q., A Correlation-Based NoReference Packet-Loss. // Conference Paper, 2016. - 6 с.
4. Mylene C.Q. Відмінні contributions of blocky, blurry, noisy, i ringing synthetic artifacts до overall annoyance. // Journal of Electronic Imaging, 2012. - 23 с.
5. Charles, P. Digital video and HDTV/P Charles. - San Francisco: Morgan Kaufmann, 2001. - 700 с.

Received 03.04.2025.
Accepted 07.04.2025.

Simulation of a neural network algorithm for the analysis of video flow defects

The paper provides an overview of existing scientific works on video analysis for defect detection and digital broadcasting technologies. The creation of a data set, data distribution by samples are considered. The training of neural network models and obtaining training results are described. Implementation of the method of using a trained neural network model.

From the results obtained, we can draw an unfortunate conclusion that the trained model YOLOv8x.pt has the highest accuracy in detecting defects.

After obtaining the best results of model training, it was found that the highest resolution affects the quality of error detection only up to a certain value.

On this training sample, a sufficient resolution for image detection is 540x540 pixels.

The computing resources of the Google Colaboratory service are limited for free use, so the number of training epochs was reduced for the YOLOv8x.pt and yolov5x6u.pt models.

Even with fewer training epochs, the YOLOv8x.pt model was able to show the best result. For further use, the trained neural network model YOLOv8x.pt will be used.

Keywords: neural network, convolutional neural network, data set, defect, video file, video broadcast, video broadcast.

Островська Катерина Юріївна - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри Інформаційних технологій і систем ННІ «ДМетІ» УДУНТ.

Зимогляд Андрій Юрійович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри Інформаційних технологій і систем ННІ «ДМетІ» УДУНТ.

Козакова Анастасія Олександрівна - магістр кафедри Інформаційних технологій і систем ННІ «ДМетІ» УДУНТ.

Ostrovska Kateryna – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Technologies and Systems of the Scientific Research Institute "DMetI" UDUNT.

Zymogliad Andriy – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Technologies and Systems of the Scientific Research Institute "DMetI" UDUNT.

Kozakova Anastasia - Master of the Department of Information Technologies and Systems of the Scientific Research Institute "DMetI" UDUNT.

Д.О. Кононов, В.О. Єрмократ'єв, А.З. Ціколія

**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОЛИВАНЬ ЕЛАСТИЧНОГО СИТА
ВІБРАЦІЙНОГО ГРОХОТА МЕТОДАМИ ЯВНОЇ
ТА НЕЯВНОЇ ДИНАМІКИ ГУМОВОГО ЕЛЕМЕНТА**

Анотація. Грохочення є одною з основних операцій при переробки сипкого матеріалу.

У процесі експлуатації конструкції просіваючих поверхонь повинні мати високі показники ефективності процесу грохочення, щоб мінімізувати можливості закрупнення або задрібненості класифікованого матеріалу розрахункової крупності.

На кафедрі галузевого машинобудування УДУНТ розроблено нову конструкцію еластичної просіючої поверхні, яка має високі експлуатаційні показники роботи.

Мета роботи: визначення динамічних параметрів руху елементів еластичного карткового сита вібраційного грохоту.

Розроблена модель карткового еластичного елемента сита для динамічного аналізу за допомогою методу скінченних елементів.

Гума моделювалася нелінійним гіпереластичним матеріалом з моделлю Neo-Hookean.

Проведений динамічний розрахунок методами явної та неявної динаміки та визначено його кінематичні характеристики точок (переміщення, швидкість та прискорення).

Швидкості та переміщення точок елемента еластичного сита вібраційного грохоту при різних методах розв'язання мають незначні відмінності.

Найбільші відмінності є щодо прискорень. У разі Explicit Dynamics має місце поява високочастотних коливань прискорень із досить більшою амплітудою.

Проведені розрахунки підтверджують збільшення амплітуди коливань елементів, що просіює поверхні грохоту, в порівнянні з амплітудою коливання короба грохоту. Це свідчить про хорошу динамічної активності запропонованої конструкції сита.

Отримано залежності амплітуди коливань точок: при сталому руці грохоту від частоти вібратора; від модуля пружності еластичного елемента.

Ключові слова: явна та неявна динаміки, еластичне сито, вібраційний грохот

Постановка проблеми. Грохочення є одною з основних операцій при переробки сипкого матеріалу. У процесі експлуатації конструкції просіваючих поверхонь повинні мати високі показники ефективності процесу грохочення в залежності від умов класифікації і як можна довше зберігати постійними розміри просіваючих отворів (щілин), щоб мінімізувати можливості закрупнення або задрібненості класифікованого матеріалу розрахункової крупності [1, 4].

Вимоги, що пред'являються до просіючих поверхонь можна реалізувати для нової

конструкції резино-металевої поверхні колосникового типу, що просіює, підвищеної динамічної активності, що володіє зонами, та призначена для використання на вібраційних грохотах металургійного виробництва з метою поліпшення якості розділення по фракціям металургійної мінеральної сировини [1, 3].

На кафедрі галузевого машинобудування УДУНТ розроблено нову конструкцію еластичної просіючої поверхні, яка має високі експлуатаційні показники роботи [1, 3].

Загальний вид конструкції гумо-металевої колосниково-карткової поверхні, що просіює, представлено на рис. 1. Для забезпечення простоти монтажу і демонтажу, пропонується, змонтувати (приварити) колосники 2 до зварної рами 3, що знімається.

Еластичні карткові елементи 2, з попереднім розтягуванням жорстко встановлюються («насаджуються») на зовнішню поверхню подовжньої колосникової опори 1, завдяки своїм пружним властивостям «обхвачують» її з натягненням своєю крізною внутрішньою порожниною, а також додатково фіксуються на ній за допомогою спеціального профілю.

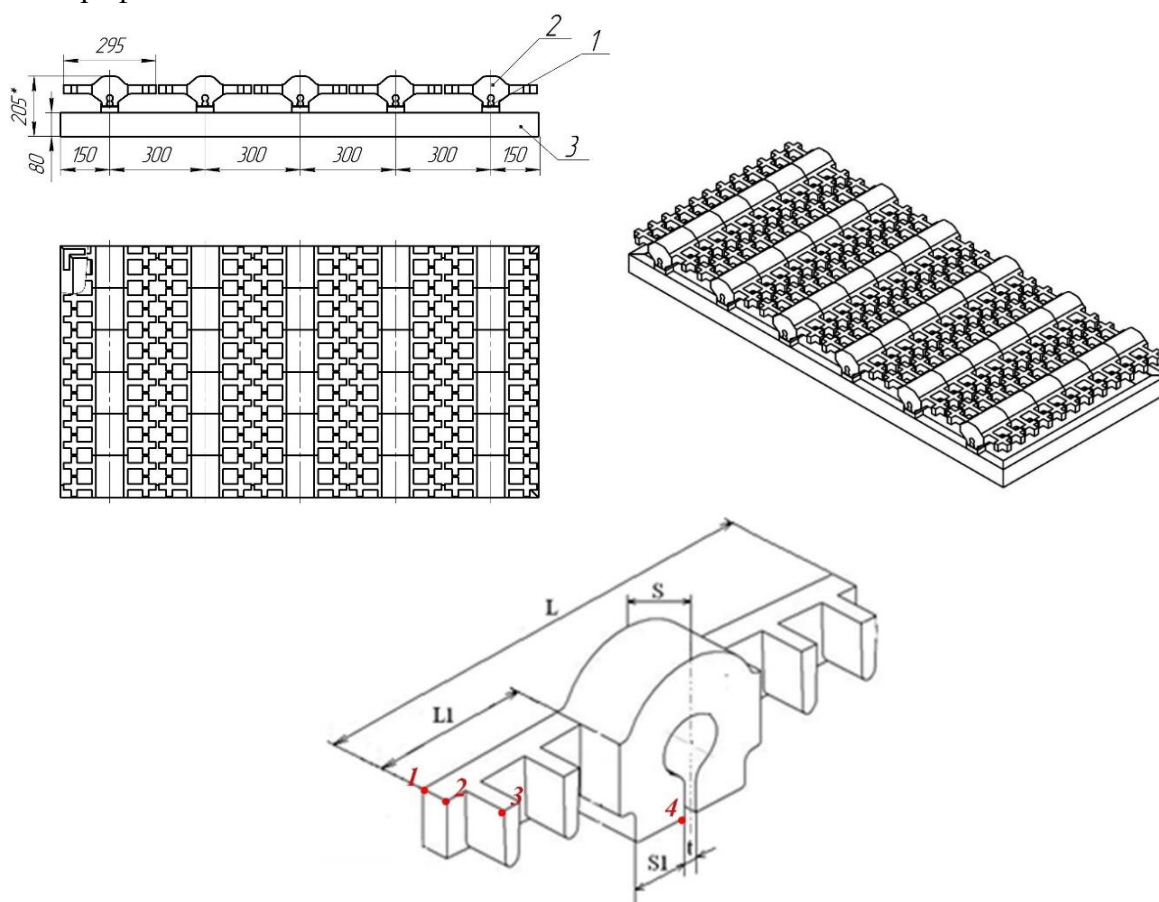


Рисунок 1 - Загальний вид конструкції сита

Перевагою нової конструкції динамічно-активній поверхні є те, що захист від абразивного зносу зовнішньої поверхні металевих колосникових опор проводиться самими еластичними картковими елементами, оскільки вони не лише формують саму поверхню, що просіює, але і по суті є футеровкою власної системи кріплення до короба вібраційного грохоту.

В даний час відсутні методики розрахунку кінематичних параметрів роботи еластичного сита даного типу.

Мета дослідження- Мета роботи: визначення динамічних параметрів руху елементів еластичного карткового сит вібраційного грохоту..

Задачі, які необхідно вирішити:

1. Розробити модель визначення динамічних параметрів руху елементів за допомогою метода скінчених елементів;
2. Визначити модель гіпереластичного матеріалу, яким моделюватиметься гума, з якого виготовлений пружний елемент;
3. Розглянути вимушені коливання колосникового з використанням методів явної та неявної динаміки.

Викладення основного матеріалу дослідження. Вибір моделі гіпереластичного матеріалу залежить від типу деформації, властивостей матеріалу та діапазону деформацій, які потрібно описати. Нижче наведено основні моделі та їх застосування в залежності від характеру деформації [5, 6].

Model	Strain range
Neo-Hookean	Up to 30%
Mooney-Rivlin	30%-200%
Polynomial	
Yeoh	Up to 300 %
Ogden	Up to 700%

7Так як деформації в пружному елементі будуть не більше 30%, то обираємо модель *Neo-Hookean*. Даний матеріал відповідає звичайним маркам гуми, яка використовується при виробництві деталей для гірничо-металургійних підприємств.

Методи вирішення поставлених задач. У динаміці твердого тіла та обчислювальної механіки методи вирішення задач динаміки діляться на явні та неявні (Implicit) залежно від способу обчислення стану системи на наступному часовому кроці [6, 7].

Явні методи обчислюють стан системи в пізніший момент часу на основі стану системи в поточний момент часу, в той час як неявні методи знаходять рішення, вирішуючи рівняння, що включає як поточний стан системи, так і пізніше.

Або інакше. Неявний та явний аналіз різняться у підході до збільшення часу. У неявному аналізі кожен тимчасовий крок має зійтися, але можна задати досить тривалі прирощення. З іншого боку, при явному аналізі кожен тимчасовий крок нічого не винні сходиться, але у тому, щоб рішення було точним, збільшення часу мають бути дуже малими.

Для вирішення нашої задачі розглянемо два методи рішення, які можна реалізувати.

Моделювання динаміки руху елементів еластичного карткового сита вібраційного грохоту.

Приймемо, що точки короба грохоту здійснюють лінійні коливання за гармонійним законом із постійною амплітудою.

Тоді переміщення точки кріплення еластичного елемента сита можна записати у вигляді,

$$x(t) = a \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

де a - амплітуда коливань, м ;

ω -циклічна (кругова) частота коливань грохоту (вібратора), рад/с.

Відповідно, швидкість переміщення дорівнюватиме

$$v(t) = \frac{d}{dt} x(t) = a \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

Рішення проводилося за застосуванням програмного забезпечення *PrePoMax*, яке є пре- та постпроцесингом для вирішувача *Calculix* [8,9].

В результаті рішення отримуємо кінематичну характеристику точок елемента еластичного сита: переміщення, швидкості та прискорення.

Далі наведені результати моделювання для випадку коливань з наступними параметрами: $a = 0,002 \text{ м} = 2 \text{ мм}$, частота $\omega = 24,5 \text{ Гц} = 157 \text{ рад/с}$, що відповідає частоті обертання валу вібратора 1470 об/хв.

Крок інтегрування для неявної механіки $\Delta T = 0,0001$.

Аналіз отриманих результатів моделювання.

На рис. 2 показані деформації, що виникають у пружному елементі. Як бачимо, максимальні деформації становлять $1,2\% < 30\%$, тому рішення про використання моделі *Neo-Hookean* є виправданим.

На рис. 3, 4 показані деякі отримані кінематичні залежності за різних методів рішення для характерних точок еластичного елемента 1, 2, 3 та 4 (рис. 1).

Примітка : на рисунках прийняті такі позначення:

Перша буква – метод розв'язання: Е – явний метод Explicit Dynamics; Т - неявний метод Implicit Dynamics.

Друга – кінематична характеристика: a – прискорення; v – швидкість; s – переміщення.

Baza відноситься до кінематичних характеристик т. 4 (місце кріплення пружного елемента до балки короба грохоту).

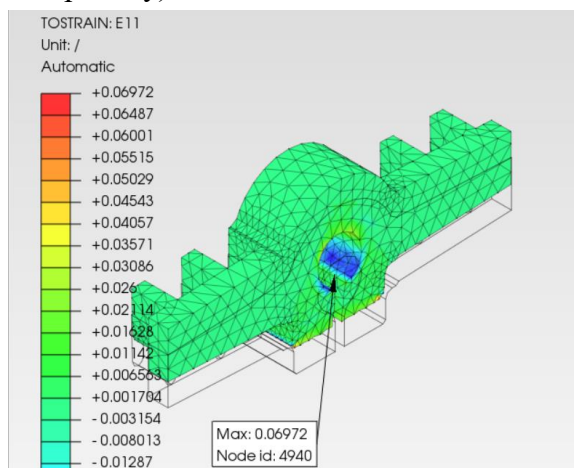


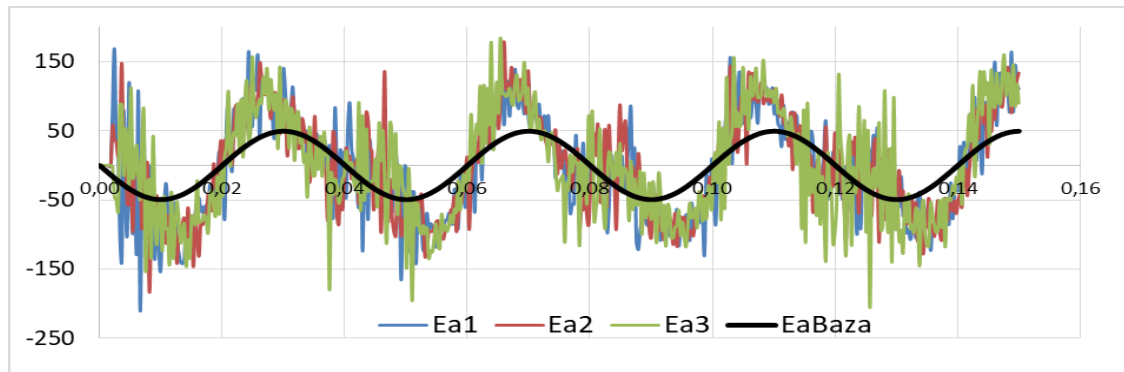
Рисунок 2 - Деформації, що виникають у пружному елементі

З графіків можна дійти висновку, що швидкості і переміщення точок 1, 2 і трьох елемента сита грохоту відбуваються практично однаково.

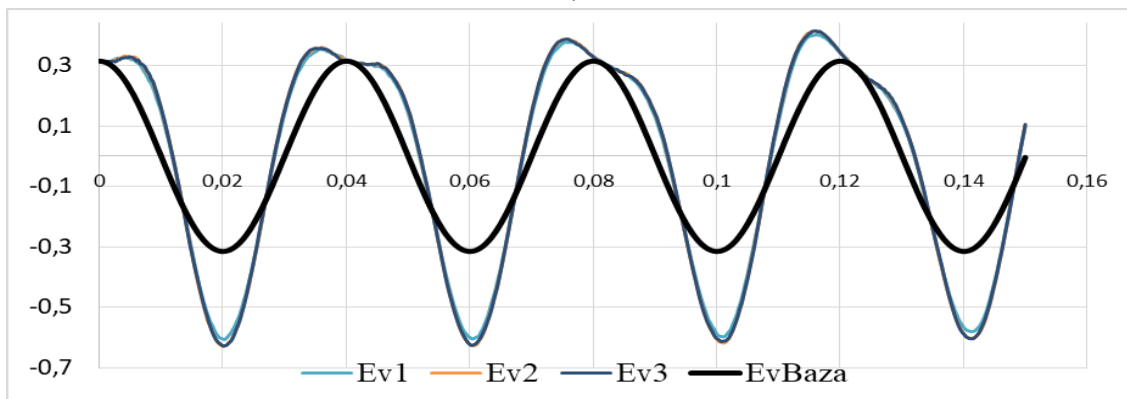
На рис. 5 наведено порівняння швидкості та переміщення точки 1 елемента еластичного сита вібраційного грохоту при різних методах розв'язання. З якого видно, є незначні відмінності у значеннях, набутих різними методами розрахунку.

Загальне збільшення амплітуди коливання точки 1 порівняно з амплітудою короба грохоту (т. 4) становить приблизно 45%.

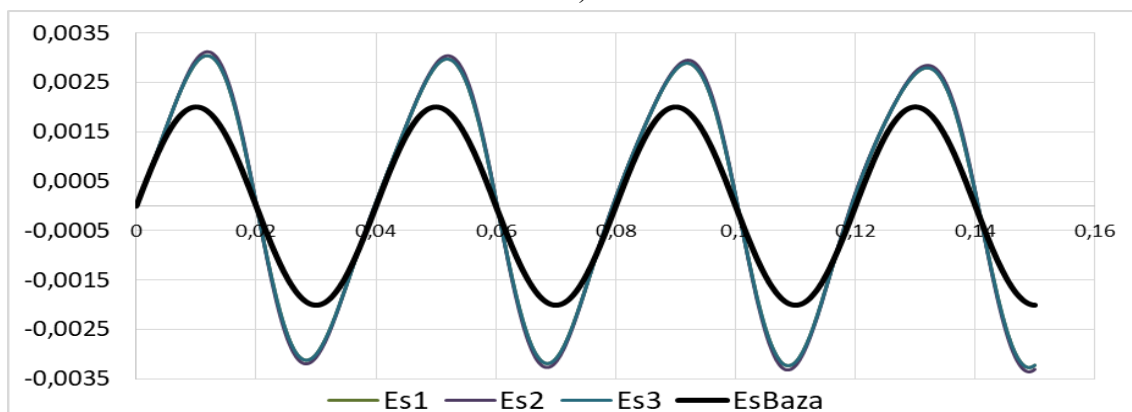
Аналогічна тенденція спостерігається і для інших точок та при помірних змінах параметрів гуми.



а)



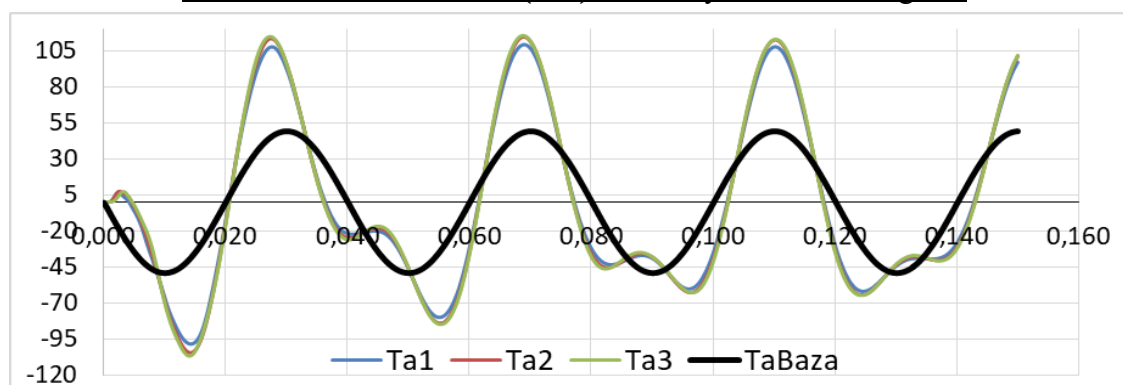
б)



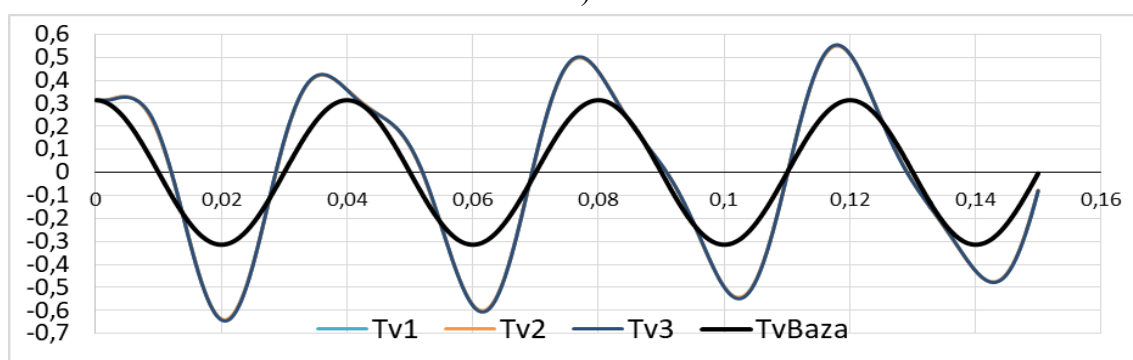
в)

Рисунок 3 - Кінематична характеристика точок елемента еластичного сита вібраційного грохоту при явному методі вирішення динаміки залежно від часу:

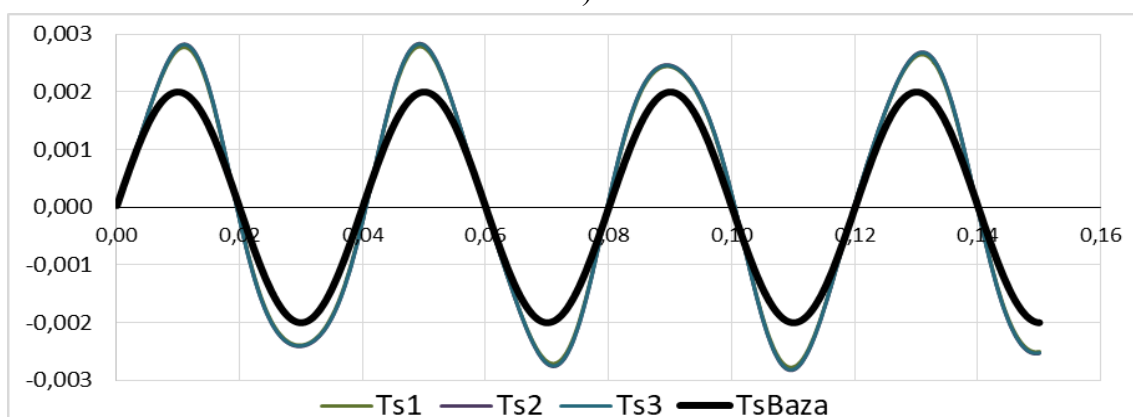
а) прискорення, м/с^2 ; б) швидкість, м/с ; в) переміщення, м



а)



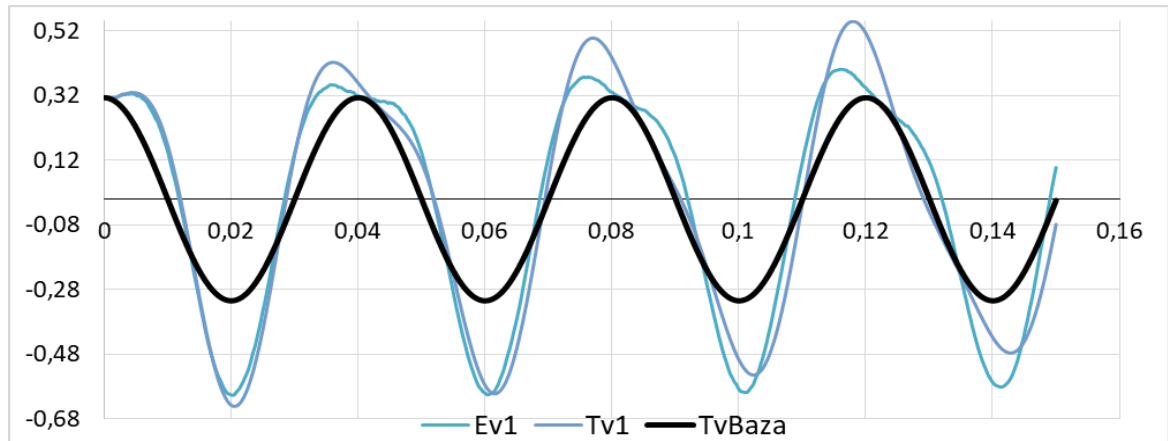
б)



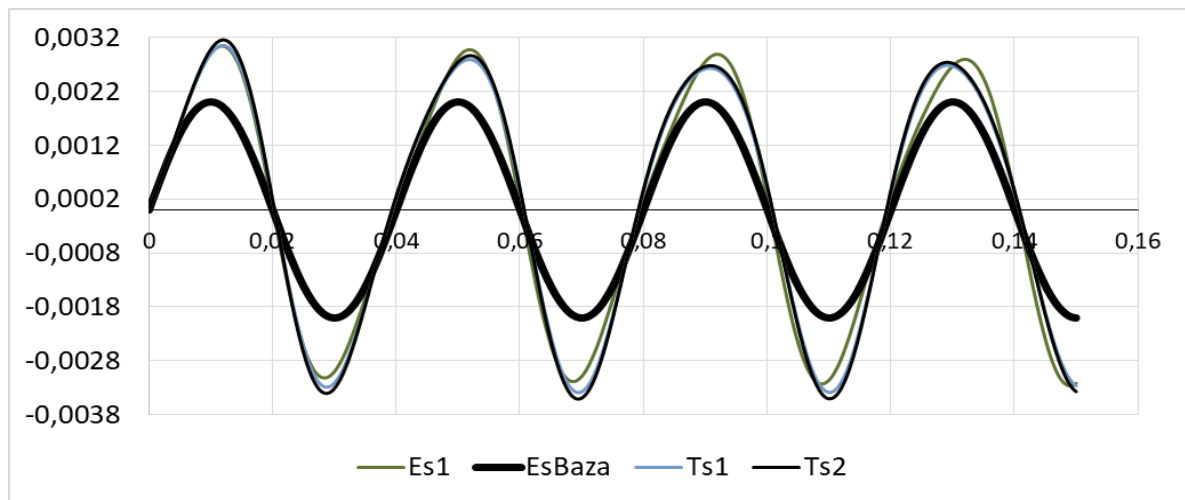
в)

Рисунок 4 - Кінематична характеристика точок елемента еластичного сита вібраційного грохоту при неявному методі вирішення динаміки залежно від часу:

а) прискорення, м/с^2 ; б) швидкість, м/с ; в) переміщення, м



а)



б)

Рисунок 5 - Порівняння кінематичних характеристик точок елемента еластичного сита вібраційного грохоту за різних методів вирішення динаміки залежно від часу:

а) швидкість, м/с; б) переміщення, м

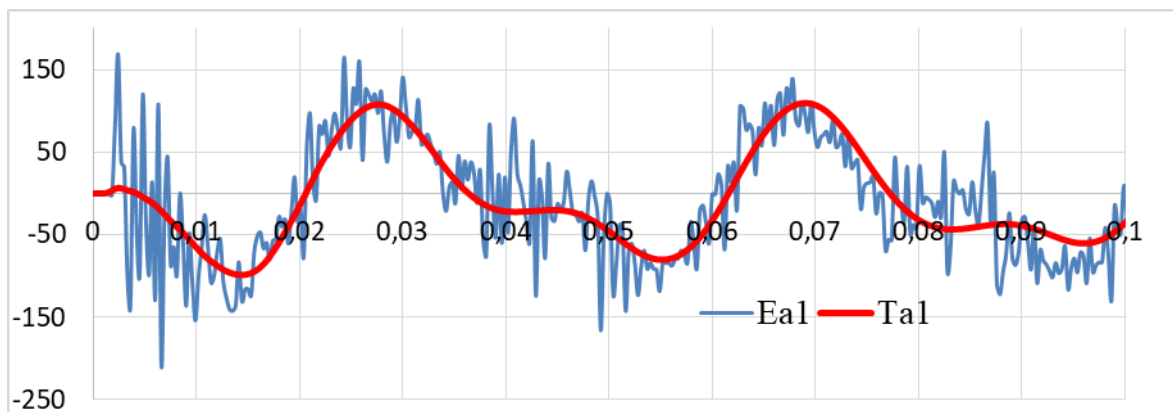


Рисунок 6 - Порівняння прискорень (м/с^2) точки елемента еластичного сита вібраційного грохоту за різних методів розв'язання динаміки залежно від часу (сек): *Eal* – явний метод *Explicit Dynamics*; *Tal* - неявний метод

Як видно найбільші відмінності є щодо прискорень. У разі *Explicit Dynamics* має місце поява височастотних коливань прискорень із досить більшою амплітудою, що призводить до «зашумленості» результатів. Це пояснити особливість явного методу динаміки. Крок при розрахунку явним методом інтегрування мав значення $\sim 10^{-7}$ сек.

На рис 7 наведена залежність амплітуди коливань точки 1 при русі, що встановився, від частоти вібратора. З графіка видно, що зі збільшенням частоти коливань грохоту, амплітуда коливань збільшується, за постійної амплітуди короба грохоту. Але при частоті більше **35 Гц**, відбувається різке збільшення амплітуди коливання, при подальшому збільшенні частоти коливання перестають бути періодичними і з'являється биття.

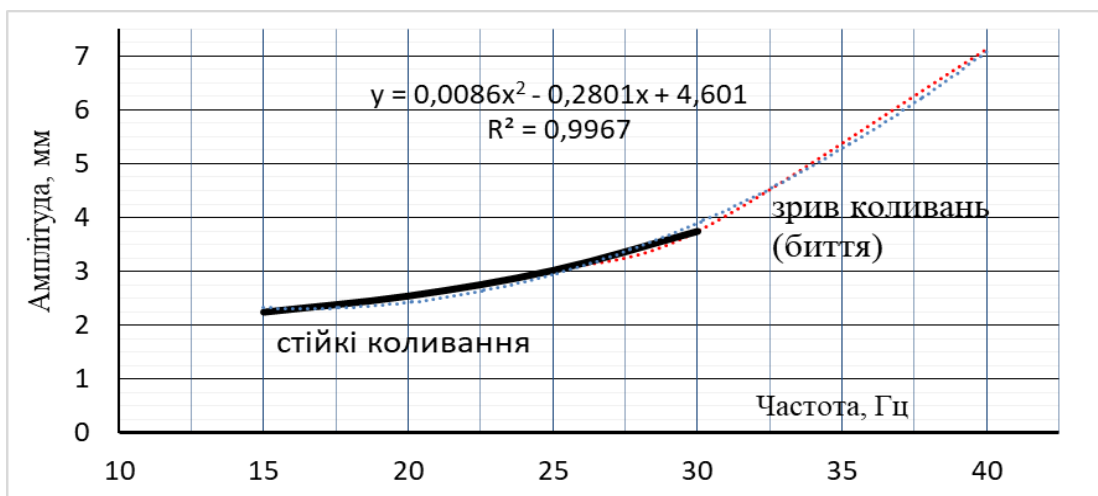


Рисунок 7 - Залежність амплітуди коливань точки 1 еластичного елемента при сталому русі грохоту від частоти вібратора (амплітуда короба грохоту $a=2$ мм)

Розглянемо вплив жорсткості (еластичність) матеріалу пружного елемента на динамічну активність сита. Так як, ми розглядаємо гіпереластичний матеріал за моделлю *Neo-Hookean*, то як характеристику еластичності візьмемо параметр C_{10} .

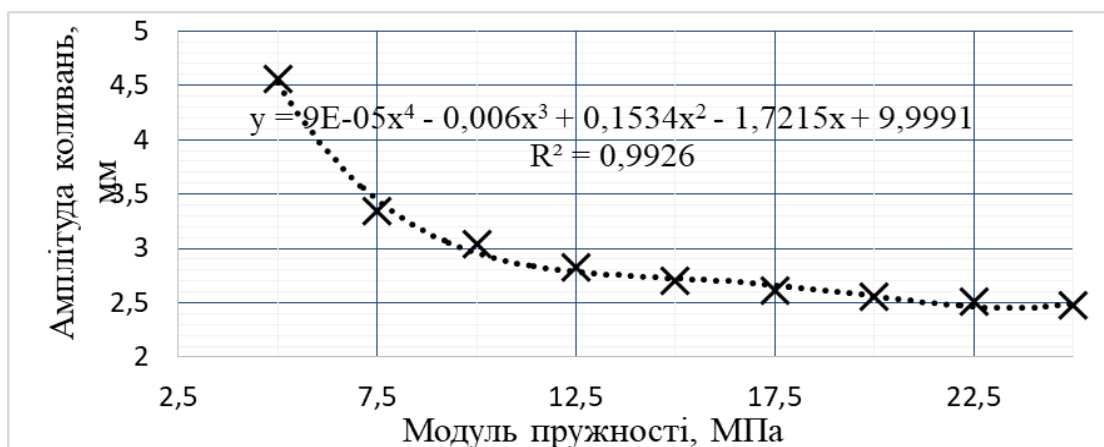


Рисунок 8 - Залежність амплітуди коливань під час руху грохоту від модуля пружності еластичного елемента (амплітуда короба $a = 2$ мм)

Для значень параметрів $C_{10} = 5 \dots 25 \text{ МПа}$, така залежність наведена на рис. 8. З якої видно, що зі зростанням параметра, відбувається зменшення амплітуди коливання точки 1.

Висновки. Розроблена модель карткового еластичного елемента сита для динамічного аналізу за допомогою методу скінченних елементів.

Гума моделювалася нелінійним гіпереластичним матеріалом моделлю Neo-Hookean.

За допомогою пакета PrePoMax проведений динамічний розрахунок методами явної та неявної динаміки гумового еластичного елемента поверхні та визначено його кінематичні характеристики точок (переміщення, швидкість та прискорення).

Максимальні деформації становлять $0,12\% < 30\%$, тому рішення про використання моделі Neo-Hookean є виправданим.

Швидкості та переміщення точок елемента еластичного сита вібраційного грохоту при різних методах розв'язання мають незначні відмінності.

Найбільші відмінності є щодо прискорень. У разі використання Explicit Dynamics має місце поява високочастотних коливань прискорень із досить більшою амплітудою, що призводить до «зашумленості» результатів. Це можна пояснити особливістю явного методу динаміки. Крок при розрахунку явним методом інтегрування мав значення $\sim 10^{-7} \text{ с}$.

Проведені розрахунки підтверджують збільшення амплітуди коливань елементів, що просіює поверхні грохоту, в порівнянні з амплітудою коливання короба грохоту. Це свідчить про хорошу динамічної активності запропонованої конструкції сита.

Отримано залежності амплітуди коливань точок: при сталому русі грохоту від частоти вібратора; від модуля пружності еластичного елемента.

ЛІТЕРАТУРА

1. Удосконалення обладнання та процесів вуглепідготовки і кососортування металургійного виробництва: монографія /Засельський В. Й., Пополов Д. В., Зайцев Г. Л., Білодіденко С. В., Кононов Д. О., Пелих І. В. Кривий Ріг: Р. А. Козлов, 2019.- 203 с.
2. Смирнов В.О., Білецький В.С. Підготовчі процеси збагачення корисних копалин. [навчальний посібник] – Донецьк: Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ, 2012. – 286 с.
3. Justification of rational parameters and development of a dynamically active grate-card sieving surface of vibrating screens [Text]: diss. ... candidate technical Sciences: 05.05.08 / Ihor Volodymyrovych Pelikh; National metallurgist. Acad. of Ukraine. - Dnipro, 2017.
4. І.В. Пелих, С.В. Білодіденко, Д.О. Кононов, В.О. Петренко. Рациональная конструкция поверхности вибрационного грохота металлургического производства /Металургійна та гірничорудна промисловість. -2009 - № 4 - с. 79-82.
5. Булат А.Ф., Дирда В.І., Пухальський В.Н., Лисиця М.І. Розробка та створення вібраційної техніки з використанням еластомерів для видобутку, переробки і збагачення мінеральної сировини/ Геотехнічна механіка. 2018. № 138.

6. Treloar, L. R. G. *The Physics of Rubber Elasticity*. (3rd ed., Oxford University Press, 2005).
7. Holzapfel, G. A. *"Nonlinear Solid Mechanics: A Continuum Approach for Engineering"* (Wiley, 2000).
8. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*
9. <https://www.calculix.de/>
10. <https://prepomax.fs.um.si/>

REFERENCES

1. Improvement of equipment and processes of coal preparation and skew sorting of metallurgical production: monograph / Zaselskyi V.Y., Popolov D.V., Zaitsev G.L., Bilodidenko S.V., Kononov D.O., Pelikh I.V. Kryviy Rig: 2019.
2. Smirnov V.O., Biletskyi V.S. Preparatory processes of mineral enrichment. [study guide] - Donetsk: Eastern Publishing House, Donetsk branch of the National Academy of Sciences, 2012. - 286 p.
3. Justification of rational parameters and development of a dynamically active grate-card sieving surface of vibrating screens [Text]: diss. ... candidate technical Sciences: 05.05.08 / Ihor Volodymyrovych Pelikh; National metallurgist. Acad. of Ukraine. - Dnipro, 2017.
4. I.V. Pelikh, S.V. Bilodyedenko, D.O. Kononov, V.O. Petrenko. Rational design of the surface of the vibrating screen of metallurgical production / Metallurgical and mining industry. -2009 - No. 4 - p. 79-82.
5. Bulat A.F., Dyrda V.I., Puhalskyi V.N., Lysytsia M.I. Development and creation of vibration equipment using elastomers for extraction, processing and beneficiation of mineral raw materials/ Geotechnical mechanics. 2018. No. 138.
6. Treloar, L. R. G. *The Physics of Rubber Elasticity*. (3rd ed., Oxford University Press, 2005).
7. Holzapfel, G. A. *"Nonlinear Solid Mechanics: A Continuum Approach for Engineering"* (Wiley, 2000).
8. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*
9. <https://www.calculix.de/>
10. <https://prepomax.fs.um.si/>

Received 03.04.2025.

Accepted 07.04.2025.

Determination of oscillation parameters of the elastic screen of a vibrating sieve using explicit and implicit dynamics methods for a rubber element

Screening is one of the key operations in the processing of bulk materials.

During operation, the design of screening surfaces must ensure high efficiency depending on classification conditions and maintain consistent sieve aperture sizes for as long as possible to minimize oversize or undersize fractions of the classified material.

The Department of Industrial Engineering at UDUNT has developed a new design of an elastic screening surface with high operational performance.

The objective of the study is to determine the dynamic parameters of motion of the elements of a card-type elastic screen in a vibrating sieve.

A finite element model of the card-type elastic screen element was developed for dynamic analysis.

The rubber was modeled as a nonlinear hyperelastic material with the Neo-Hookean model.

A dynamic calculation was performed using both explicit and implicit dynamics methods, and the kinematic characteristics of selected points (displacement, velocity, and acceleration) were obtained.

The maximum deformations ranged between 0.12% and 30%, which justifies the use of the Neo-Hookean model.

Velocity and displacement results showed minor differences between the methods. However, acceleration values revealed more significant discrepancies. Explicit dynamics introduced high-frequency oscillations with greater amplitudes, leading to noise in the results. This is due to the inherent characteristics of the explicit integration method, which used a time step of approximately $\sim 10^{-7}$ sec.

The study also established the dependence of oscillation amplitude on the vibrator frequency and on the elastic modulus of the screen element.

Кононов Дмитро Олександрович - кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування, Інститут промислових та бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій, (м. Дніпро).

Ціколія Анзор Замірович - аспірант, Кафедра галузевого машинобудування, Інститут промислових і бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, Україна.

Єрмократьєв Віктор Олексійович - кандидат технічних наук, декан факультету дизайну машин та захисту довкілля, Інститут промислових та бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій.

Kononov Dmytro - candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Industrial Engineering Department, Institute of Industrial and Business Technologies, Ukrainian State University of Science and Technology, (Dnipro).

Tsikolia Anzor - PhD Student, Department of Industrial Engineering, Institute of Industrial and Business Technologies, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2 Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine.

Yermokratiev Viktor - Candidate of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Machine Design and Environmental Protection, Institute of Industrial and Business Technologies, Ukrainian State University of Science and Technology.

ВИКОРИСТАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ ТА НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ LSTM ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СТАНІВ ВУЛИКА

Анотація. Бджоли є важливим елементом нашої екосистеми та економіки. З огляду на загрози, з якими стикаються популяції бджіл, розробка ефективних методів їх моніторингу та збереження є критично важливою. Метою роботи є розробка методів використання часових рядів та нейронних мереж на основі архітектури LSTM для ідентифікації різних станів вулика. В якості джерела даних для навчання моделей було використано відносні дані про вагу та температуру вулика, а також відомості про час та місяць. На основі цих даних було навчено дві моделі, які показали задовільні результати у задач розпізнавання точкових станів таких як роїння, додавання прикорму пасічником, або збір пасічником меду, та більші глобальних, таких як розігрів після зими та смерть колонії. Результати роботи цих моделей показали позитивну ефективність підходу застосування часових даних та нейронних мереж для ідентифікації станів вулику.

Ключові слова: нейронні мережі, LSTM, часові ряди, tensorflow, моніторинг ваги, роїння бджіл, бджоли, моніторинг бджолиного вулика

Постановка проблеми. Бджоли є надзвичайно важливими для підтримки екологічної рівноваги та функціонування багатьох економічних секторів. Вони відіграють ключову роль у запиленні значної частини світових продовольчих культур, забезпечуючи наше харчування та підтримуючи біорізноманіття [1,2]. Проте популяції бджіл у всьому світі зазнають значного скорочення, що викликає серйозне занепокоєння. Ця тенденція зумовлена різними факторами, серед яких втрата середовища проживання, інтенсивне сільське господарство, використання пестицидів, зміна клімату, хвороби та шкідники [3,4]. З огляду на критичну роль бджіл, розробка ефективних систем моніторингу стану їхніх колоній є вкрай важливою. Раннє виявлення проблем, таких як хвороби, втрата матки або підготовка до роїння, дозволяє пасічникам вчасно втручатися та запобігати значним втратам.

Традиційні методи моніторингу бджолиних сімей, такі як візуальні огляди, моніторинг ваги вулика та акустичний аналіз, мають свої обмеження. Візуальні огляди є суб'єктивними, трудомісткими та можуть порушувати життя колонії. Моніторинг ваги надає загальну інформацію, але не завжди виявляє конкретні проблеми. Акустичний аналіз може бути ускладнений навколишнім шумом та потребує досвіду для інтерпретації. Ці методи часто не дозволяють здійснювати безперервний та всебічний контроль

за станом бджіл . У зв'язку з цим зростає увага до використання штучного інтелекту та машинного навчання, зокрема нейронних мереж, для моніторингу стану бджолиних сімей. Нейронні мережі здатні аналізувати складні дані, отримані з різних датчиків та джерел, для виявлення закономірностей та прогнозування стану вулика [5].

Серед різних типів нейронних мереж, мережі довгої короткочасної пам'яті (LSTM) є особливо доречними для ефективного аналізу часових даних, що надходять з вулика . Здатність LSTM обробляти послідовні дані та виявляти довгострокові залежності робить їх ідеальними для аналізу таких параметрів, як температура, вологість, вага вулика, акустичні сигнали та активність бджіл, які змінюються з часом. Використання LSTM дозволяє фіксувати часові закономірності, що відображають різні стани бджолиної сім'ї, та забезпечує неінвазивний і безперервний моніторинг [6].

Аналіз досліджень і публікацій. Останніми роками моніторинг бджолиного вулика за допомогою нейронних мереж є актуальною темою багатьох досліджень. Зокрема, згорткові та рекурентні нейронні мережі показують позитивну динаміку у можливостях визначення здоров'я вулику.

Одним з прикладів використання згорткових нейронних мереж в області бджолярства є дослідження[7], які успішно використали їх в поєднанні з ПКВМ для ідентифікації бджіл з пилком на вході у вулик. Цей підхід використовує технології обробки зображень в поєднанні з нейронними мережами надаючи інформацію про рівні активності вулика. Продовжуючи тему використанні візуальної інформації, дослідниками[8] було розроблено моделі, що дозволяють ідентифікувати бджолу на фото та дати оцінку її здоров'ю. В їх роботі було використано модель Mask RCNN, що хоч і справлялась з задачею ідентифікації бджіл, але модель могла обробити тільки 2-3 кадри в секунду. Також, в дослідженні [6] показано успішне використання нейронних мереж для ідентифікації станів вулика на основі температурних даних. В результатах цієї роботи наведено, що нейронна мережа ідентифікувала 11 вірогідних станів роїння, 9 з яких дійсно відбулись, а інші мали температурний паттерн даних схожий на початок роїння. На основі цього можна зробити припущення, що використання додаткових даних окрім температури може показати позитивний результат на точність ідентифікації. До цього висновку також прийшли в дослідженні[9], де було показано успішне використання LSTM та методів злиття аудіо та температурних даних для прогнозування стану роїння. Подібне дослідження з застосуванням LSTM в парі з аудіоданими були проведено для ідентифікації стану відсутності матки у вулику[10].

В області застосування LSTM та даних з набору датчиків можна виділити дослідження[11], в якому було запропоновано модель для передбачення ваги вулика на основі даних про температуру, вологу, та активності бджіл на вході у вулик.

Підсумовуючи, дослідження в області застосувань нейронних мереж для моніторингу та визначень стану вулика є актуальною темою багатьох сучасних наукових досліджень, що також характеризуються великою варіативністю підходів завдяки широкому спектру даних що можна отримати під час моніторингу вулика. Цей підхід підкреслює можливості використання нейронних мереж для передбачення майбутніх станів у вулику.

Метою дослідження є розробка моделей на основі рекурентної архітектури нейронних мереж LSTM для ідентифікації різних станів вулика на основі часових даних про відносну вагу та температуру.

Виклад основного матеріалу дослідження. З огляду літератури ми бачимо, що в залежності від даних нейронні мережі можуть допомогти в ідентифікації широкого спектру станів вулика. В цьому дослідженні основна увага була приділена наступним станам:

- *Нормальний стан*, що характеризується звичайною динамікою коливань температури всередині вулика.

- *Роїння*. Цей стан супроводжується різким зниженням ваги вулика у зв'язку з вильотом значної частини бджіл. Попередні дослідження вказували на зниження внутрішньої температури приблизно на 0,5°C перед початком роїння, однак через нестабільність даних про температури, їх поєднання та подальшу інтерполяцію поточних даних, робити акцент на температурні дані в контексті цієї задачі немає сенсу. Варто зазначити, що роїння переважно спостерігається наприкінці весняного періоду або на початку літа.

- *Медозбір*. Характеризується поступовим підвищенням ваги вулика, що свідчить про накопичення нектару та його переробку на мед.

- *Додавання прикорму* - характеризується різким збільшенням маси вулика, спричинене втручанням пасічника.

- *Вилучення медових рамок* - характеризується різким зменшенням ваги в результаті дій пасічника з відбору медових рамок.

- *Загибель бджолиної колонії* - визначається відсутністю значної динаміки ваги, а також досягненням еквілібріуму в температурних даних між внутрішнім середовищем вулика та зовнішнім.

- *Вихід з зимівлі* - характеризується поступовим підвищенням внутрішньої температури вулика протягом декількох діб. Цей процес відбувається при стабілізації сприятливих температурних умов навколишнього середовища та варіює залежно від географічного розташування вуликів та видової приналежності бджіл.

З урахуванням вищезазначених характеристик, для ідентифікації станів бджолиного вулика було використано комплекс параметрів, що включає масу вулика, внутрішню та зовнішню температури, а також дані про місяць та час.

В якості джерела даних для першої моделі було використано набір даних з платформи Kaggle[12], що містить хронологічні записи похвилинних показників сенсорних пристроїв, встановлених у вуликах протягом 2019-2022 років. Серед даних що надає цей датасет можна виділити дані про вагу вулика, дані про зовнішню та внутрішню температуру, а також дані про вологість всередині вулика. Основною перевагою цього набору даних в контексті дослідження є наявність міток щодо станів вулика у певних часових проміжках, зокрема такі події як роїння, інспекція вулика пасічником, та проведення підгодівлі бджолиної сім'ї.

У процесі первинного аналізу даних було виявлено певні недоліки зі стабільністю значень, періодів з відсутніми даними та артефакти у вигляді екстремальних (максимальних або мінімальних) значень, ймовірно, спричинених помилками зчитування сенсорів. Для адаптації до цих недоліків було створено допоміжний файл метаданих. Цей файл містить специфікацію часових діапазонів протягом яких дані демонстрували стабільність, перелік подій що відбувались у цьому діапазоні, а також дані які краще ігнорувати через пошкодження. Методологічно важливим є те, що точкові події, такі як роїння, були представлені в цьому файлі однією датою, тоді як для глобальних станів, таких як медозбір або колапс колонії, було застосовано підхід циклічної ресстрації з періодичністю 25 годин. Сформований у результаті файл містить 64 часові діапазони, що забезпечує статистично значущу вибірку для побудови та валідації моделей.

Процес попередньої обробки даних здійснювався згідно з розробленим алгоритмом, що включав наступні етапи:

1. *Агрегація даних*: трансформація первинних похвилинних даних у 15-хвилинні інтервали для аналізу точкових станів та 4-годинні інтервали для глобальних станів з видаленням надлишкових або нерелевантних записів, що дозволило оптимізувати обчислювальну складність моделей без значної втрати інформативності.

2. *Селективний експорт діапазонів*: експорт виключно тих часових сегментів, що відповідають попередньо визначеним стабільним діапазонам та містять цільові стани.

3. *Інтерполяція та нормалізація даних*: заповнення поодиноких пропусків у даних, застосування методів інтерполяції та згладжування до часових рядів ваги та температури для зменшення впливу шуму.

4. *Розрахунок похідних значень*: обчислення нових ознак, а саме: відносну зміну ваги у відсотках порівняно зі значеннями на 3-му та 5-му кроках, середнього значення внутрішніх сенсорів температури, відношення зовнішньої температури до середньої внутрішньої.

Для задачі ідентифікації станів було розроблено дві нейромережеві моделі, що відрізняються за своїм функціональним призначенням.

– *Модель для ідентифікації точкових станів*: призначена для виявлення короткочасних подій, таких як роїння, підгодовування та вилучення меду пасічником.

– *Модель для глобальних станів*: Сфокусована на класифікації тривалих станів, включаючи нормальний стан функціонування колонії, загибель колонії, період весняного розвитку (розігріву) після зимівлі та активний медозбір.

Процес підготовки даних для навчання моделі ідентифікації точкових станів складається з наступних кроків:

1. *Формування вікон даних*: Для кожної цільової події було виділено часовий інтервал, що охоплює 8 годин до події та 4 години після неї.

2. *Сегментація даних з використанням рухомого вікна*: застосування методу сегментації з вікном у 24 записи (6 годин) з кроком зміщення 1 від початку часового діапазону до останнього можливого сегменту. Для забезпечення стабільності процесу навчання та підвищення точності ідентифікації було впроваджено внутрішній часовий буфер у 6 записів - сегмент не позначався як такий що має подію якщо цільова подія

потрапляла в крайні 6 записів. Буфер дозволяє гарантувати наявність повного попереднього набору характеристик для коректного визначення.

3. Рандомізація списку сегментів.

4. *Балансування сегментів*. Ціль цього кроку - отримання рівномірного розподілу сегментів з різними станами та без виражених станів. Оскільки деякі стани мають менше представлення в початковому наборі даних (22 сегменти зі станом збору меду), а інші значно більше (381, прикорм), балансування відбувалось до значень наближених до кількості сегментів з станом роїння, тобто 120.

5. *Розділення збалансованого набору сегментів* на навчальну (80%) та тестову (20%) вибірки. Тестова вибірка використовувалась виключно для фінальної оцінки тренуваної моделі.

Після процесу підготовки, фінальний навчальний набір мав наступний розподіл класів: 30.3% сегментів відповідали стану роїння, 30.3% - підгодовування, 6.5% з ознаками збору меду та 32% без вираженого стану. Для навчання моделі було використано наступні характеристики: відносна зміна ваги щодо N-3 кроку, місяць, година. На Рисунку 1 наведена візуалізація моделі нейронної мережі. З неї видно що нейронна мережа використовує два послідовних шари LSTM для виявлення залежностей у часі, а також використовує пакетна нормалізація та Dropout для стабілізації та регуляризації. Вихідний шар з сигмоїдною активацією генерує пригнози для ідентифікації станів.

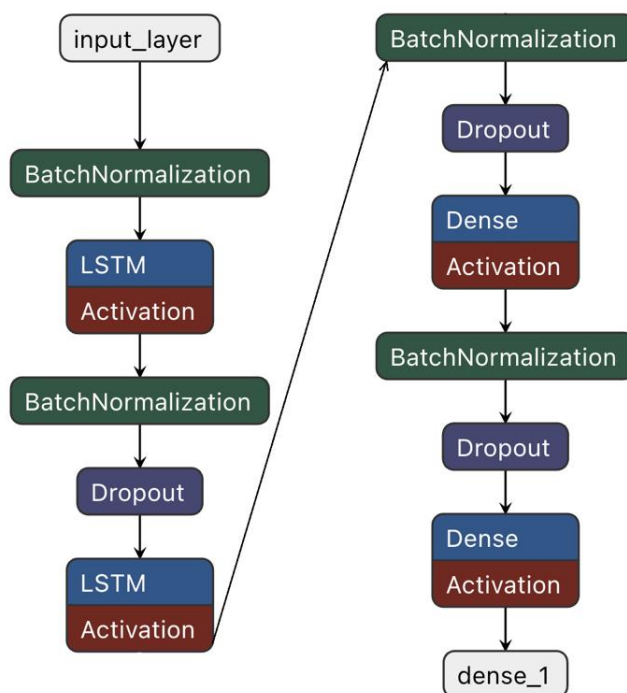


Рисунок 1 - Структура моделі нейронної мережі

Наведена модель нейронної мережі навчалась протягом 100 епох з значенням параметру batch size 16. Під час навчання моделі було використано метод адаптивної оптимізації швидкості навчання ReduceLROnPlateau, що дозволяє автоматично зменшувати швидкість навчання під час тренування моделі, коли її продуктивність перестав по-

рашуватись. Прогрес тренування у вигляді метрик функції втрат та точності наведено на Рисунку 2.

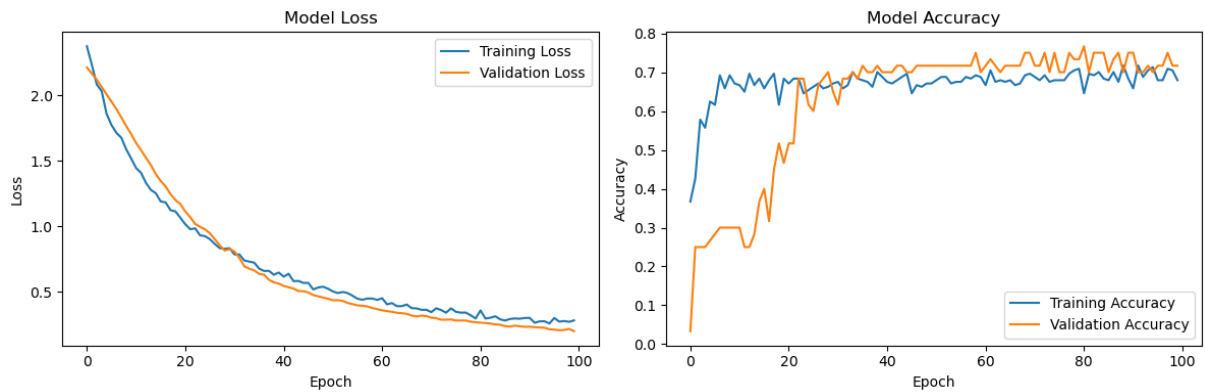


Рисунок 2 - Прогрес тренування моделі ідентифікації точкових станів

Після навчання модель була протестована на окремій вибірці даних методами `classification_report` та `classification_report` бібліотеки `sklearn` результати чого наведено у Таблиці 1. Загальна точність моделі для ідентифікації точкових станів вулика становить 96%.

Таблиця 1

Результати тестування моделі ідентифікації точкових станів

	Точність	Повнота	F1
<i>Роїння</i>			
0	1.00	0.98	0.99
1	0.95	1.00	0.98
Точність:	0.98		
<i>Підгодовування</i>			
0	1.00	1.00	1.00
1	1.00	1.00	1.00
Точність	1		
<i>Забір меду</i>			
0	1.00	0.97	0.99
1	0.60	1	0.75
Точність	0.97		
Загальна точність	0.96		

Процес підготовки даних для навчання моделі, спрямованої на ідентифікацію глобальних станів (нормальний стан, загибель колонії, весняний розвиток, медозбір), виконувався за методологією, подібною до описаної для точкових станів, однак з низкою ключових модифікацій. Ці відмінності зумовлені використанням даних, агрегованих до 4-годинних інтервалів, та особливостями анотування тривалих станів за допомогою повторюваних часових міток.

Зокрема, з огляду на збільшений часовий крок агрегації (4 години), для кожного запису, що позначає певний глобальний стан, було виділено ширший контекстний діапазон даних, що охоплює по 52 години до та після відповідної часової мітки. Розмір сегмента для аналізу було збережено на рівні 24 елементів, що при 4-годинній дискретизації відповідає тривалості у 96 годин (4 доби). Такий розмір вікна був обраний для уможливлення захоплення довготривалої динаміки показників сенсорів, що охоплює кілька діб, що є релевантним для ідентифікації глобальних станів вулика.

У зв'язку із застосуванням методом повторюваного анотування тривалих станів, процес сегментації було доповнено етапом елімінації потенційно дублюючих сегментів, що могли виникнути через періодичне маркування одного й того ж стану, для уникнення надлишковості у навчальній вибірці. Для навчання цієї моделі було використано наступні три характеристики: відносна зміна ваги вулика щодо третього попереднього часового кроку (N-3), відношення зовнішньої температури до середньої внутрішньої температури вулика, місяць.

Архітектура моделі також була модифікована. Ключовими відмінностями є збільшення в 3 рази кількості нейронів у шарах LSTM, та використання функції втрат для багатокласової класифікації. Модель була навчена протягом 100 епох з параметром batch size 16. На рисунку 3 наведено прогрес навчання моделі.

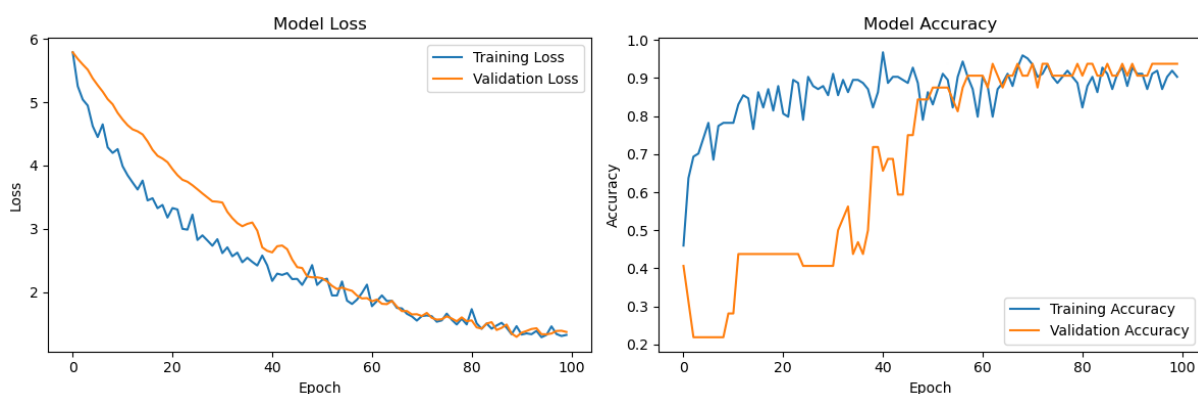


Рисунок 3 - Прогрес тренування моделі ідентифікації глобальних станів

Результати тестування моделі наведено на таблиці 2. Оцінка продуктивності розробленої моделі для ідентифікації глобальних станів на тестовій вибірці виявила високу загальну ефективність. Сукупна точність моделі, що враховує всі стани, досягла дев'яности двох відсотків.

Аналіз ефективності для окремих станів показав особливо високі результати для ідентифікації періодів «Весняного розвитку» та «Медозбору». У випадку «Весняного розвитку» модель досягла практично ідеальних показників за всіма ключовими метриками, забезпечивши стовідсоткову точність класифікації. Ідентифікація стану «Медозбір» також продемонструвала максимальні значення точності, повноти та F1-міри для коректного визначення цього стану, при цьому загальна точність класифікації для цієї бінарної задачі була зафіксована на високому рівні у дев'яносто п'ять відсотків.

Результати тестування моделі ідентифікації глобальних станів

	Точність	Повнота	F1
<i>Смерть</i>			
0	0.92	1.00	0.96
1	1.00	0.88	0.93
Точність	0.95		
<i>Розігрів після зими</i>			
0	1.00	1.00	1.00
1	1.00	1.00	1.00
Точність	1.00		
<i>Нормальний стан</i>			
0	0.96	0.96	0.96
1	0.91	0.91	0.91
Точність	0.95		
<i>Медозбір</i>			
0	1	1	1
1	1	1	1
Точність	0.95		
Загальна точність	0.92		

Для стану «Загибель колонії» модель показала відмінну точність при виявленні самого стану, тобто практично не генерувала хибних спрацювань щодо загибелі, однак дещо поступалася у повноті, пропускаючи невелику частку реальних випадків. Незважаючи на це, збалансована F1-міра залишалася високою, а точність бінарної класифікації для цього стану також була значною, на рівні дев'яноста п'яти відсотків. Розпізнавання «Нормального стану» характеризувалося добре збалансованими показниками точності та повноти для виявлення цього стану, що відобразилося у високому значенні F1-міри. Загальна точність класифікації нормального стану також була на рівні дев'яноста п'яти відсотків.

Таким чином, розроблена модель продемонструвала високу надійність у розпізнаванні ключових глобальних станів бджолоїної сім'ї, з особливо високою ефективністю для станів весняного розвитку та медозбору, та збалансованою продуктивністю для ідентифікації нормального стану та загибелі колонії.

Висновки. У проведеному дослідженні розроблено підхід до попередньої обробки часових даних з бджолоїного вулику, що включає агрегацію даних до оптимізованих інтервалів, вибіркового експорту стабільних діапазонів, застосування методів інтерполяції та нормалізації часових рядів, та використання рухомого часового вікна. Перша модель, спрямована на розпізнавання точкових станів, таких як роїння, підгодовування та вилучення меду пасічником, досягла загальної точності на рівні 96%, демонструючи особливо високі показники для виявлення підгодовування (точність 100%) та роїння

(точність 98%). Друга модель, призначена для ідентифікації глобальних станів вулика, зокрема нормального функціонування, загибелі колонії, весняного розвитку та медозбору, показала загальну точність у 92%, з найвищими показниками для розпізнавання станів весняного розвитку та медозбору.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на ідентифікацію більшого спектру станів вулику, а також використання в процесі додаткових характеристик таких як волога, аудіодані, та точніші дані про температуру.

ЛІТЕРАТУРА

1. Overview of Bee Pollination and Its Economic Value for Crop Production / S. A. M. Khalifa et al. // *Insects*. 2021. Vol. 12, iss. 8. Art. 688.
URL: <https://doi.org/10.3390/insects12080688>
2. Вплив екосистемних послуг на активізацію розвитку сільськогосподарського виробництва // *Економічний часопис Волинського національного університету імені Лесі Українки*. 2021. № 1 (25). С. 37–51.
URL: <https://doi.org/10.29038/2786-4618-2021-01-37-51>
3. A scoping review on the effects of Varroa mite (*Varroa destructor*) on global honey bee decline / S. Warner et al. // *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 906. Art. 167492.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167492>
4. Editorial: The decline of wild bees: Causes and consequences / M. A. P. Lima et al. // *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2022. Vol. 10. Art. 1027169. URL: <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.1027169>
5. A Low-Cost, Low-Power, Multisensory Device and Multivariable Time Series Prediction for Beehive Health Monitoring / N. Andrijević et al. // *Electronics*. 2022. Vol. 11, iss. 5. Art. 783. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics11050783>
6. Kviesis A. Application of neural networks for honey bee colony state identification / A. Kviesis, A. Zacepins // *2016 17th International Carpathian Control Conference (ICCC)* (High Tatras, Slovakia, 29 May–1 June 2016) : proceedings. Piscataway : IEEE, 2016. P. 413–417. URL: <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2016.7501133>
7. Sledevic T. The Application of Convolutional Neural Network for Pollen Bearing Bee Classification / T. Sledevic // *2018 IEEE 6th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)* (Vilnius, листопад 2018 р.) : матеріали. Piscataway : IEEE, 2018. С. 1–4. URL: <https://doi.org/10.1109/AIEEE.2018.8592464>
8. Braga D., Madureira A., Scotti F. та ін. An Intelligent Monitoring System for Assessing Bee Hive Health / D. Braga, A. Madureira, F. Scotti та ін. // *IEEE Access*. 2021. Т. 9. С. 89009–89019. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3089538>
9. Kwon K.-H., Kim J.-S., Lee H.-B. Forecast of Bee Swarming using Data Fusion and LSTM / K.-H. Kwon, J.-S. Kim, H.-B. Lee // *dcs*. 2019. Т. 20, № 1. Art. 1. URL: <https://doi.org/10.9728/dcs.2019.20.1.1>
10. Ruvunga S., Hunter G. J. A., Duran O., Nebel J.-C. Use of LSTM Networks to Identify ‘Queenlessness’ in Honeybee Hives from Audio Signals / S. Ruvunga, G. J. A. Hunter, O. Duran, J.-C. Nebel // *2021 17th International Conference on Intelligent Environments (IE)*

(Dubai, United Arab Emirates, черв. 2021 р.) : матеріали. Piscataway : IEEE, 2021. С. 1–4.
URL: <https://doi.org/10.1109/IE51775.2021.9486575>

11. Khairul Anuar N. H., Md Yunus M. A., Baharudin M. A. та ін. An assessment of stingless beehive climate impact using multivariate recurrent neural networks / N. H. Khairul Anuar, M. A. Md Yunus, M. A. Baharudin та ін. // *IJECE*. 2023. Т. 13, № 2. С. 2030–2039.
URL: <https://doi.org/10.11591/ijece.v13i2.pp2030-2039>

12. Senger D., Gruber C., Kluss T., Johannsen C. Weight, temperature and humidity sensor data of honey bee colonies in Germany, 2019–2022 / D. Senger, C. Gruber, T. Kluss, C. Johannsen // *Data in Brief*. 2024. Т. 52. Art. 110015.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.110015>

REFERENCES

1. Khalifa, S. A. M., Elshafiey, E. H., Shetaia, A. A., El-Wahed, A. A. A., Algethami, A. F., Musharraf, S. G., AlAjmi, M. F., Zhao, C., Masry, S. H. D., Abdel-Daim, M. M., Halabi, M. F., Kai, G., Al Naggar, Y., Bishr, M., Diab, M. A. M., & El-Seedi, H. R. (2021). Overview of Bee Pollination and Its Economic Value for Crop Production. *Insects*, 12(8), 688. <https://doi.org/10.3390/insects12080688>
2. The impact of ecosystem services on the intensification of agricultural production. (2021). *Economic Journal of Lesya Ukrainka Volyn National University*, 1(25), 37-51. <https://doi.org/10.29038/2786-4618-2021-01-37-51>
3. Warner, S., Pokhrel, L. R., Akula, S. M., Ubah, C. S., Richards, S. L., Jensen, H., & Kearney, G. D. (2024). A scoping review on the effects of Varroa mite (*Varroa destructor*) on global honey bee decline. *Science of The Total Environment*, 906, 167492. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167492>.
4. Lima, M. A. P., Cutler, G. C., Mazzeo, G., & Hrncir, M. (2022). Editorial: The decline of wild bees: Causes and consequences. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 1027169. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.1027169>
5. Rigakis, I., Potamitis, I., Tatlas, N.-A., Psirofonia, G., Tzagaraki, E., & Alissandrakis, E. (2023). A Low-Cost, Low-Power, Multisensory Device and Multivariable Time Series Prediction for Beehive Health Monitoring. *Sensors*, 23(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/s23031407>
6. Kviesis, A., & Zacepins, A. (2016). Application of neural networks for honey bee colony state identification. 2016 *17th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, 413–417. <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2016.7501133>
7. Sledevic, T. (2018). The Application of Convolutional Neural Network for Pollen Bearing Bee Classification. Sledevic, T. (2018). The Application of Convolutional Neural Network for Pollen Bearing Bee Classification. 2018 *IEEE 6th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/AIEEE.2018.8592464>
8. Braga, D., Madureira, A., Scotti, F., Piuri, V., & Abraham, A. (2021). An Intelligent Monitoring System for Assessing Bee Hive Health. *IEEE Access*, 9, 89009–89019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3089538>

9. Kwon, K.-H., Kim, J.-S., & Lee, H.-B. (2019). Forecast of Bee Swarming using Data Fusion and LSTM. *Journal of Digital Contents Society*, 20(1), Article 1. <https://doi.org/10.9728/dcs.2019.20.1.1>
10. Ruvunga, S., Hunter, G. J. A., Duran, O., & Nebel, J.-C. (2021). Use of LSTM Networks to Identify “Queenlessness” in Honeybee Hives from Audio Signals. 2021 *17th International Conference on Intelligent Environments (IE)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/IE51775.2021.9486575>
11. Khairul Anuar, N. H., Md Yunus, M. A., Baharudin, M. A., Ibrahim, S., Sahlan, S., & Faramarzi, M. (2023). An assessment of stingless beehive climate impact using multivariate recurrent neural networks. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 13(2), 2030. <https://doi.org/10.11591/ijece.v13i2.pp2030-2039>
12. Senger, D., Gruber, C., Kluss, T., & Johannsen, C. (2024). Weight, temperature and humidity sensor data of honey bee colonies in Germany, 2019–2022. *Data in Brief*, 52, 110015. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.110015>

Received 07.04.2025.
Accepted 10.04.2025.

Using time series and lstm neural networks for identification of hive states

Bees are an essential part of our ecosystem and economy. Given the threats facing bee populations, developing effective methods to monitor and conserve them is critically important. Traditional methods of monitoring bee colonies, such as visual inspections, hive weight monitoring, and acoustic analysis, have their limitations. Visual inspections are subjective, time-consuming, and can disrupt colony life. The aim of this study is to develop and evaluate methods employing time-series analysis and LSTM neural network architectures for the identification of various beehive states. The research focuses specifically on utilizing time-series data pertaining to hive weight and temperature, supplemented by temporal information (hour and month), to train models capable of distinguishing these different conditions.

Data for training includes relative hive weight/temperature and time/month details, sourced from dataset which contained crucial state/event labels. The preparation process involves handling data instability and gaps using metadata, aggregating the data (into 15-min or 4-hour intervals), applying interpolation and smoothing, performing feature engineering (like calculating relative weight change), segmenting data into time windows (6 hours for point states, 96 hours for global states), balancing the classes, and splitting the data into training and testing sets. Two LSTM models were developed. The first model identified point states (swarming, feeding, honey removal) using features like weight change, month, and hour, achieving 96% overall accuracy. The second model classified global states (normal function, colony death, spring warm-up, honey collection) using features such as weight change, temperature ratio, and month, reaching 92% overall accuracy. These results confirm the effectiveness of utilizing LSTMs combined with time-series sensor data for the reliable identification of diverse beehive states.

Key words: neural networks, LSTM, time series, tensorflow, weight monitoring, bee swarming, bees, bee hive monitoring

Жуков Олександр Олексійович – асистент кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету.

Горбенко Віталій Іванович – к.ф.м.н, доцент, доцент кафедри Програмної інженерії математичного факультету Запорізького національного університету.

Zhukov Oleksandr Oleksiiovych - Assistant, Department of Electronics, Information Systems and Software, Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebnia, Zaporizhia National University.

Horbenko Vitalii Ivanovych - candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, associate professor department of program engineering, faculty of Mathematics, Zaporizhzhia National University, Ukraine.

КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ПОЖЕЖ У СИСТЕМІ ОПЕРАТИВНО-ДИСПЕТЧЕРСЬКОГО УПРАВЛІННЯ

Анотація. У статті розглянуто можливості застосування сучасних інформаційних технологій, зокрема методів обробки великих даних, штучного інтелекту та машинного навчання, для аналізу оперативної інформації, накопиченої в системі оперативно-диспетчерського управління (СОДУ) Головного управління ДСНС України у Львівській області. Система функціонує з 2007 року й акумулює великий обсяг даних про надзвичайні події, включаючи інформацію про сили та засоби, типи подій, особовий склад, технічне забезпечення тощо.

Метою дослідження стало створення інформаційної моделі для аналізу й прогнозування ризикових ситуацій. У межах роботи реалізовано кілька етапів: попереднє структурування та очищення даних, формування вибірок за класифікаторами, деталізація типів пожеж, геокодування адрес і візуалізація результатів у вигляді теплових карт. Запропоновано підхід до семантичного аналізу текстових полів та групування подій за типами, що дає змогу гнучко формувати вибірки для подальших досліджень.

Ключові слова: великі дані, СОДУ, класифікація подій, пожежа, геовізуалізація, прогнозування ризиків, штучний інтелект, ДСНС України.

Розвиток інформаційних технологій, зокрема методів обробки великих даних, штучного інтелекту та машинного навчання, відкриває нові перспективи для багатовекторного аналізу накопиченої інформації. Це дозволяє значно швидше та точніше виявляти закономірності, прогнозувати ризики та приймати обґрунтовані управлінські рішення.

У Головному управлінні Державної служби України з надзвичайних ситуацій у Львівській області з 2007 року функціонує система оперативно-диспетчерського управління (СОДУ), яка акумулює значний обсяг оперативної інформації. Функціональні можливості СОДУ забезпечують диспетчерам оперативне ухвалення рішень щодо залучення необхідних сил і засобів для реагування на надзвичайні ситуації [1,2].

У базі даних системи міститься повна довідкова інформація, необхідна для ефективного прийняття рішень. Зокрема, вона включає відомості про особовий склад, залучений до бойового чергування; кількість ланок газодимозахисної служби; наявних водіїв; технічний парк у бойовому розрахунку та резерві із зазначенням його технічних характеристик; запаси пального та піноутворювача; аварійно-рятувальне обладнання

кожного транспортного засобу, згруповане за пожежно-рятувальними підрозділами всього гарнізону.

Окрім цього, у системі функціонує геоінформаційний портал, що надає актуальні дані щодо поточного стану оперативної обстановки, зокрема про активні події, залучені ресурси та стан джерел водопостачання. Також геоінформаційна система містить низку довідників із просторовою прив'язкою, включаючи інформацію [3,4] про потенційно небезпечні об'єкти, адміністративний поділ, державні пожежні частини, торфовища тощо рис. 1.

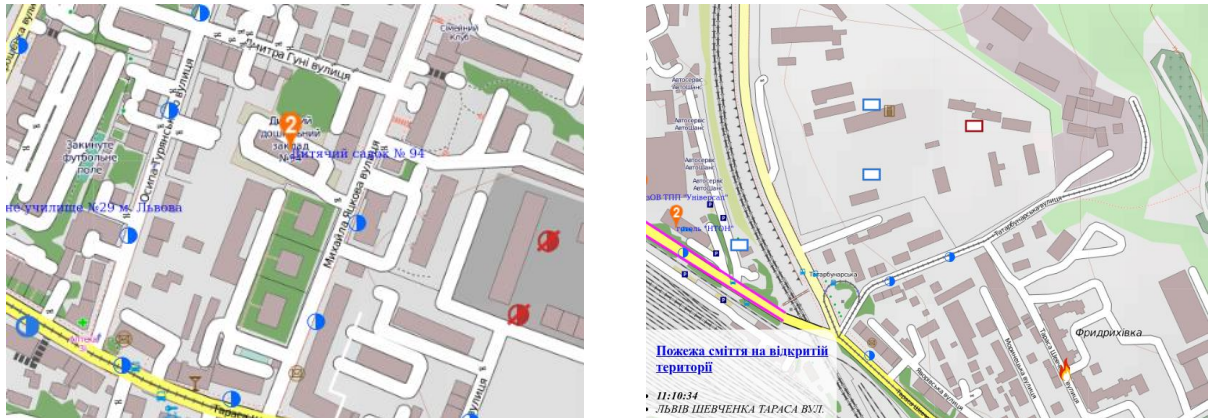


Рисунок 1 - Геопортал системи оперативно-диспетчерського управління

Основний потік даних, які обробляє система, стосується реєстрації подій, направлення сил та засобів, супроводу перебігу надзвичайних ситуацій (пожеж, ДТП тощо) та їх фіксації в архіві. Сам факт збереження таких даних уже має важливе значення, однак ще більшу цінність становить аналітичний потенціал цієї інформації у поєднанні з сучасними можливостями [5], які з'явилися з моменту впровадження СОДУ. Зокрема зацікавило можливість формування інформаційної моделі на основі цих даних для прогнозування ризикових ситуацій.

Задля досягнення цієї мети дослідження було структуроване у кілька основних етапів.

Перший етап дослідження передбачав попередню обробку даних, що включала структурування інформації, виявлення та корекцію помилок, перевірку орфографічної правильності, а також забезпечення коректності введення типів і класифікаційних ознак у відповідних полях бази даних [6,7]. Для реалізації пошуку семантично подібних слів було проведено токенизацію описів 400 000 подій, зареєстрованих у системі оперативно-диспетчерського управління (СОДУ). Усі описи було об'єднано в єдиний текстовий масив, на основі якого виокремлено унікальні слова з урахуванням орфографічних неточностей.

На наступному етапі використано фреймворк FastText [8] для аналізу отриманого тензора слів, що дало змогу ідентифікувати лексеми, які найчастіше вживаються у безпосередній близькості одна до одної в описах подій. Це забезпечило можливість визначення семантичних "сусідів" слів. У процесі аналізу було протестовано кілька підходів до моделювання семантичної схожості, зокрема моделі Skip-gram та CBOW. Перед

формуванням моделі проведено попередню підготовку даних: вилучено стоп-слова (лексичні одиниці без значного смислового навантаження) та ідентифіковано власні назви, такі як прізвища, імена, по батькові заявників і начальників караулів, а також спеціалізовані терміни, що не впливають на семантичний контекст.

На основі оброблених даних створено модель пошуку семантично схожих слів, яка знайшла практичне застосування у розробці веб-застосунку на базі Python Flask [9]. Цей інструмент дозволяє здійснювати пошук подій за змістовою схожістю, що є особливо корисним у випадках, коли користувач не має чіткого уявлення про формулювання пошукового запиту. Результати цього етапу візуалізовано на рис. 2.

Запит

Семантично близькі до **Пожежа сухої трави та чагарнику** слова:

чагарника; очерету; сухої; трави; чагарники; чагарників; чагарнику; стерні; чарагнику; трави; Пожежа

Data count is 26091

Дата	Тип	Місто	Адреса	Повідомлення
2024-09-28 18:11:11	6	ЗИМНА ВОДА	ГОРОДОЦЬКА ВУЛ. б/н	Пожежа сміття на відкритій території
2024-09-28 12:54:52	6	ВОЛСВИН		Пожежа сухої трави та чагарнику
2024-09-6	6	ОЖИДІВ		Пожежа сухої трави та

Рисунок - 2 Інтерфейс веб-застосунку для пошуку семантично схожих подій на основі даних СОДУ

Наступний етап дослідження передбачав формування вибірки на основі класифікаторів, інтегрованих у систему оперативно-диспетчерського управління (СОДУ). Для цього було розроблено SQL-запит [10,11,14], який забезпечував вибірку даних щодо кількості подій, віднесених до певного типу або класу. Важливо враховувати, що значна частка зареєстрованих подій мала навчальний, тренувальний або перевірочний характер. Такі заходи, як пожежно-тактичні навчання (ПТН), відпрацювання нормативів чи перевірка бойової готовності, спрямовані на вдосконалення практичних навичок особового складу в умовах відсутності реальних надзвичайних ситуацій.

Окрім того, діяльність пожежно-рятувальної служби не обмежується реагуванням на пожежі, адже вона виконує також функції рятувальної служби. Відповідно, до її компетенції належать виїзди на дорожньо-транспортні пригоди, паводки, стихійні лиха та надання допомоги населенню. Такі операції становлять значну частину загальної

кількості виїздів. Результати аналізу розподілу виїздів за типами та класами подій було узагальнено й представлено у відсотковому співвідношенні на рисунку 2.

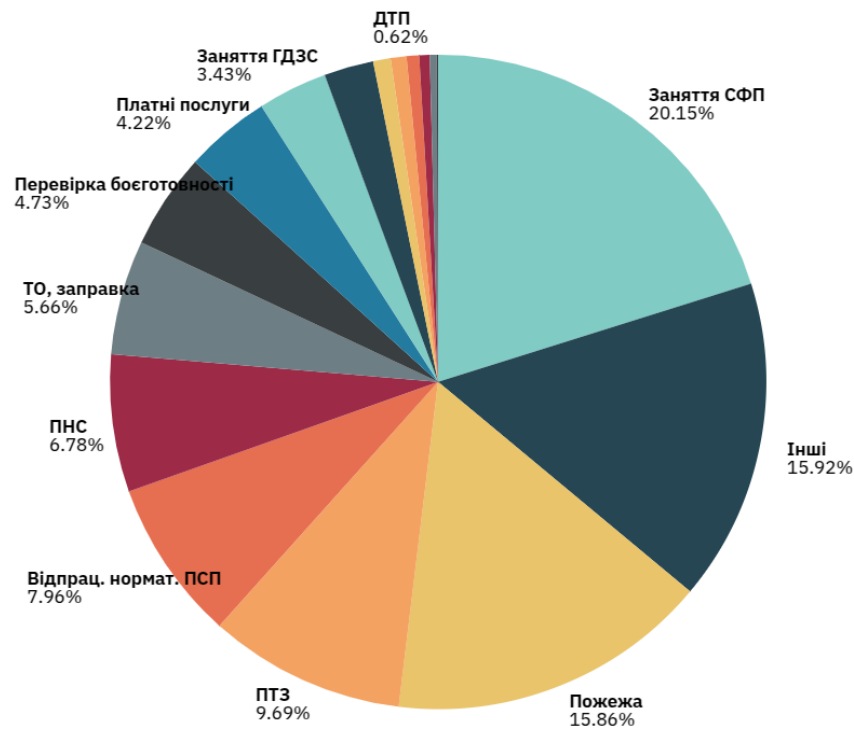


Рисунок - 3 Відсотковий розподіл виїздів пожежно-рятувальної служби за типами подій у системі СОДУ

Наступний етап дослідження був присвячений деталізації та розширенню типології пожеж шляхом виокремлення специфічних підкатегорій, які не знаходять прямого відображення в базовій структурі системи оперативно-диспетчерського управління (СОДУ). Такий підхід став необхідним для підвищення точності аналізу та прогнозування надзвичайних ситуацій на основі накопичених даних. Зокрема, аналіз повного обсягу зареєстрованих у базі пожеж дозволив умовно розподілити їх на дві основні категорії: пожежі, що виникають на відкритих територіях, і пожежі, локалізовані в межах забудови.

Ці категорії, у свою чергу, було піддано подальшій диференціації з урахуванням специфіки об'єктів і умов виникнення подій. До групи пожеж на відкритих територіях віднесено такі підкатегорії, як пожежі торфовищ, загоряння в екосистемах (ліси, степи, луки), а також інциденти, пов'язані із займанням сміття чи інших відходів. Водночас категорія пожеж у забудові охоплює ширший спектр об'єктів і включає підгрупи, такі як пожежі в житлових будинках приватного сектору, на промислових підприємствах, у торговельних центрах, складських приміщеннях та інших об'єктах господарської діяльності.

Запровадження такої деталізованої класифікації дало змогу не лише систематизувати наявні дані, а й виявити характерні закономірності виникнення пожеж залежно від типу території чи об'єкта. Це, у свою чергу, створює передумови для вдосконалення аналітичних моделей і підвищення ефективності управлінських рішень у діяль-

ності пожежно-рятувальної служби. Результати цього етапу класифікації представлено на рис. 4, який ілюструє типології пожеж.

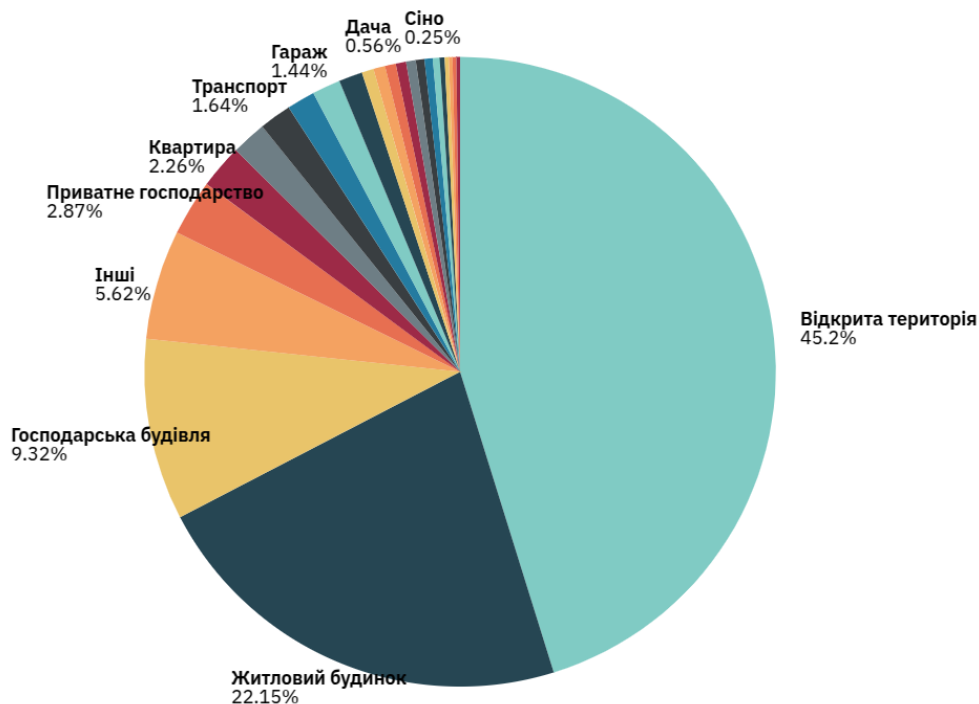


Рисунок - 4 Структура типології пожеж за основними категоріями в системі СОДУ

Завдяки проведеній категоризації подій за типами було забезпечено можливість гнучкого формування вибірок, що відкриває перспективи для подальшого аналізу впливу різноманітних чинників на виникнення та перебіг конкретних типів і підтипів надзвичайних подій. Такий підхід сприяє систематичному дослідженню залежностей між характеристиками подій і контекстуальними факторами, що їх детермінують.

На додаток до цього, було реалізовано механізм геокодування [12], який конвертує текстові адреси у просторові координати, що дало змогу кількісно оцінити кореляцію між виникненням ризикових ситуацій і територіальними характеристиками об'єктів. Цей етап став основою для створення аналітичних інструментів із високим рівнем просторової деталізації.

Особливу увагу приділено візуалізації отриманих даних, яка відіграє ключову роль у представленні результатів дослідження. Для цього використано теплові карти, що відображають інтенсивність виникнення надзвичайних подій залежно від їхнього географічного розташування. Важливість такого підходу полягає у його здатності наочно ілюструвати просторові закономірності [13], полегшуючи інтерпретацію складних даних. Гнучкість формування запитів для побудови теплових карт забезпечується завдяки інтеграції фільтрів за часом і типами подій, що дозволяє адаптувати візуалізацію до специфічних аналітичних потреб. Крім того, розроблена система передбачає можливість накладання результатів попередніх пошуків один на одного, що значно розширює потенціал порівняльного аналізу та виявлення довгострокових тенденцій.

Ці функціональні можливості підвищують ефективність представлення аналітичних висновків і сприяють прийняттю обґрунтованих управлінських рішень.

Результати цього етапу, включно з прикладом теплової карти та доступними фільтрами, представлено на рис. 5.

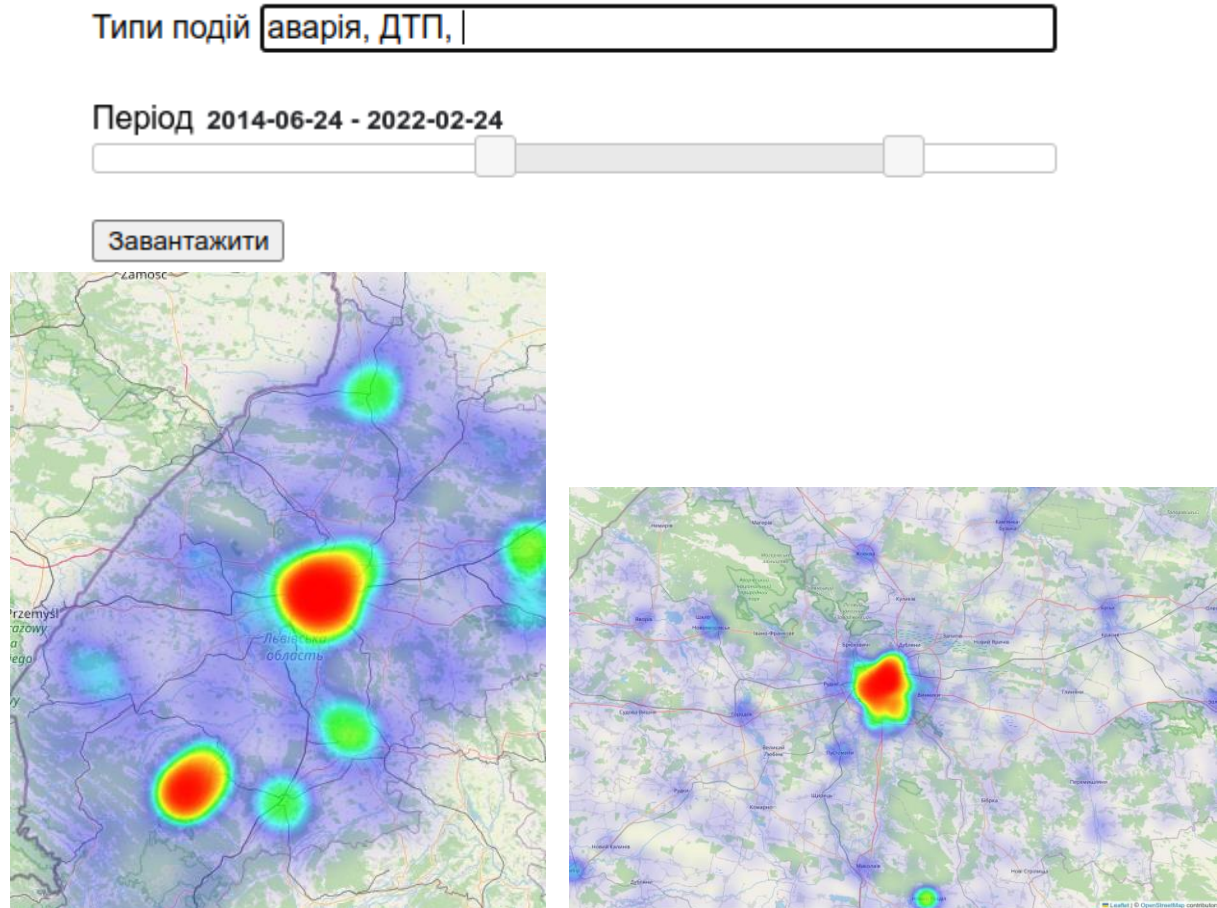


Рисунок - 4 Теплова карта інтенсивності надзвичайних подій із гнучкими фільтрами за часом і типами у системі СОДУ

Результати. У процесі дослідження встановлено, що інформація, накопичена в системі оперативно-диспетчерського управління (СОДУ), має значний аналітичний потенціал для прогнозування надзвичайних ситуацій. Проведено багаторівневе структурування та класифікацію подій, що дало змогу деталізувати типологію пожеж шляхом виокремлення нових підкатегорій, які не були представлені в базовій структурі СОДУ. Зокрема, вдалося систематизувати дані, розподіливши пожежі на основні групи та їхні підтипи, що сприяло поглибленому розумінню специфіки таких подій.

Одним із ключових етапів обробки даних стало геокодування текстових адрес із подальшим перетворенням їх у просторові координати, що уможливило аналіз територіальних закономірностей виникнення надзвичайних ситуацій. Для реалізації цього процесу використано сучасні геоінформаційні технології, зокрема сервіс Nominatim, який забезпечує точне зіставлення адрес із координатами, а також розширення PostGIS для бази даних PostgreSQL, що підтримує ефективну обробку просторових запитів. От-

римані геопросторові дані стали основою для кількісної оцінки інтенсивності надзвичайних подій залежно від географічних характеристик об'єктів.

Візуалізація результатів здійснювалася за допомогою теплових карт, які наочно відображають просторові кореляції. Для цього застосовано JavaScript-фреймворк Leaflet, що забезпечує інтерактивне відображення картографічних даних, у поєднанні з відкритим сервісом рендерингу просторових даних за протоколом Web Map Service (WMS). Ці інструменти дозволили стилізувати та ефективно представляти географічну інформацію, адаптуючи її до потреб аналізу. Розроблена аналітична модель вирізняється гнучкістю у формуванні вибірок, що відкриває можливості для дослідження впливу різноманітних факторів на динаміку подій.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило високу цінність накопичених у СОДУ даних як основи для прогнозної аналітики та підвищення ефективності реагування на надзвичайні ситуації в діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС). Запропонований підхід до структурування та візуалізації інформації створив міцну основу для інтеграції інтелектуальних інструментів у процеси прийняття управлінських рішень.

Перспективи подальших досліджень охоплюють кілька ключових напрямів. По-перше, вдосконалення моделі можливе через інтеграцію додаткових джерел даних, таких як метеорологічні показники чи інформація з IoT-пристроїв, що підвищить точність прогнозів. По-друге, методологію доцільно адаптувати до аналізу інших типів надзвичайних ситуацій, зокрема повеней чи техногенних аварій, для розробки універсального аналітичного інструменту. Нарешті, створення інтерактивних веб-інтерфейсів із функцією накладання результатів аналізу може трансформувати модель у практичний інструмент реального часу для оперативного планування та управління ресурсами ДСНС.

ЛІТЕРАТУРА

1. Шопський О.М., Придатко О.В. Модель кластеризації даних для формування вибірки з метою прогнозування ризикових ситуацій. Збірник тез доповідей VI Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених, студентів і курсантів 30.11.2023. - Львів, ЛДУ БЖД, 2023. - С.466-468.
2. Martyn Ye. Software for Shelter's Fire Safety and Comfort Levels Evaluation / Martyn Ye., Smotr O., Burak N., Prydatko O., Malets I. //Communications in Computer and Information Science, Springer, Cham. – Vol. 1158, 2020. pp. 457-469 https://doi.org/10.1007/978-3-030-61656-4_31
3. PostGIS. *PostGIS*. URL: <https://postgis.net> (дата звернення: 27.02.2025).
4. Leaflet – an open-source JavaScript library for interactive maps. *Leaflet - a JavaScript library for interactive maps*. URL: <https://leafletjs.com> (дата звернення: 03.02.2025).
5. Гаврись А. П., Пекарська О. Аналіз існуючих програмних продуктів, що використовуються для прогнозування виникнення надзвичайних ситуацій. 2021. URL: <http://sci.ldubgd.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/9262>.

6. В.Ф. Старко, Андрій Рисін, Великий електронний словник української мови (ВЕСУМ) як засіб NLP для української мови // Галактика Слова. Галині Макарівні Гнатюк / Ін-т укр. мови НАН України. - К.: Вид. дім Дмитра Бурого, 2020. - С. 135–141.
7. Черниш О., Панченко Н. Сучасні корпусні технології у створенні електронного словника. Проблеми гуманітарних наук Серія Філологія. 2023. № 53. С. 94–98. URL: <https://doi.org/10.24919/2522-4565.2023.53.11>.
8. FastText. *fastText*. URL: <https://fasttext.cc> (дата звернення: 06.04.2025).
9. Pallets Projects. Flask. URL: <https://flask.palletsprojects.com> (дата звернення: 02.10.2023).
10. Шопський О.М., Придатко О.В., Малець І.О. Аналітика великих масивів даних для прогнозування ризикових ситуацій. Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості : матеріали 16 Міжнародної конференції 15.12.2021. – Дніпро, НУ «ДП», 2021. – С. 212-214.
11. PostgreSQL. URL: <https://www.postgresql.org> (дата звернення: 03.02.2025).
12. Nominatim. *Nominatim*. URL: <https://nominatim.org> (дата звернення: 02.03.2025).
13. Кластеризація регіонів України за рівнем небезпеки та шляхи підвищення ефективності функціонування єдиної державної системи цивільного захисту в умовах невизначеності вхідної інформації про виникнення надзвичайних ситуацій / В. Тютюнник та ін. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2021. № 1(11). С. 75–84. URL: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.1\(11\).75-84](https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.1(11).75-84).
14. Рисін А., Старко В. Великий електронний словник української мови (ВЕСУМ). Вебверсія 6.5.2. 2005-2024. URL: <https://vesum.nlp.net.ua/>

REFERENCES

1. Shopsyki O.M., Prydatko O.V. Model klasteryzatsii danykh dlia formuvannia vybirky z metoiu prohnozuvannia ryzykovykh sytuatsii. Zbirnyk tez dopovidei VI Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii molodykh uchenykh, studentiv i kursantiv 30.11.2023. - Lviv, LDU BZhd, 2023. - S.466-468. [in Ukrainian]
2. Martyn Ye. Software for Shelter's Fire Safety and Comfort Levels Evaluation / Martyn Ye., Smotr O., Burak N., Prydatko O., Malets I. //Communications in Computer and Information Science, Springer, Cham. – Vol. 1158, 2020. pp. 457-469 https://doi.org/10.1007/978-3-030-61656-4_31
3. PostGIS. PostGIS. URL: <https://postgis.net> (date of access: 27.02.2025).
4. Leaflet – an open-source JavaScript library for interactive maps. *Leaflet - a JavaScript library for interactive maps*. URL: <https://leafletjs.com> (date of access: 03.02.2025).
5. Havrys A. P., Pekarska O. Analiz isnuichykh prohramnykh produktiv, shcho vykorystovuiutsia dlia prohnozuvannia vynykennia nadzvychainykh sytuatsii. <http://sci.ldubgd.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/9262>. [in Ukrainian].
6. V. F. Starko, Andrii Rysin, Velykyi elektronnyi slovnyk ukrainskoi movy (VESUM) yak zasib NLP dlia ukrainskoi movy // Halaktyka Slova. Halyni Makarivni Hnatiuk / In-t ukr. movy NAN Ukrainy. — K. : Vyd. dim Dmytra Buraho, 2020. — S. 135–141. [in Ukrainian].
7. Chernysh O., Panchenko N. Suchasni korpusni tekhnolohii u stvorenni elektronnoho slovnyka. Problemy humanitarnykh nauk Seriia Filolohiia. 2023. № 53. S. 94–98. URL: <https://doi.org/10.24919/2522-4565.2023.53.11>. [in Ukrainian].

8. FastText. (n.d.). fastText. Retrieved April 6, 2025, from <https://fasttext.cc> (date of access: 06.04.2025).
9. Pallets Projects. Flask. URL: <https://flask.palletsprojects.com> (date of access: 02.10.2023).
10. Shopsyki O.M., Prydatko O.V., Malets I.O. Analitika velykykh masyviv danykh dlia prohnozuvannia ryzykovykh sytuatsii. Problemy vykorystannia informatsiinykh tekhnolohii v osviti, nautsi ta promyslovosti: materialy 16 Mizhnarodnoi konferentsii 15.12.2021. – Dnipro, NU «DP», 2021. – S. 212-214. [in Ukrainian].
11. PostgreSQL. PostgreSQL. URL: <https://www.postgresql.org> (date of access: 03.02.2025).
12. Nominatim. Nominatim. URL: <https://nominatim.org> (date of access: 02.03.2025).
13. Klasteryzatsiia rehioniv Ukrainy za rivnem nebezpeky ta shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti funktsionuvannia yedynoi derzhavnoi systemy tsyvilnoho zakhystu v umovakh nevyznachenosti vkhidnoi informatsii pro vynykennia nadzvychainykh sytuatsii / V. Tiutiunyk ta in. Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka. 2021. № 1(11). S. 75–84. URL: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.1\(11\).75-84](https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.1(11).75-84). [in Ukrainian]
14. Rysin A., Starko V. Velykyi elektronnyi slovnyk ukrainskoi movy (VESUM). Vebversiiia 6.5.2. 2005-2024. URL: <https://vesum.nlp.net.ua>. [in Ukrainian]

Received 07.04.2025.

Accepted 10.04.2025.

Classification and spatial analysis of fires in the operational dispatch management system

The article explores the potential of applying modern information technologies, specifically big data processing methods, artificial intelligence, and machine learning, to analyze operational information accumulated within the Operational Dispatch Management System (ODMS) of the Main Directorate of the State Emergency Service of Ukraine in Lviv Region. Operational since 2007, this system has amassed a substantial volume of data on emergency incidents, encompassing details about response forces and resources, event types, personnel, technical equipment, and more.

The study aimed to develop an information model for the analysis and prediction of risk scenarios. Several stages were implemented within the research framework: preliminary data structuring and cleaning, sample formation based on classifiers, detailed categorization of fire types, geocoding of addresses, and visualization of results through heatmaps. Additionally, an approach to semantic analysis of textual fields and event clustering by type was proposed, enabling flexible sample generation for subsequent investigations.

Keywords: Big data, event classification, fire, geovisualization, risk prediction, State Emergency Service of Ukraine.

Шопський Орест Михайлович - ад'юнкт кафедри інформаційних технологій та систем електронних комунікацій, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності.

Малець Ігор Остапович - к.т.н., доцент, кафедра інформаційних технологій та систем електронних комунікацій, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності.

Shopsyki Orest - Adjunct Professor of the Department of Information Technologies and Electronic Communications Systems, Lviv State University of Life Safety.

Malets Igor - Ph.D., Associate Professor, Department of Information Technologies and Electronic Communications Systems, Lviv State University of Life Safety.

ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ СКЛАДСЬКОГО ОБЛІКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Анотація. Зростання значення складської логістики в умовах глобалізації та цифрової трансформації економіки вимагає підвищення ефективності управління запасами. Традиційні методи обліку не здатні забезпечити необхідну точність і швидкість аналізу великих обсягів даних, що призводить до втрат і зниження конкурентоспроможності. Використання ШІ відкриває нові можливості для автоматизації процесів, оптимізації ресурсів і прогнозування попиту в реальному часі. У статті розглянуто метод інтернет-речі (IoT) та системи управління складами (WMS). Правильна система інвентаризації буде залежати від індивідуальних потреб і можливостей. Для успішного впровадження ШІ в логістику необхідний комплексний підхід, що включає розробку чіткої стратегії впровадження ШІ, враховуючи мету, ресурси та потенційні ризики.

Ключові слова: штучний інтелект, логістика, управління, запаси, складський облік, інтернет-речі, розподіл.

Вступ. У сучасному світі проблеми логістики, як і багатьох інших технічних галузей, намагаються вирішити за допомогою штучного інтелекту. Для успішного вирішення завдань оптимізації складського обліку необхідно застосовувати сучасні технології, а також оцінити рівень впровадження штучного інтелекту в логістичні системи.

При аналізі існуючих робіт за цією темою, як вітчизняних вчених так і закордонних колег, спостерігається деяка суперечливість суджень [1-12]. Серед найбільш актуальних робіт можна виділити наступних авторів: Е. Барді, А. М. Гаджинський, О. В. Горбенко, Д. Дж. Бауерсокс, Д. Дж. Клосс, Дж. Л. Кавінато, Дж. Д. Паф, Дж. Шاپіро, М. Крістофер, Р. Б. Івуть, А. Г. Кальченко, Є. В. Крикавський, М. К. Купер, Д. М. Ламберт, С. А. Нарушевич, М. А. Окландер, Г. А. Плахута, Ю. В. Пономарьова, В. І. Сергєєв, І. В. Федькович, Ю. В. Кравчиката та ін.

Робота складу являє собою складний комплекс взаємопов'язаних процесів, кожен з яких вимагає ретельного контролю для забезпечення ефективної роботи системи в цілому. Ці процеси включають організацію складського простору та його оптимізацію, урахування товарів та регулярну інвентаризацію, обробку замовлень та доставку продукції з відповідною документацією.

Існує три основні категорії складських операцій:

1. Забезпечення запасів. Поставка товарів на склад включає в себе прийом продукції від постачальників, перевірку її кількості та якості та введення даних в облікову систему. Головна мета полягає в тому, щоб знайти оптимальну кількість товарів на складі без надлишку або недоліку.

2. Складський облік. Утримання оптимальної кількості товарів на складі з їх розміщенням у різних місцях, регулярний контроль за ними, проведення інвентаризації та урахування залишків для забезпечення обліку продукції.

3. Робота з розподілом. Підготовка та контроль виконання замовлень, відвантаження товарів клієнтам або доставка на інші склади, організація логістики доставки та управління оборотом упаковки.

Кожен із цих процесів вимагає значних зусиль і фінансових ресурсів. Традиційні методи урахування на складі часто не справляються з розвиненим об'ємом даних і потребою в оновленій інформації [11].

Загалом сучасні дослідження визначають потенційні переваги та виклики впровадження інноваційних технологій в управління логістикою підприємств.

Серед переваг можна відзначити: підвищення ефективності, мінімізація витрат, оптимізація маршрутів, покращення якості обслуговування, зменшення часу доставки, точне управління запасами, автоматизація процесів, управління в реальному часі, орієнтир на екологічні принципи.

В той самий час сучасні склади стикаються з низкою проблем. Серед яких: неточності в інвентаризації; неефективне використання простору; затримки в обробці замовлень; складність у відборі товарів у реальному часі; високі операційні витрати [6].

Огляд існуючих рішень. Однак наряду з можливостями інтеграції ШІ в логістичну галузь також виникають проблеми. Вона підіймає питання про безпеку даних, етичні стандарти і нормативні аспекти використання штучного інтелекту. Також важливо врахувати потенційний соціальний та економічний вплив ШІ на логістику, особливо в контексті змін на ринку праці та взаємодії з людськими ресурсами.

Одним з важливих питань є вибір і оптимізація алгоритмів. Вибір правильного алгоритму машинного навчання або методу глибокого навчання може вплинути на ефективність і точність системи.

Підходи, які використовуються для прогнозування попиту, маршрутизації транспорту або управління запасами, повинні бути ретельно вивчені та оптимізовані для конкретних логістичних завдань.

Ще одним важливим аспектом є інтеграція ШІ з існуючими логістичними системами. Це може включати: розробку API, створення інтерфейсів для взаємодії між різними системами та адаптацію існуючих даних форматах, які можуть зрозуміти ШІ.

Питання масштабування є ще однією областю, що викликає труднощі. По мірі зростання обсягу даних і завдань, які необхідно обробляти, може виникнути необхідність в оптимізації архітектури системи, використанні розподілених обчислень і опрацюванні великих обсягів даних в режимі реального часу.

Один з методів, який набирає популярність в Україні, це інтернет-речі (IoT) [1]. Він представляє собою революційну концепцію в світі сучасних технологій, особливо в контексті складського обліку. Це мережа взаємозв'язаних пристроїв, здатних автономно збирати, передавати та обробляти дані, відкриваючи широкі можливості для оптимізації складських процесів, підвищення точності обліку та значного зниження операційних витрат [3].

У сфері складського обліку використовується цілий ряд IoT-пристроїв, кожен з яких відіграє свою унікальну роль у підвищенні ефективності роботи. Одним із ключових елементів є RFID-мітки та лічильники. Ця технологія дозволяє автоматично ідентифікувати об'єкти за допомогою радіосигналів, що особливо корисно для швидкої та точної інвентаризації, а також для відстеження переміщення товарів у реальному часі. RFID-мітки, прикріплені до товарів [9], піддонів або контейнерів, значно знижують ймовірність помилок при комплектації замовлень і спрощують процес управління запасами.

В останні роки набула популярності системи управління складами (WMS). WMS-система (Warehouse Management System, система управління складом) – це система автоматизації складу з адресним зберіганням, яка дозволяє оперативно, в режимі реального часу управляти складом; отримувати інформацію про стан складу в будь-яких розрізах; оптимізувати використання всіх матеріальних, фінансових, трудових ресурсів складу за допомогою планування, аналізу завантаженості складського простору та доступності товарів.

В основі даних системи лежать технології:

- автоматична ідентифікація з використанням радіохвиль (RFID) для розрахунку кодів RF-міток або станцій сканування штрих-кодів;
- адресного (коміркового) зберігання з розподілом місця зберігання товарів на складі з урахуванням усіх вимог умов зберігання;
- віддаленого управління персоналом за допомогою Терміналів Збору Даних (ТЗД);
- мобільних комп'ютерів, працюючих з Wi-Fi та технологією радіочастотної ідентифікації (RFID)

Переваги використання WMS. Системи WMS створені спеціально для того, щоб максимально оптимізувати функції оперативного управління складом з адресним зберіганням і підвищити саму ефективність бізнесу в усьому. Підвищення ефективності виконання складських операцій є одним із шляхів зниження витрат компанії, що дає певні конкурентні переваги в сучасному конкурентному бізнес-середовищі. Система WMS дозволяє вирішувати весь комплекс завдань в рамках 3-х головних операцій на складі: прийняття, розміщення, відправки.

В рамках процесу прийому система WMS дозволяє: оперативно забезпечувати службу прийому інформації про очікувані надходження; керувати власним процесом прийому з відстеженням кількості, якості та подальшого переміщення товару після прийому (транзитним клієнтом або на визначеному, зазначеному в системі місці);

сформувати опис і пакет документів по кожному новому товару на складі; оперативно відправляти дані про нові товари в корпоративну інформаційну систему компанії.

Логістика розміщення в системі здійснюється автоматично з мінімальною участю персоналу за заданими критеріями побудови комірок зберігання та правил зберігання запасів. Це дозволяє знизити ризик дефекту та втрати, збільшити швидкість розміщення товару та максимально оптимізувати складський простір.

Система WMS забезпечує більшу точність роботи складу в процесі відвантаження: відбір і комплектації замовлення з формуванням оптимального порядку з мінімальним числом переміщень виходячи з відповідності; звільнення комірок і оптимізації зберігання відповідно до вимог, що пред'являються бізнесом до товару, що зберігається, специфіки компанії і самих товарів (наприклад, відвантаження перших товарів, що поступили на склад раніше всього - принцип FIFO); всебічна перевірка відбору за критеріями, заданими в системі (вага, якість, кількість та ін.); автоматичні комплектації палет відповідно до заданих вимог конкретного замовлення.

Сучасні системи WMS підтримують також і операції «оберненої логістики», тобто повернення відвантажених раніше товарів. Використання системи управління адресним складом дає компанії безсумнівні переваги в областях: реалізації стратегії та мети компанії; забезпечення більш точної та чіткої взаємодії в ланцюзі постачань; формування найбільш повної бази даних по складським операціям, необхідної для прийняття правових управлінських рішень; оптимізація трудових ресурсів організації та їх мотивації на результат; від 10 до 20% збільшується пропускна здатність складу; середній час стандартних операцій (прийом, відвантаження, переміщення) скорочується в 3 рази; на 40% знижується резерв складського запасу; скорочується на чверть кількість необхідного персоналу; паперовий документообіг скорочується до мінімуму [7].

Двома найвідомішими методами управління запасами є VMI (Vendor-Managed Inventory), або «запаси, керовані постачальником», і JIT(Just-in-Time) , або «точно вчасно». Обидва допомагають виробникам зменшити витрати та підвищити операційну ефективність.

Логістика наразі знаходиться на тому етапі розвитку, коли існують різні альтернативні шляхи управління запасами. Підприємство-покупець замість того, щоб оформлювати замовлення постачальнику на поставку, може обмінюватися з ним інформацією про запит або продаж продукції, а також наявні в покупця запаси. Іншими словами, постачальник бере на себе відповідальність за поповнення запасів споживача. Дана система отримала назву «управління запасами постачальника» або технологію VMI (Vendor Managed Inventory).

VMI – це спосіб оптимізації діяльності в ланцюзі поставок, в рамках якого постачальник отримує доступ до даних про запаси клієнта і зобов'язаний підтримувати їх на заздалегідь оголошеному рівні [4].

Саме VMI-підхід дозволяє скоротити логістичні витрати на зберігання та обслуговування запасів за рахунок взаємодії покупця та постачальника. Використання цієї системи вигідно як споживачам, так і постачальникам, оскільки споживачі можуть зни-

зити рівень запасів, постачальник отримує можливість більш точного планування графіка виробництва та розподілу через обмін інформацією зі споживачем [8].

Практична реалізація технології VMI на підприємстві може бути запроваджена на практиці наступним шляхом [5]: розміщення товарів на території компанії-замовника без сплати до тієї пори, коли цей товар не використаний або не проданий; постійна присутність представника постачальника на території замовника; регулярні поставки до заздалегідь встановленого рівня покупця; самостійний аналіз і прийняття рішень про замовлення поставок товарів постачальником.

Переваги для споживача: покращений аналіз ринку (поняття купівельних переваг); збільшення продажу; зниження рівня товарно-матеріальних цінностей; зниження рівня запасів.

Переваги для постачальника: скорочення часу і затрат на управління поповненням запасів; збільшення продажу за рахунок зменшення великої кількості запасів.

ЛІТ – це збалансована система, яка забезпечує плавний і швидкий потік матеріалів крізь систему. Основна ідея полягає в тому, щоб зробити процес найкоротшим, використовуючи ресурси оптимальним способом. Ступінь досягнення цієї мети залежить від того, наскільки досягнуті додаткові (допоміжні) цілі, такі як: виключення збоїв та порушень процесу виробництва; розробка гнучкої системи; скорочення часу підготовки до процесу та загалом всіх виробничих термінів; зведення до мінімуму матеріальних запасів; виключення зайвих витрат.

Час підготовки і виробничі терміни подовжують процес, нічого не додаючи при цьому до вартості виробів. Крім того, тривалість цих термінів негативно впливає на гнучкість системи. Отже, їх скорочення дуже важливе і є однією з цілей постійного удосконалення [10].

Логістична концепція ЛІТ характеризується наступними параметрами: мінімальними (нульовими) гарантійними/страховими запасами матеріальних ресурсів (МР), напівфабрикатів (НП) та готової продукції (ГП); короткими виробничими (логістичними) циклами; невеликими об'ємами виробництва ГП і поповнення запасів; взаємовідносинами (по закупівлям МР) з невеликою кількістю надійних постачальників і перевізників; ефективною інформаційною підтримкою; високою якістю ГП та логістичного сервісу.

Система ЛІТ – це система, яка використовується переважно в серійному виробництві.

Впровадження концепції ЛІТ має як позитивні, так і негативні сторони.

Ключова перевага ЛІТ систем – знижений рівень запасів і як результат - скорочення складських приміщень, висока якість, гнучкість, скорочення термінів виробництва, висока продуктивність, підвищення продуктивності та ефективності використання обладнання, своєчасна доставка, зниження об'ємів браку та переробок, а також зменшені вимоги до складських приміщень.

До недоліків системи ЛІТ відносяться:

- низький рівень запасів робить будь-які зриви у роботі логістичної системи критичними;

- для введення системи можуть знадобитися великі зміни, яких складно досягнути на практиці [12].

Зрештою, правильна система інвентаризації залежатиме від індивідуальних потреб і можливостей [2].

Висновки. Для успішного впровадження ІІІ в логістику необхідний комплексний підхід, що включає розробку чіткої стратегії впровадження ІІІ, враховуючи мету, ресурси та потенційні ризики. Постійне навчання та вдосконалення алгоритмів ІІІ, відповідно до конкретних логістичних завдань, безпеки даних та захисту конфіденційної інформації, а також розробку етичних принципів ІІІ, що гарантують справедливість, прозорість та контроль. У зв'язку з цим подальше дослідження, удосконалення та актуалізація стратегій впровадження автоматизованих технологій для ефективного розвитку інтеграції ІІІ у логістичні процеси та досягнення поставленої мети є актуальними.

ЛІТЕРАТУРА

1. Про схвалення Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні : розпорядження Кабінету міністрів України від 02.12.2020 №1556 р.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-2020-%D1%80#Text> (дата звернення: 20.03.2025).
2. Саєнко Д. О., Колісник Т. П. Основні напрями за стосування технологій штучного інтелекту у кібербезпеці. Протидія кіберзлочинності та торгівлі людьми: збірн. матер. міжнар. наук. прак. конф. (м. Вінниця, 31 трав. 2023 р.). Вінниця, 2023. С. 158—160.
URL: <https://dspace.univd.edu.ua/server/api/core/bitstreams/a4964b25-1ca1-453a-b29b-96cfaf14d664/content> (дата звернення: 20.03.2025).
3. Перспективи застосування штучного інтелекту в логістиці. URL: <https://logist.fm/news/perspektivi-zastosuvannya-shtuchnogo-intelektu-v-logistici> (дата звернення: 19.03.2025).
4. Штучний інтелект у логістиці та вантажних перевезеннях. [Електронний ресурс]. – https://logist.today/dnevnik_logista-uk/2019-12-22/iskusstvennyj-intellekt-v-logistike-i-gruzovyh-perevozkah-2/ (дата звернення: 19.03.2025)
5. Резнік Н. П., Руденко С. В., Пилипчук К. М. Основні характеристики поняття логістики і системи управління ланцюгами постачань. Innovation and Sustainability. 2022. №3. С. 95-102.
6. Автоматизація та роботизація складу і логістичних підприємств . [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sunone.com.ua/articles-uk/avtomatizaciya-ta-robotizaciya-skladu-i-logistichnih-pidpriemstv/>
7. Штучний інтелект у логістиці та вантажних перевезеннях. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://logist.today/uk/dnevnik_logista/2019-12-22/iskusstvennyj-intellekt-v-logistike-i-gruzovyhperevozkah/
8. What Is The Difference Between VMI and Just In Time? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.bcepi.com/fasteners-101/vendor-managed-inventory-or-just-in-time> *Transport. Challenging an Unconscious Bias in Logistics.*

<https://fueltransport.com/challenging-unconscious-bias/>

9. Позняк, О., Мельник, К. (2020). Логістичні аспекти штучного інтелекту в управлінні товарами стратегічного призначення. Науковий погляд: економіка та управління, 3(69), 153–158. <https://doi.org/10.32836/2521-666X/2020-69-25>
10. Музиченко, Т., Скорба, О., & Шевчук, А. (2023). Штучний інтелект як засіб оптимізації бізнес процесів в електронній комерції. Академічні візії, (25). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10081884>
11. Кальченко А. Г. Логістика: Підручник. К. : КНЕУ, 2004. 284 с.
12. Кислий В. М., Біловодська О. А., Олефіренко О. М., Смоляник О. М. Логістика: Теорія та практика: Навч. посіб. К.: Центр учбової літератури, 2010. 360 с.

REFERENCES

1. On approval of the Concept of the Development of Artificial Intelligence in Ukraine: Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 02.12.2020 №1556 r. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-2020-%D1%80#Text>
2. Sayenko D. O., Kolisnyk T. P. Main directions for the application of artificial intelligence technologies in cybersecurity. Counteraction to cybercrime and human trafficking: collected materials of the international scientific practical conference (m. Vinnytsya, 31 trav. 2023 r.). Vinnytsya, 2023. S. 158—160. URL: <https://dspace.univd.edu.ua/server/api/core/bitstreams/a4964b25-1ca1-453a-b29b-96cfaf14d664/content>.
3. Prospects for the application of artificial intelligence in logistics. URL: <https://logist.fm/news/perspektivi-zastosuvannya-shtuchnogo-intelektu-v-logistici>.
4. Artificial intelligence in logistics and freight transportation. [Electronic resource]. – https://logist.today/dnevnik_logista-uk/2019-12-22/iskusstvennyj-intellekt-v-logistike-i-gruzovyh-perevozkah-2/ (data zvernennya: 19.03.2025)
5. Reznik N. P., Rudenko S. V., Pylypchuk K. M. The main characteristics of the concept of logistics and supply chain management systems. Innovation and Sustainability. 2022. №3. S. 95-102.
6. Automation and robotization of warehouses and logistics enterprises. [Electronic resource]. – Rezhym dostupu: <https://sunone.com.ua/articles-uk/avtomatizaciya-ta-robotizaciya-skladu-i-logistichnih-pidpriemstv/>
7. Artificial intelligence in logistics and freight transportation. [Electronic resource]. – Rezhym dostupu: https://logist.today/uk/dnevnik_logista/2019-12-22/iskusstvennyj-intellekt-v-logistike-i-gruzovyhperevozkah/
8. What Is The Difference Between VMI and Just In Time? [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.bcepi.com/fasteners-101/vendor-managed-inventory-or-just-in-time>uel Transport. Challenging an Unconscious Bias in Logistics. <https://fueltransport.com/challenging-unconscious-bias/>
9. Poznyak, O., Mel'nyk, K. (2020). Logistic aspects of artificial intelligence in the management of strategic goods. Scientific view: economics and management, 3(69), 153–158. <https://doi.org/10.32836/2521-666X/2020-69-25>

10. Muzychenko, T., Skorba, O., Shevchuk, A. (2023). Artificial intelligence as a means of optimizing business processes in electronic commerce. *Akademichni vizyiyi*, (25). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10081884>
11. Kal'chenko A.H. *Lohistyka: Textbook*. K. : KNEU, 2004. 284 s
12. Kyslyy V.M., Bilovods'ka O.A., Olefirenko O.M., Smolyanyk O.M. *Logistics: Theory and Practice: Textbook*. K.: Tsentr uchbovoyi literatury, 2010. 360

Received 09.04.2025.

Accepted 11.04.2025.

Overview of existing warehouse accounting technologies using artificial intelligence

The modern pace of industrial development requires new approaches to solving logistics problems. To achieve the necessary effect of automation, rationally use artificial intelligence. IoT technologies and warehouse management systems (WMS). As well as just-in-time inventory management methods and VMI (Vendor-Managed Inventory), or “supplier-managed inventory”, allow to partially solve these issues. Each of the considered methods has its own advantages and disadvantages. Therefore, the optimal choice depends on the specific task. For the successful implementation of artificial intelligence in logistics, a comprehensive approach is required, which includes the development of a clear strategy for the implementation of artificial intelligence, taking into account the goal, resources and potential risks. Continuous training and improvement of artificial intelligence algorithms, in accordance with specific logistics tasks, data security and protection of confidential information, as well as the development of ethical principles of artificial intelligence that guarantee fairness, transparency and control. In this regard, further research, improvement and updating of strategies for the implementation of automated technologies for the effective development of artificial intelligence integration logistics processes and achievement of the set goal are relevant.

Журба Анна Олексіївна - доцент кафедри Інформаційних технологій і систем ННІ «Дніпропетровський металургійний інститут» УДУНТ.

Модзалевський Єгор Олександрович – аспірант спеціальності 122 Комп’ютерні науки, Український державний університет науки та технологій. Навчально-науковий інститут «Дніпропетровський металургійний інститут».

Zhurba Anna - assistant professor, Department of information technology and systems, Educational and Scientific Institute "Dnipropetrovsk Metallurgical Institute", Ukrainian state university of science and technologies.

Modzalevskiy Yehor - postgraduate student, specialty 122 Computer Science, Ukrainian State University of Science and Technology. Educational and Scientific Institute "Dnipropetrovsk Metallurgical Institute".

ОСОБЛИВОСТІ РОЗМІЩЕННЯ МІКРОСЕРВІСІВ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ НАВЧАННЯМ У ГІБРИДНИХ ХМАРАХ

Анотація: У статті приділяється увага різним підходам та методам розміщення мікросервісів у хмарах, а також особливості їх застосування при розміщенні у гібридній хмарі мікросервісів систем управління навчанням. Актуальність дослідження полягає у тому що перенесення у хмару високонавантажених систем управління навчанням з великої кількості інтеграційних зв'язків з іншими сервісами є досить складним завданням, яке не завжди можна вирішити за допомогою існуючих методів. Метою даного дослідження є розробка рішення для впорядкування потоків даних процесу розміщення мікросервісів з використанням різних методів та врахуванням особливостей освітніх інформаційних систем. Завдяки використанню методу структурного аналізу створено схему потоків даних автоматизованого розміщення мікросервісів систем управління навчанням у гібридній хмарі. Також розглянуто різні методи розміщення мікросервісів у хмарах: практичні та наукові, а також порівняно їх недоліки та переваги. Визначено основні показники оцінки мережевої доступності, які застосовуються для розміщення мікросервісів. Завдяки запропонованій схемі потоків даних автоматизованого розміщення мікросервісів у гібридній хмарі визначено способи вдосконалення методів розподілу мікросервісів таким чином щоб вони давали користувачеві достатній контроль над процесом, а також враховували особливості систем управління навчанням.

Ключові слова: мікросервіс, хмара, сервер, контейнеризація, система управління навчанням, хмарні обчислення.

Постановка проблеми. Для організації навчального процесу в закладах освіти часто використовуються електронні системи управління навчанням (англ. Learning Management Systems) типу Moodle Canvas LMS, Forma LMS та інші [1]. Однією із найбільш популярних систем управління навчанням (СУН) в Україні є Moodle, яка використовується багатьма закладами вищої освіти (ЗВО) та іншими навчальними закладами. Зазвичай якщо подібна система використовується у невеликих закладах освіти, де загалом не більше тисячі учнів, то для її розміщення може бути достатньо використання серверних ресурсів хостингу чи віртуального серверу у хмарі [2]. При подібних масштабах зазвичай не потрібно виконувати ніяких складних завдань з системного адміністрування чи підходів DevOps (акронім від англ. development і operations) для розміщення подібних систем та підтримки їх роботи. Проте, для навчальних закладів

більшого масштабу, таких як університети із кількістю студентів понад 7000 осіб зазвичай складно розміщувати СУН на звичайному хостингу чи серверах початкового рівня [3]. Для високонавантажених СУН може бути недостатньо ресурсів одного серверу і потрібно шукати способи масштабування баз даних, файлових сховищ та обчислювальних потужностей між різними серверами або в межах хмари. Більш сучасні СУН на початку, при встановленні, мають поділ на мікросервіси, які розгортаються в окремих контейнерах таких середовищах, як Docker чи Kubernetes [4] і можуть бути підключеними до хмарних сховищ типу AWS S3 та SharePoint, а також до хмарних баз даних (DynamoDB, Firebase). Також багато СУН мають широку інтеграцію з іншими ресурсами навчального закладу, наприклад з бібліотечними ресурсами, інструментами розробки програмного забезпечення, або навіть із системою прокторингу [1]. Таким чином загальна серверна інформаційна система навчальних закладів може бути розподілена між різними серверами або хмарами.

З початком повномасштабної війни в Україні багато ЗВО перемістили певну частину своїх інформаційних ресурсів у публічні хмари (наприклад у США та Європі), залишаючи при цьому інтеграцію із своїми ресурсами на фізичних серверах, які у них залишились в Україні. Це зумовлено насамперед тим, що розміщення усіх онлайн-ресурсів у хмарному середовищі може бути недоцільно, через те що це може бути занадто дорогавартісно та спричиняти сповільнення доступу. Так як на фізичних серверах зазвичай встановлюються менш критичні системи, або інформаційні системи які не можна було винести за периметр локальної мережі організації, тому дослідження методів розміщення мікросервісів систем управління навчанням у гібридних хмарах є актуальним.

Мета дослідження. Метою цього дослідження є створення рішення для оптимізації потоків даних у процесі розміщення мікросервісів, застосовуючи різні методи та враховуючи специфіку освітніх інформаційних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Заклади освіти які під час повномасштабної війни не розглядали можливість розміщення своїх онлайн-ресурсів у публічних хмарах або звичайних серверах поза межами країни стикаються із ризиками зниження доступності під час знеструмлень, пошкодження каналів зв'язку та втрати даних внаслідок ракетних та дронівих атак на цивільну інфраструктуру. На момент написання даної статті це залишається для українських компаній та організацій найбільш вагомим аргументом для створення конфігурацій з розподілом обчислень між публічною хмарою та місцевих серверів (англ. on-premises) на технічному майданчику організацій. Подібні конфігурації хмарних інформаційних систем називаються гібридними хмарами. Гібридна хмара складається з приватної частини на серверах організації та гібридної хмари, яка надається постачальником хмарних послуг [2].

Серед існуючих напрямків досліджень, присвячених використанню мікросервісів у СУН особливо можна виділити дослідження методів побудови ефективної архітектури СУН [3] за допомогою застосування різних підходів організації компонентів онлайн-сервісів. Розглянуто підходи розподілення мікросервісів на основі системи досвіду ре-

алізації різних версій API, розподілу за доменами, зв'язками з базами даних та міжсервісної інтеграції. Приділено увагу аналізу протоколів обміну даними між мікросервісами та їх моделями, здійснено порівняння принципів оркестрації та хореографії (організації транзакцій між мікросервісами). У дослідженні розглянуто принципи організації модульної структури СУН і наведено споживання ресурсів реалізацією архітектури, побудованої на основі запропонованих у дослідженні методів.

Дослідженню передували вивчення міжсервісної інтеграції СУН із системами репозиторіїв навчальних матеріалів та академічних текстів [5]. У вивченні способів міжсервісної взаємодії розглянуто протокол OAI-PMH [5] та його реалізації у програмних бібліотеках різних мов програмування. Розглянуто міжнародні стандарти структурованих даних на основі Dublin Core та його подальший вплив на інтеграцію СУН із репозиторіями матеріалів. У науковій праці [1] розглянуто можливість пілотного запуску СУН у межах одного факультету на прикладі системи JetIQ [1]. Хоча у самій публікації безпосередньо цього не згадується, але на основі її даних та даних наведених у статті [3] можна побачити певні етапи еволюції системи управління електронним навчанням та її поступовий розподіл на окремі мікросервіси.

Іншим випадком міжсервісної інтеграції, який впливає на подальший мікросервісний розподіл є інтеграція СУН процесом із системами прокторингу [6]. У праці розглянуто методи інтеграції цих систем між собою, а також описано якими саме даними вони обмінюються між собою. У контексті даного дослідження дозволяє визначити, як інтеграція з прокторингом впливає на хмарну архітектуру СУН. У науковій праці [7] описується метод оптимізації процесу розміщення мікросервісів у хмарі, де пропонується розподіленню великого сервісу на ряд мікросервісів із забезпеченням найменшого рівня трафіку між ними, а також упаковуванню їх у віртуальні машини із врахуванням обмежень у ресурсах. При низькому рівні інтеграції між веб-сайтами або онлайн-сервісами організації мікросервіси досить легко розподілити між серверами на технічному майданчику організації та публічній хмарі постачальника. Адміністратор або менеджер визначає хмарний бюджет на пріоритети роботи кожного сайту чи сервісу, відповідно до чого і здійснюється ручний розподіл. Більш складною є ситуація, у якій між сервісами (або мікросервісами) існує досить високий рівень інтеграції.

Існує досить багато методів та підходів для прийняття рішень щодо розміщення мікросервісів у гібридних хмарах. Існує дві категорії подібних методів та підходів: практичні підходи, які щоденно використовують DevOps-інженери для проєктування хмар, а також наукові методи, запропоновані дослідниками. Серед розроблених спільнотою DevOps-інженерів для проєктування хмарних технологій є набір найкращих практик, що опираються на рішення, які гарно себе зарекомендували у відомих реалізованих проєктах. Наукові методи мають практичне застосування лише якщо у інженерів-практиків достатньо кваліфікації щоб їх використати. Незважаючи на наукову цінність, зазвичай їх нелегко інтегрувати у програмні інструменти, що використовуються DevOps-інженерами, особливо якщо у дослідників мало можливостей для співпраці із розробниками цих інструментів.

У сфері DevOps існують наступні практичні підходи територіального розміщення мікросервісів у мультирегіональних хмарах: розміщення мікросервісів за регіонами з найбільшим споживанням їх трафіку [8], використання глобального інструменту балансування навантаження, реплікація мікросервісів між регіонами, розподілення баз даних за регіонами, використання технології Service Mesh [4], а також використання AI-інструментів прийняття рішень щодо розміщення мікросервісів у мультирегіональних хмарних середовищах [2]. Майже всі описані підходи працюють у мультирегіональних хмарах, але разом з тим не пропонують дієвих рекомендацій з прийняття рішень щодо розміщення окремих мікросервісів у певній частині гібридної хмари – приватній чи публічній. AI-інструменти [9] для прийняття подібних рішень зазвичай є сервісами певного постачальника хмарних послуг, наприклад AWS Trusted Advisor, Azure Analysis Services та Google Active Assist [9]. Вони використовують зокрема наукові методи, запропоновані різними дослідниками, але віддають перевагу тим методам, які найбільше затребувані клієнтами [2]. Їх застосування є більш практичним для мультирегіональних хмар, що надаються тим самим постачальником, що й сам AI-інструмент. Дані інструменти в цілому досить позитивно себе зарекомендували окрім створення гібридних хмар, де є інфраструктура, яка повністю не контролюється тим самим постачальником хмарних послуг [2].

Поряд з практичними підходами прийняття рішень щодо територіального розміщення мікросервісів є також наукові підходи та методи для вирішення цієї проблеми. Саме для гібридних хмар існує підхід для розміщення програмних компонентів у хмарі на основі визначення інтенсивності трафіку між ними [10], але у ньому не приділено уваги самим мікросервісам. Також існує метод оптимізації розміщення мікросервісів зі зменшенням міжмашинного трафіку [7], але не передбачено його застосування у гібридних хмарах. У іншому методі розміщення мікросервісів запропоновано використання нечіткої логіки [11]. У деяких наукових методах та підходах акцент зроблений на мережевих параметрах. Серед них можна виділити підхід у вигляді політики оптимізації децентралізованого розміщення сервісів у туманних обчисленнях [12], в якому приділено увагу кількості мережевих переходів у хмарах та способам їх зменшення. Ще одним підходом, де враховуються мережеві метрики є розміщення сервісів для суспільних мережевих мікро-хмар [13]. У інших існуючих наукових методах та підходах більше приділяється увага розміщенню обчислень у мультирегіональних хмарах, без поділу на публічні та приватні хмари та/або без зосередження уваги саме на мікросервісній архітектурі: метод розміщення віртуальної машини з врахуванням пропускної здатності датацентрів [14], підхід розміщення віртуальних машин з урахуванням розширення мережі датацентру [15], метод розміщення обчислювальних ресурсів у розподілених хмарах [16], модель розгортання мікросервісних додатків основі графіків вартості [17], а також генетичний штрафний метод для розміщення SaaS-сервісів [18]. Здебільшого дослідники та інженери, які запропонували для цього описані методи та підходи, не проводять великої різниці між віртуальними машинами, контейнерами та розгорнутих у них мікросервісах.

Також залишається не вирішеним питання використання більш дешевих спотових хмарних та локальних обчислювальних ресурсів для менш критичних завдань. У даній роботі планується зосередити фокус саме на розміщенні контейнеризованих мікросервісів у певних частинах гібридної хмари. При проектуванні інформаційних систем в обчислювальних хмарах, зокрема на основі мікросервісів, перед архітекторами та DevOps-інженерами ставиться ціль, щоб такі системи могли найбільш ефективно працювати, була швидко та постійно доступними з мережі Інтернет для персоналу компанії-користувача та її клієнтів, а також не створювали надлишкових витрат на їх утримання. При проектуванні інформаційних систем у гібридних хмарах завжди виникає вузьке місце (англ. *bottleneck*) між обома частинами такої хмари: приватної та публічної [2]. Виникнення проблем на межі обох хмар часто призводить до деградації якості роботи сервісів, що працюють у гібридних хмарах. Для проведення оцінювання якості роботи різних розгорнутих у хмарі сервісів зазвичай потрібно проводити моніторинг різних метрик, які для кожного хмарного сервісу часто є індивідуальними. Різні дослідники [15,16] та хмарні архітектори [2,4] виділяють показники мережевої доступності розміщених у хмарі сервісів як найбільш універсальні метрики для оцінки якості їх роботи зі сторони кінцевого користувача.

Серед цих показників можна виділити наступні:

- аптайм (англ. *uptime*) – час безперервної роботи інформаційної системи;
- час відгуку сервера (або TTFB) – час у мілісекундах до першого байту, надісланого сервером з моменту запиту;
- затримка пакетів (або затримка пінгу, англ. *ping*) – час у мілісекундах скільки пакет проходить від клієнта до сервера і назад;
- кількість мережевих переходів (англ. *traceroute hops*) – кількість проміжних мережевих вузлів між клієнтом та сервером.

Ці чотири основних показника можна використати для того, щоб оцінити мережеву доступність інформаційних систем у гібридних хмарах. Аптайм – це основний параметр, за допомогою якого можна оцінити наскільки система стабільно працює та зберігає зовнішню доступність з мережі Інтернет. Аптайм вимірюється у відсотках і відображає скільки часу в рік система була доступною. Протилежним поняттю аптайму є даунтайм (англ. *downtime*), який відображає скільки часу в рік система була недоступною. Рівень аптайму забезпечується постачальником хмарних послуг згідно «Угоди про рівень послуг» – SLA (англ. *Service Level Agreement*). Згідно загальноприйнятим стандартам хмарної та телеком-індустрії прийнятне значення SLA коливається між 99,9% та 99,999%. До прикладу при SLA 99,9% для постачальника допускається наступний час недоступності послуг: щоденно – 1,44 хвилини; щотижнево – 10,08 хвилин; щомісячно – 43,8 хвилин; щорічно – 8.76 годин [19]. В умовах використання гібридної хмари забезпечення високого рівня аптайму можна легко досягнути лише у публічній частині хмари завдяки SLA, у той час як у своїй власній приватній хмарі компанія-клієнт має сама дбати про рівень аптайму, що не завжди досяжно і фінансово виправдано. Іншим показником який пропонується використовувати для оцінки інформаційних систем у гібридних хмарах є час відгуку сервера (TTFB). Він найбільш чітко відображає на-

явність внутрішніх вузьких місць у розгорнутій у хмарі інформаційній системі. Зокрема, зростання затримки TTFB у гібридній хмарі може бути обумовлене розривом критичних залежностей між спорідненими мікросервісами, які опинились у різних частинах хмари. У такому випадку на збільшення затримки TTFB може впливати велика дистанція між приватною та публічною частинами хмари, що характеризується ростом затримки пакетів та збільшенням кількості мережевих переходів. Проте, ці показники далеко не завжди корелюються з часом затримки TTFB, оскільки на цей параметр можуть впливати також помилки конфігурації сервісів у хмарі, а також помилки допущені при проектуванні та розробці мікросервісів. Тому ці два показники використовуються при оцінці мережевої доступності інформаційних систем окремо.

Ще одним мережевим параметром який впливає на якість роботи онлайн-сервісів є затримка передачі пакетів. Її можна виміряти відносно певного хоста (наприклад серверу) за допомогою використання мережевої утиліти `ping` [2]. Подібна затримка зазвичай є критичною при використанні онлайн-сервісів, що працюють в режимі реального часу, наприклад VoIP-телефонія, конференц-зв'язок, онлайн-радіо, відеостріми та онлайн-ігри. При збільшенні затримок пакетів до неприйняттого рівня якість цих сервісів починає падати і ці затримки відображаються у вигляді відчутних кінцевому користувачеві затримок зв'язку. Зазвичай для веб-сервісів, де не використовуються комунікація в режимі реального часу це лише призводить до збільшення TTFB та зазвичай не дуже сильно погіршує роботу веб-додатків чи веб-сайтів. Однак цей параметр може грати важливу роль при виявленні проблем зі швидкодією міжхмарних зв'язків у гібридній хмарі. Зростання цього параметру може відобразитись на швидкодії певних сервісів, доступ до яких відбувається з іншої частини гібридної хмари, наприклад реляційних баз даних [2]. Зовнішня затримка пакетів поза межами приватної та публічної частинами гібридної хмари, які йдуть через Інтернет, не залежить від внутрішньої конфігурації хмари, а натомість залежить від топології взаємоз'єднання магістральних Інтернет-провайдерів, точок обміну трафіку та їх пропускних здатностей. Подібна кон'юнктура їх взаємоз'єднань не є постійною і може постійно змінюватись в залежності від аварійних ситуацій, DDoS-атак [2]. В Інтернеті затримка пакетів виміряна за допомогою ICMP Ping не завжди є показником якості зв'язку, оскільки у деяких мережах протокол ICMP може мати нижчий пріоритет QoS ніж інші протоколи. Натомість для аналізу оптимальності розподілу мікросервісів всередині хмари даний параметр дозволяє визначати наявність вузьких місць у мережевій конфігурації та уникати їх виникнення у подальшому.

Разом із першими трьома показниками оцінки мережевої доступності є також четвертий – кількість мережевих переходів. Їх можна виміряти відносно певного хоста (наприклад серверу) за допомогою використання мережевої утиліти `tracert` [2]. Цей показник є також корисним для аналізу оптимальності розміщення мікросервісів усередині хмари, проте, як і затримка пакетів, вона може бути корисним лише для оцінки мережі всередині хмари. Хоча існує думка, що є чітка кореляція між затримкою передачі пакетів та кількістю хопів [2], але вона спостерігається по більшій мірі лише в іде-

альних умовах, наприклад в навчальних мережевих стендах, в яких немає справжнього трафіку [14].

Якщо у хмарній інформаційній системі існує жорстка зв'язність між мікросервісами (рис. 1), то це створює ряд проблем у стабільності та продуктивності такої системи, оскільки жорстка зв'язність є антипатерном. Як і в об'єктно-орієнтованому програмуванні, коли при жорсткій зв'язності мікросервісів один із них аварійно завершує роботу – тоді всі інші сервіси також не зможуть нормально працювати. Впорядкування архітектури зв'язків називають декуплінгом, яке покликане зробити кожен мікросервіс більш незалежним та самостійним. Правильний підхід до декуплінгу мікросервісів передбачає дотримання принципу єдиної відповідальності (англ. *Single Responsibility Principle*), у якій кожен мікросервіс або його окремий модуль виконує лише одне конкретне завдання. Для визначення ступеню зв'язності у спільності розробників програмного забезпечення використовується метрика зв'язності Coupling(C) [20]:

$$Coupling(C) = 1 - \frac{1}{d_i + 2 \times c_i + d_o + 2 \times c_o + g_d + 2 \times g_c + w + r} \quad (1)$$

де d_i – кількість вхідних параметрів даних, c_i – кількість вхідних контрольних параметрів, d_o – кількість вихідних параметрів даних, c_o – кількість вихідних контрольних параметрів, g_d – кількість глобальних змінних, які використовуються як дані, g_c – кількість глобальних змінних, які використовуються для контролю, w – кількість викликаних компонентом (fan-out), r – кількість компонентів, що викликають компонент, який розглядається (fan-in).

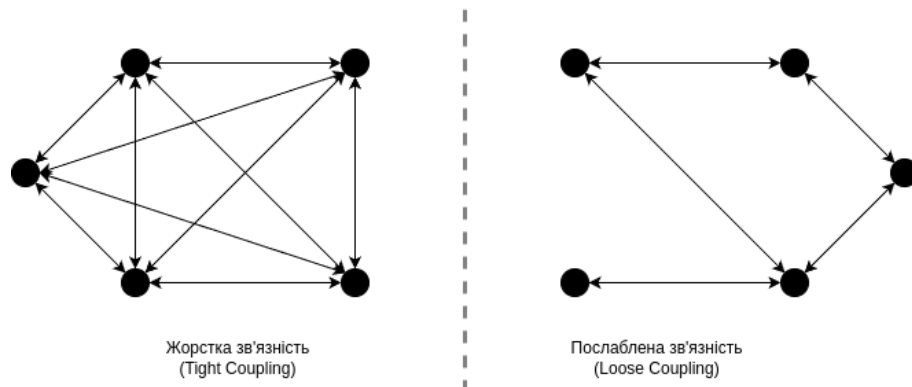


Рисунок 1 - Різні ступені зв'язності між мікросервісами

Чим більший рівень зв'язності має модуль або мікросервіс, тим більше значення значення має параметр Coupling (C), значення якого варіюється від 0,67 (слабка зв'язність) до 1,0 (сильна зв'язність). Крім зв'язності в архітектурі мікросервісів, як і у об'єктно-орієнтованому програмуванні грає важливу роль також таке поняття як когезія. Когезія – це ступінь зчеплення елементів всередині модуля чи мікросервісу. Когезія і зв'язність майже завжди обговорюються разом, оскільки вони тісно взаємопов'язані, але у той же час когезія не залежить від кількості зв'язків між елементами [21]. Це можна помітити зокрема із огляду на формулу визначення ступеня когезії:

$$coh(c, k) = \frac{N_c^k}{N^k + N_c + N_c^k} \quad (2)$$

де N – кількість елементів, c – компонент, що розглядається, k – ключ компоненту.

Потоки даних автоматизованого розміщення мікросервісів у гібридній хмарі.

У мікросервісному підході до проектування хмарних інформаційних систем когезія залежить від кількості модулів у конкретному мікросервісі та їх взаємозв'язки з модулями в іншому мікросервісі, оскільки кожен мікросервіс зазвичай складається з різних взаємопов'язаних модулів. Високі зв'язні мікросервіси більш чутливі до впливу різних факторів мережевої конфігурації, такі як швидкість каналу, стабільність зв'язку, фрагментація пакетів, стиснення та шифрування [22]. Незважаючи на те що розглянуті наукові методи показали хорошу ефективність, але під час розгляду особливостей їх застосування виявлено, що вони не дають повного контролю над процесом прийняття рішень. Тому, на рисунку 2 виділені окремі процеси в існуючих методах (фігури 1-4), завдяки розділенню яких користувач може отримати більший контроль над прийняттям рішень. Даний підхід дозволяє вдосконалити автоматизацію процесу прийняття рішень щодо розміщення мікросервісів у гібридній хмарі виділивши три окремі процеси які передуватимуть верифікації початкової конфігурації, а саме: аналіз мережевої зв'язності між мікросервісами, прогнозування потреби мікросервісів у хмарних ресурсах, аналіз пріоритетів кіберзахищеності кожного мікросервісу, а також сам процес прийняття рішень, який буде відбуватись після верифікації початкової конфігурації. При розробці методу аналізу мережевої зв'язності між мікросервісами необхідно дослідити, які є різновиди зв'язків між різними мікросервісами та іншими хмарними компонентами, та визначити які з них можуть бути розділені міжхмарним зв'язком і що на це впливає. Для цього необхідно дослідити як мережевий трафік передається між різними частинами хмари. При побудові хмарної архітектури СУН на основі мікросервісів у хмарі можуть спостерігатись наступні види трафіку між мікросервісами: безпосередні API-виклики, обмін повідомленнями, трафік доступу до баз даних, а також запити від мережевих клієнтів [3].

Практично реалізувати функціонування подібної схеми потоків даних як на рисунку 2 можливо у вигляді інформаційної системи у на основі мікросервісів. Такий підхід дозволить поєднати різні технології, які будуть використані при реалізації тих чи інших методів і моделей. Подібна інформаційна система зможе забезпечити користувачеві можливість отримувати інформацію про нинішній стан гібридної хмари, про можливі подальші сценарії щодо розміщення мікросервісів у цільовій гібридній хмарі, а також виконувати моделювання перерозподілу мікросервісів. При виконанні практичної реалізації подібної інформаційної системи необхідно передбачити різні етапи взаємодії з користувачем. На початковому етапі користувач повинен мати можливість отримувати інформацію про нинішній стан гібридної хмари та мікросервісів, які у ній розміщені.

Наступним чином користувач повинен мати можливість виконувати аналіз зв'язності між мікросервісами, а також проводити аналіз їх пріоритетів кіберзахищеності. Для цього пропонується виконувати моделювання зовнішніх вторгнень для кож-

ного мікросервісу щоб спросити визначення пріоритету кіберзахисту. Іншим обов'язковим етапом у розміщення мікросервісів у гібридній хмарні має бути прогнозування забезпечення мікросервісів хмарними ресурсами. Хоча існують практичні підходи для конфігурування прогнозів у хмарах для універсальних хмарних обчислень [2], але є необхідність у створенні більш специфічних методів або моделей для гібридних хмар та СУН.

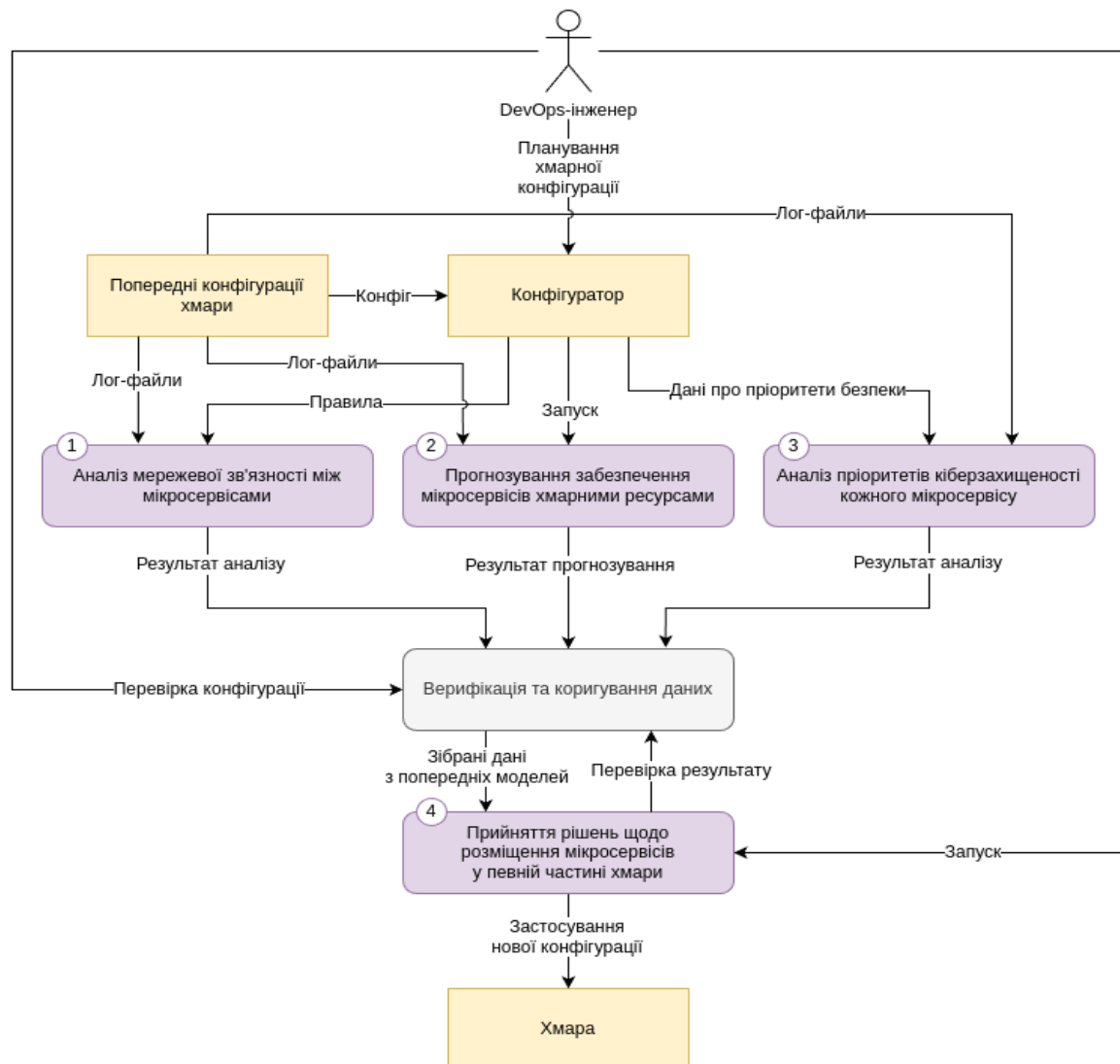


Рисунок 2 - Схема потоків даних автоматизованого розміщення мікросервісів у гібридній хмарі

При використанні приватної хмари зростання ресурсів обмежене наявними серверами, тому для подальшого масштабування приватної хмари необхідно закуповувати чи орендувати нові фізичні сервери, що не завжди можливо зробити. Для публічної хмари масштабування системи не потребує закупівлі нових серверів, але є зазвичай дорожчим рішенням [2] ніж закупівля серверів. Постачальники хмарних послуг пропонують авторозширення послуг якщо початково замовленого об'єму недостатньо. Однак цей процес необхідно контролювати та здійснювати прогнозування росту масштабів інформаційних систем.

Висновки. Проведено аналіз особливостей існуючих методи прийняття рішень щодо розміщення мікросервісів у хмарах, завдяки якому з'ясовано що існуючі методи розміщення є достатньо ефективними, але дають мало контролю над процесом архітекторам хмар, що є більш важливим при динамічному рості споживання хмарних ресурсів СУН та збільшенню їх функціоналу з часом. Для формування бачення подальшого розвитку методів розміщення мікросервісів СУН у гібридній хмарі визначено основні показники доступності та зв'язності мікросервісів.

Також запропоновано схему потоків даних процесу автоматизованого розміщення мікросервісів у гібридній хмарі, яка відповідає реаліям функціонування та розвитку СУН. Існуючі на даний момент інструменти розпізнавання та аналізу програмного коду дозволяють вдосконалити раніше існуючі методи досліджень гібридних хмар та особливостей розгортань мікросервісів у них. Крім того потребують подальшого дослідження вплив індивідуальної архітектури мікросервісів на їх розміщення у гібридній хмарі, а також як ризики кібербезпеки хмар впливають на даний процес прийняття рішень. Саме тому у подальшому потрібно дослідити процес розподілу мікросервісних обчислень у гібридних хмарах з врахуванням особливостей функціонування та розвитку СУН, а також розвинути запропоновану ідею автоматизації даного процесу, запропонувати нові чи вдосконалені методи або моделі, що реалізують окремі їх процеси.

ЛІТЕРАТУРА

1. Bisikalo, O. V., Palamarchuk, Y. A., Kovalenko, O. O. Results of the implementation of the pilot project of the management system for learning and coordination of educational, methodological, and scientific activities "JetIQ" // Proceedings of the 9th Scientific and Practical Conference, Lviv, November 21-23, 2017. – Львів: Publishing House of the Shevchenko Scientific Society, 2017. – С. 73–77.
2. Comer D. The Cloud Computing Book: The Future of Computing Explained. – Chapman and Hall/CRC, 2021. – 400 с.
3. Паламарчук Є. А. Methods of building microservice architecture of e-learning systems // Information Technologies and Computer Engineering. – 2022. – № 1. – С. 43–54.
4. Chawla H., Kathuria H. Building microservices applications on Microsoft Azure: designing, developing, deploying, and monitoring. – Apress, 2019. – 280 с.
5. Малініч І. П., Паламарчук Є. А. Способи отримання доступу до метаданих статей через API-інтерфейси пакету програмного забезпечення DSpace // Матеріали XLVI науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 22–24 березня 2017 р. – Вінниця, 2017.
6. Денесяк О. І., Паламарчук Є. А. Комплексна система прокторингу у інформаційних технологіях аналізу контексту в системах оцінювання знань // Вісник ВПІ. – 2021. – № 6. – С. 93–99.
7. Hu Y., de Laat C., Zhao Z. Optimizing service placement for microservice architecture in clouds // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9, no. 21. – P. 4663. – DOI: 10.3390/app9214663.

8. Magda D. Run Java microservices across multiple cloud regions with Spring Cloud // DZone. – 2022. – URL: <https://dzone.com/articles/run-java-microservices-across-multiple-cloud-regiof> (дата звернення: 16.10.2024).
9. Garapati S. E., Giral E., Antonijević S. Rethinking Monitoring for Cloud Environments: BMC Software AIOps Case Study // European Conference on Service-Oriented and Cloud Computing. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2022. – P. 109–115.
10. Chen X., Tang S., Lu Z., Wu J., Duan Y., Huang S. C., Tang Q. iDiSC: A new approach to IoT-data-intensive service components deployment in edge-cloud-hybrid systems // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 59172–59184. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8706879>.
11. Petrakis E. G., Skevakis V., Eliades P., Aznavouridis A., Tsakos K. ModSoft-HP: Fuzzy Microservices Placement in Kubernetes // Electronics. – 2023. – Vol. 13, no. 1. – P. 65.
12. Guerrero C., Lera I., Juiz C. A lightweight decentralized service placement policy for performance optimization in fog computing // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. – 2019. – Vol. 10. – P. 2435–2452. – DOI: 10.1007/s12652-018-10068-5.
13. Selimi M., Cerdà-Alabern L., Freitag F., Veiga L., Sathiaselvan A., Crowcroft J. A lightweight service placement approach for community network micro-clouds // Journal of Grid Computing. – 2019. – Vol. 17. – P. 169–189. – DOI: 10.1007/s10723-018-09427-2.
14. Wang M., Meng X., Zhang L. Consolidating virtual machines with dynamic bandwidth demand in data centers // INFOCOM 2011. – 2011. – P. 71–75.
15. Meng X., Pappas V., Zhang L. Improving the scalability of data center networks with traffic-aware virtual machine placement // Proceedings of the 2010 IEEE INFOCOM. – San Diego, CA, USA, 2010. – P. 1–9.
16. Alicherry M., Lakshman T. Network-aware resource allocation in distributed clouds // Proceedings of the 2012 IEEE INFOCOM. – Orlando, FL, USA, 2012. – P. 963–971.
17. Leitner P., Cito J., Stöckli E. Modelling and managing deployment costs of microservice-based cloud applications // Proceedings of the 9th International Conference on Utility and Cloud Computing. – Shanghai, China, 2016. – P. 165–174. – ACM.
18. Yusoh Z. I. M., Tang M. A penalty-based genetic algorithm for the composite SaaS placement problem in the cloud // Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation. – Barcelona, Spain, 2010. – P. 1–8.
19. Rogers O. Cloud SLAs punish, not compensate // Uptime Institute. – 2022. – URL: <https://journal.uptimeinstitute.com/cloud-slas-punish-not-compensate/> (дата звернення: 16.10.2024).
20. Pressman R. S. Software Engineering – A Practitioner's Approach. – 4th ed. – McGraw-Hill, 1982. – ISBN 0-07-052182-4.
21. Tulka T. How cohesion and coupling correlate // URL: <https://blog.tulka.com/how-cohesion-and-coupling-correlate/> (дата звернення: 16.10.2024).
22. Ivanchuk Y. V., Horobets Y. V., Koval K. O. Method for increasing the degree of protection in message encryption based on a time-constant algorithm // System Technologies: Regional Interuniversity Collection of Scientific Papers. – 2022. – Vol. 2, no. 139. – P. 3–13. – DOI: 10.34185/1562-9945-2-139-2022-01.

REFERENCES

1. Bisikalo, O. V., Palamarchuk, Y. A., & Kovalenko, O. O. (2017). Results of the implementation of the pilot project of the management system for learning and coordination of educational, methodological, and scientific activities "JetIQ". In *Proceedings of the 9th Scientific and Practical Conference, Lviv, November 21-23, 2017* (pp. 73-77). Lviv: Publishing House of the Shevchenko Scientific Society.
2. Comer, D. (2021). *The Cloud Computing Book: The Future of Computing Explained*. Chapman and Hall/CRC.
3. Palamarchuk, Y.A. (2022). Methods of building microservice architecture of e-learning systems. *Information Technologies and Computer Engineering*, (1), 43-54.
4. Chawla, H., & Kathuria, H. (2019). *Building microservices applications on Microsoft azure: designing, Developing, Deploying, and Monitoring*. Apress.
5. Малініч І., & Паламарчук, Є. (2017). Способи отримання доступу до метаданих статей через API-інтерфейси пакету програмного забезпечення DSpace. In *Proceedings of the XLVI Scientific and Technical Conference of VNTU Departments, Vinnytsia, March 22-24, 2017*.
6. Денесяк, О. І., & Паламарчук, Є. А. (2021). Комплексна система прокторингу у інформаційних технологіях аналізу контексту в системах оцінювання знань. *Вісник ВПІ*, (6), 93-99.
7. Hu, Y., de Laat, C., & Zhao, Z. (2019). Optimizing service placement for microservice architecture in clouds. *Applied Sciences*, 9(21), 4663. <https://doi.org/10.3390/app9214663>
8. Magda, D. (2022). Run Java microservices across multiple cloud regions with Spring Cloud. DZone. Retrieved from <https://dzone.com/articles/run-java-microservices-across-multiple-cloud-regio>
9. Garapati, S. E., Giral, E., & Antonijević, S. (2022). Rethinking Monitoring for Cloud Environments: BMC Software AIOps Case Study. In *European Conference on Service-Oriented and Cloud Computing* (pp. 109-115). Cham: Springer Nature Switzerland.
10. Chen, X., Tang, S., Lu, Z., Wu, J., Duan, Y., Huang, S. C., & Tang, Q. (2019). iDiSC: A new approach to IoT-data-intensive service components deployment in edge-cloud-hybrid systems. *IEEE Access*, 7, 59172–59184. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8706879>
11. Petrakis, E. G., Skevakis, V., Eliades, P., Aznavouridis, A., & Tsakos, K. (2023). ModSoft-HP: Fuzzy Microservices Placement in Kubernetes. *Electronics*, 13(1), 65.
12. Guerrero, C., Lera, I., & Juiz, C. (2019). A lightweight decentralized service placement policy for performance optimization in fog computing. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10, 2435–2452. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-10068-5>
13. Selimi, M., Cerdà-Alabern, L., Freitag, F., Veiga, L., Sathiaselan, A., & Crowcroft, J. (2019). A lightweight service placement approach for community network micro-clouds. *Journal of Grid Computing*, 17, 169–189. <https://doi.org/10.1007/s10723-018-09427-2>
14. Wang, M., Meng, X., & Zhang, L. (2011). Consolidating virtual machines with dynamic bandwidth demand in data centers. *INFOCOM 2011*, 71–75.

15. Meng, X., Pappas, V., & Zhang, L. (2010). Improving the scalability of data center networks with traffic-aware virtual machine placement. In *Proceedings of the 2010 IEEE INFOCOM* (pp. 1–9). San Diego, CA, USA.
16. Alicherry, M., & Lakshman, T. (2012). Network-aware resource allocation in distributed clouds. In *Proceedings of the 2012 IEEE INFOCOM* (pp. 963–971). Orlando, FL, USA.
17. Leitner, P., Cito, J., & Stöckli, E. (2016). Modelling and managing deployment costs of microservice-based cloud applications. In *Proceedings of the 9th International Conference on Utility and Cloud Computing* (pp. 165–174). ACM. Shanghai, China.
18. Yusoh, Z. I. M., & Tang, M. (2010). A penalty-based genetic algorithm for the composite SaaS placement problem in the cloud. In *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation* (pp. 1–8). Barcelona, Spain.
19. Rogers, O. (2022). Cloud SLAs punish, not compensate. Uptime Institute. Retrieved from <https://journal.uptimeinstitute.com/cloud-slases-punish-not-compensate/>
20. Pressman, R. S. (1982). *Software Engineering – A Practitioner's Approach* (4 ed.). McGraw-Hill. ISBN 0-07-052182-4.
21. Tulka, T. (2020). How cohesion and coupling correlate. Retrieved from <https://blog.tulka.com/how-cohesion-and-coupling-correlate/>
22. Ivanchuk, Y. V., Horobets, Y. V., & Koval, K. O. (2022). Method for increasing the degree of protection in message encryption based on a time-constant algorithm. *System Technologies: Regional Interuniversity Collection of Scientific Papers*, 2(139), 3–13. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-2-139-2022-01>

Received 14.04.2025.
Accepted 16.04.2025.

Features of microservices placement of learning management systems in hybrid clouds

The article focuses on various approaches and methods for deploying microservices in the cloud, as well as the specifics of their application for hosting microservices in a hybrid cloud environment for learning management systems. The relevance of the study consists in the problem that migrating high-load learning management systems (LMS) with numerous integration links to other services to the cloud is a complex task that is difficult to be solved using existing methods. LMS'es such as Moodle, Canvas LMS, Forma LMS, and others are often used to organize the educational process in Ukrainian educational institutions. One of the most popular LMS in Ukraine is Moodle, which is used by many higher education institutions and other educational establishments. Many LMS have extensive integration with other resources of the educational institution, such as library resources, software development tools, or even proctoring systems. The overall server information system of educational institutions can be distributed across different servers or clouds and proper solutions for this process should be found. The aim of study is developing a solution for organizing data flows in the process of deploying microservices using various methods including the features of educational information systems. Using the structural analysis method, a data flow solution for the automated deployment of microservices in learning management systems within a hybrid cloud environment created. Also various methods for deploying microservices in the cloud were examined, both practical and scientific, comparing their positive and negative effects.

Key metrics for assessing network availability for microservice deployment have been identified. The proposed data flow solution for the automated deployment of microservices in a hybrid cloud provides ways to improve microservice distribution methods giving users sufficient control over the process including features of learning management systems.

Keywords: microservice, cloud, server, containerization, learning management system, distributed cloud computing.

Малініч Ілля Павлович – асистент кафедри Комп’ютерних наук, Вінницький національний технічний університет.

Іванчук Ярослав Володимирович – доктор технічних наук, професор кафедри Комп’ютерних наук, Вінницький національний технічний університет.

Malinich Illia – assistant lecturer of Computer Sciences, Vinnytsia National Technical University.

Ivanchuk Yaroslav – ScD (Eng), professor of Computer Sciences department, Vinnytsia National Technical University.

МОДИФІКОВАНИЙ МЕТОД КУРСОРНОЇ ПАГІНАЦІЇ ТА ФІЛЬТРАЦІЇ ДАНИХ У ВИГЛЯДІ ПАКЕТУ NPM

Анотація: Ця стаття присвячена розробці модифікованого методу курсорної пагінації, що має підтримку основних баз даних та ORM систем, надає можливість використання комплексних фільтрації та сортування даних, індексації запитів тощо. Проаналізовані наявні рішення, випадки їх використання, переваги та недоліки. Сформовано модифікований метод, який містить в собі видозмінені та покращені функціональні можливості існуючих NPM пакетів, разом з новими впровадженнями, що зосереджені на збільшенні ефективності та універсальності запитів до баз даних. Проведено аналіз запропонованого рішення. Наведено потенційні напрями подальших розширень та поліпшень методу.

Ключові слова: курсорна пагінація, база даних, ORM система, фільтрація даних, індексація запитів, NPM пакет, нечіткий пошук, сортування злиттям та купою, бінарне дерево, хеш-функція.

Постановка проблеми. Кожного дня все більше й більше електронних магазинів, каталогів та додатків з'являється в мережі Інтернету. Більшість з подібних ресурсів містить доволі велику кількість даних (наприклад, перелік інструментів та автомобільних запчастин на відповідному вебсайті), і є необхідність в їх зручному відображенні на вебсторінці. Одним зі способів розбиття даних на невеликі «набори» є пагінація. Однак при виборі методу пагінації, що найкраще підходить під задачі конкретного вебресурсу, виникає проблема, пов'язана зі складністю імплементації. Сьогодні найпопулярнішими методами є офсетна та курсорна пагінації [1]. Проте, на відміну від офсетного підходу, методи реалізації якого доволі широко відомі та розповсюджені, реалізація курсорної пагінації (або пагінації за токеном, як її ще називають) вимагає більш глибоких знань та вмінь розробника [2]. Окрім того, на цей момент існує дуже обмежена кількість пакетів даних, які надають вже готовий функціонал для імплементації курсорної пагінації, і жоден з них не є достатньо універсальним: підтримується тільки одна ORM (Object-Relational Mapping – об'єктно-реляційне відображення) система, або одна нативна база даних. До того ж подібні рішення не мають в собі імплементацію індексації запитів для підвищення ефективності; відсутня опціональна фільтрація/сортування даних за обраним параметром.

Таким чином, проблема у відсутності універсального та оптимізованого методу пагінації є актуальною та потребує дослідження. Тому у даній роботі пропонується ро-

зробити модифікований метод курсорної пагінації та фільтрації даних у вигляді пакету NPM, який вирішить недоліки наявних методів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує два методи використання курсорної пагінації в проєктах будь-якого рівня складності: написання її вручну розробником та налаштування всіх необхідних функціональних можливостей опісля; або ж використання вже існуючого рішення, в основному, у вигляді пакету NPM (Node Package Manager), оскільки NPM є найпопулярнішим пакетним менеджером платформи Node.js, яка, в свою чергу, є одним з лідерів серед платформ для бекенд частин вебзастосунків [3].

Оскільки реалізація курсорної пагінації вручну може зайняти чимало часу навіть у досвідчених розробників, подібний підхід використовується доволі рідко. Використання ж існуючих готових рішень підходить далеко не для всіх проєктів через низьку універсальність наявних методів, практично повну відсутність опцій для фільтрації/сортування даних за заданим параметром та не найкращу швидкодію запитів (в наслідок відсутності індексації запитів).

Розглянемо детальніше найбільш популярні пакети NPM, що містять в собі функціональні можливості курсорної пагінації даних.

Mongodb-cursor-pagination – як можна здогадатись з назви, головною та єдиною задачею цього пакету є робота з базою даних MongoDB, використовуючи нативний драйвер. Основними перевагами є простота у використанні та детальний опис функціональних можливостей. Серед недоліків спостерігається відсутність підтримки інших баз даних, повільна робота над запитом з комплексним унікальним ключем та відсутність можливості обрання поля для сортування [4].

Mongoose-relay-paginate – пагінація з використанням ORM системи Mongoose, та, відповідно, бази даних MongoDB. Переваги: зрозуміла документація, швидкі запити до бази даних незалежно від складності даних. Недоліки: аналогічно до вище розглянутого рішення відсутність підтримки інших баз даних та ORM, комплексних фільтрації та сортування тощо.

Typeorm-cursor-pagination – пагінація з використанням ORM системи TypeORM з підтримкою більшості реляційних (SQL) баз даних. Переваги: чудова документація, підтримка чималої кількості баз даних, наявна можливість базового налаштування сортування. Недоліки: відсутність підтримки MongoDB (хоч сама ORM і працює з цією базою, проте в цьому пакеті вона не доступна з певних причин), налаштування фільтрації [5].

Sequelizejs-cursor-pagination – пагінація з використанням ORM системи Sequelize з підтримкою деяких реляційних баз даних (таких як PostgreSQL, MySQL, SQLite). Переваги: простота в реалізації, можливе базове налаштування фільтрації та сортування даних. Недоліки: підтримка обмеженої кількості баз даних, відсутність комплексних налаштувань фільтрації та сортування даних, посередня документація [6].

Мета дослідження. Метою даного дослідження є підвищення ефективності та універсальності курсорної пагінації шляхом розробки та програмної реалізації методу,

у якого час запитів буде суттєво скорочений, та кількість баз даних, що підтримуються, буде більшою, аніж в існуючих рішеннях. Відповідно до вказаної мети необхідно розв'язати такі задачі: оглянути наявні методи реалізації курсорної пагінації, запропонувати новий метод з кращою швидкістю та більшою універсальністю, експериментально перевірити ефективність розробленого методу.

Викладення основного матеріалу дослідження. Однією з перших речей, які варто обдумати, є вибір формату реалізації запропонованого методу. Оскільки JavaScript є однією з найпопулярніших мов програмування для реалізації вебзастосунків, Node.js – це платформа для імплементації бекенд частини додатків, а NPM – найпопулярніший пакетний менеджер Node.js, то було обрано саме реалізацію модифікованого методу курсорної пагінації та фільтрації даних у вигляді пакету NPM [7].

Пакет NPM побудований з використанням фреймворку Nest.js. Його було обрано, оскільки він використовує статично типізовану мову TypeScript, має чітку модульну структуру, надає можливість інкапсуляції методів, та, найголовніше, має підтримку усіх необхідних баз даних та ORM систем.

Основними функціональними можливостями запропонованого методу є:

- підтримка багатьох баз даних (PostgreSQL, MySQL, SQLite, MongoDB тощо) та ORM (TypeORM, Mongoose, Sequelize тощо);
- власне курсорна пагінація у вигляді методу класу, що імпортується з NPM пакету;
- опціональна комплексна фільтрація даних;
- опціональне комплексне сортування даних;
- опціональна індексація запитів у вигляді методу класу, що імпортується з NPM пакету.

Розглянемо детальніше кожен з наведених пунктів.

Задля забезпечення роботи більшості баз даних та ORM систем було обрано класову систему, де кожен метод відповідає за імплементацію курсорної пагінації в певній базі даних чи ORM. Такий підхід дозволяє виконати імпорт лише одного сервісу, та надає доступ до всіх його функціональних можливостей. Для нативного підключення до баз даних було використано існуючі пакети даних, що надають можливість використання необхідних драйверів баз даних та їх методів. Для використання ORM систем, аналогічно до нативного підключення баз даних, було використано пакети даних NPM, які містять в собі потрібні сервіси та функції роботи з системою. Оскільки в більшості випадків користувач запропонованого модифікованого методу курсорної пагінації у вигляді пакету NPM не має необхідності у використанні всіх наявних баз даних та ORM, було використано динамічне підвантаження пакетів – тобто, наприклад, якщо користувач (програміст) використовує для курсорної пагінації лише базу даних PostgreSQL та ORM систему TypeORM, лише відповідні пакети даних будуть додані в структуру NPM пакету запропонованого рішення.

Процес курсорної пагінації в запропонованому методі є більш комплексним, ніж традиційне пагінування, оскільки включає не лише просте розділення великого набору даних за контрольними точками (так званими курсорами), а й додаткову логіку філь-

трації та сортування. Запропоноване рішення має алгоритм, який складається з таких частин:

- валідація даних, що надходять до методу;
- визначення ключа сортування даних;
- створення об'єкта фільтрації даних;
- декодування отриманого курсора;
- створення запиту до бази даних, що містить в себе сортування та фільтрацію;
- виконання запиту та отримання відповіді, обробка даних;
- сформування об'єкта відповіді.

Розглянемо детальніше кожну частину.

Усі методи, незалежно від бази даних чи ORM, приймають майже однаковий набір параметрів. Обов'язковими є: *limit* – кількість даних, яку необхідно повернути; назва первинного ключа сутності/документа (в разі відсутності ключа сортування, сортування відбувається саме за первинним ключем); назва сутності/таблиці та відповідний метод драйвера бази даних/репозиторій ORM системи. Опціональними є: курсор (точка відліку, що розділяє дані), може бути відсутнім у разі завантаження початкового набору даних; тип курсора (*next* або *previous*), що вказує на напрям (отримання набору даних після курсора чи до), у разі відсутності використовується *next*; ключ сортування – поле сутності/документа (сутності для нереляційних баз даних, документа для реляційних); об'єкт фільтрації даних (певний набір параметрів). Перед формуванням запиту виконується обробка та валідація вхідних параметрів. Зокрема, перевіряється, що ліміт є натуральним числом, а тип курсора вказано як *next* чи *previous*, без інших значень.

Після валідації даних визначається ключ сортування даних. Для початку перевіряється наявність вказаного ключа сортування. В разі його відсутності сортування відбувається за первинним ключем, назва якого передається в параметрах методу. Якщо ж ключ сортування присутній, сортування даних відбувається за ним. Окрім цього, ключ може бути комплексним (приймати декілька значень водночас), тоді сортування відбувається водночас за всіма переданими полями для збільшення унікальності. Важливо зазначити, що сортування має виконуватись за унікальними значеннями, інакше може виникнути проблема з повторенням записів або некоректною кількістю даних, що повертаються методом.

Далі створюється об'єкт фільтрації даних. У разі передачі певних фільтрів у параметрах методу, об'єкт складатиметься з двох умов: отримання даних після або до заданого курсора (залежно від типу та наявності курсора) та власне переданих в методі даних. В іншому випадку фільтр буде здійснювати пошук лише за курсором. Звісно, якщо необхідно отримати перший набір даних (курсор не заданий), та без додаткових параметрів фільтрації, кінцевий об'єкт фільтра буде переданий в запит до бази даних порожнім. Об'єкт даних, який приймає метод, є статично типізованим та спеціально розроблений для підтримки різних баз даних. Він може як комбінувати декілька умов

водночас, так і бути максимально простим, наприклад, зі звичайним повнотекстовим пошуком [8].

Останнім кроком перед формуванням остаточного запиту до бази даних є декодування курсора. Для забезпечення даних при створенні курсора (останній крок методу) використовується кодування за допомогою алгоритму base64. Відповідно, для коректного отримання даних з бази перед формуванням запиту токен декодується за допомогою моделі того ж base64.

Після всіх підготовчих процесів, описаних вище, відбувається створення запиту до бази даних, який містить в собі опції сортування та фільтрації. Запит доволі суттєво відрізняється в залежності від бази даних та ORM системи, тому кожен метод враховує ці специфіки.

Далі відбувається виконання запиту та отримання відповіді від бази даних. Перед надсиланням запиту також відбувається додаткова перевірка на відсутність можливості використання SQL-ін'єкції, для забезпечення недоторканості даних, що зберігаються в базі. Після отримання відповіді відбувається обробка даних, які надходять. Вона є унікальною для кожної бази даних та ORM системи, через різний формат відповіді, тому за допомогою спеціальних функцій отримані дані перетворюються в уніфікований формат, який буде наданий у відповіді. Окрім цього, на цьому кроці відбувається кодування курсорів (про що було описано вище).

Власне, останній крок, в якому отримується відформатований об'єкт та надсилається як відповідь методу. Він має такі параметри як *data* (набір отриманих даних), *cursorNext* (закодований курсор останнього елементу з набору даних), *cursorPrevious* (закодований курсор першого елементу з набору даних), *valuesNumber* (кількість даних, що було отримано).

Розглядаючи детальніше комплексну фільтрацію, можна побудувати таку математичну модель:

$$filter = \lambda f. T(f) \rightarrow Q \# \quad (1)$$

де *filter* виступає в ролі функції, яка фактично є рекурсивним компілятором предикатів, що рекурсивно проходить логічне дерево фільтрів *f* і застосовує правило відображення для перетворення кожного вузла на необхідну умову. У свою чергу, якщо *f* є композитним деревом (тобто, на практиці умова фільтру містить водночас декілька операцій, таких як AND, OR, NOT тощо), то функція трансформації даних має такий вигляд:

$$T(f) = T(f_1) \otimes T(f_2) \otimes \dots \otimes T(f_n) \# \quad (2)$$

де $\otimes$ виступає в ролі логічного оператора (AND/OR/NOT і т.п.).

У свою чергу, комплексне сортування даних має такий вигляд. Нехай:

- $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ – множина елементів (наприклад, записів в таблиці чи документів).

- $K = [k_1, k_2, \dots, k_m]$ – впорядкований набір ключів сортування (наприклад, поля *id* та *createdAt*).
- $dir_i \in \{\uparrow, \downarrow\}$ – напрямок сортування для кожного ключа.
- $c = (v_1, v_2, \dots, v_m)$ – курсор.

Тоді для всіх елементів $d \in D$ виконується:

$$\exists t \in [1, m] \text{ таке, що } \left[\begin{array}{l} \forall s < t, \quad k_s(d) = v_s \\ \text{та } \begin{cases} k_t(d) > v_t, \text{ якщо } dir_t = \uparrow \\ k_t(d) < v_t, \text{ якщо } dir_t = \downarrow \end{cases} \end{array} \right] \# \quad (3)$$

Наостанок розглянемо індексацію запитів. Загалом, індекс – це окрема структура, яка зберігає копію певних колонок таблиці разом із посиланнями на відповідні записи (рядки). Індекс функціонує подібно до алфавітного покажчика в книзі: він дозволяє швидко знайти потрібні дані без необхідності переглядати весь зміст таблиці. У наведеному методі використовується декілька різних видів індексації: B-Tree, Hash та Compound. B-Tree використовується для індексації запитів за параметрами, які можуть бути різних типів. У своїй основі B-Tree індекс використовує алгоритм пошуку в збалансованому та відсортованому бінарному дереві, де висота кожної гілки залишається майже однакою. Часова складність запитів, що використовують цей індекс, складає $O(\log n)$ – себто є логарифмічною. Така швидкодія досягається завдяки тому, що B-Tree зберігає великий обсяг ключів у кожному вузлі. Це знижує кількість рівнів, які потрібно пройти під час пошуку. Hash індекс використовується для пошуку за РК (Primary Key – первинний ключ) та має постійну складність, а саме $O(1)$. Compound індекс використовується для пошуку та фільтрації за кількома параметрами одночасно та має таку ж складність, як і B-Tree, $O(\log n)$, оскільки також використовує впорядковані дерева [3].

Результати експериментальних досліджень. Дослідження відбувались на спеціально підготовленому проєкті, в якому використовувались всі бази даних та ORM системи, які підтримуються NPM пакетом, що містить в собі запропонований модифікований метод курсорної пагінації даних. Курсорна пагінація пройшла успішно в 100% випадків, коли в методи були передані валідні дані; обробка помилок відпрацювала у випадку некоректних даних. Сортування та фільтрація виконали свою роль коректно в 94% випадків (є доволі складні та малореалістичні кейси, які наразі не покриті логікою). Тестування індексації запитів повернуло такі результати для бази PostgreSQL (рис. 1) та MongoDB (рис. 2).

DATABASE	ORM	INDEX	SORT	FILTER	AVG LATENCY (MS)
PostgreSQL	TypeORM	+	-	-	8.4
PostgreSQL	TypeORM	+	+	+	9.7
PostgreSQL	TypeORM	-	-	-	60.7
PostgreSQL	TypeORM	-	+	+	240.8
PostgreSQL	Sequelize	+	-	-	10.8
PostgreSQL	Sequelize	+	+	+	14.1
PostgreSQL	Sequelize	-	-	-	233.2
PostgreSQL	Sequelize	-	+	+	196.9
PostgreSQL	-	+	-	-	6.4
PostgreSQL	-	+	+	+	7.9
PostgreSQL	-	-	-	-	43.2
PostgreSQL	-	-	+	+	190.3

Рисунок 1 – Результати тестування курсорної пагінації в базі даних PostgreSQL

DATABASE	ORM	INDEX	SORT	FILTER	AVG LATENCY (MS)
MongoDB	TypeORM	+	-	-	9.7
MongoDB	TypeORM	+	+	+	11.3
MongoDB	TypeORM	-	-	-	208.6
MongoDB	TypeORM	-	+	+	164.1
MongoDB	Mongoose	+	-	-	10.1
MongoDB	Mongoose	+	+	+	13.0
MongoDB	Mongoose	-	-	-	84.1
MongoDB	Mongoose	-	+	+	398.5
MongoDB	-	+	-	-	5.3
MongoDB	-	+	+	+	6.4
MongoDB	-	-	-	-	60.1
MongoDB	-	-	+	+	242.3

Рисунок 2 – Результати тестування курсорної пагінації в базі даних PostgreSQL

Інші реляційні бази даних, такі як, наприклад, MySQL та SQLite, мають схожі показники до PostgreSQL; нереляційні – подібні до MongoDB.

Висновки. Дослідження присвячене розробці модифікованого методу курсорної пагінації та фільтрації даних у вигляді пакету NPM. Запропонований метод дозволяє підвищити швидкодію запитів до бази даних завдяки використанню індексів. Він є універсальним, оскільки підтримує основні бази даних та ORM, надає можливість фільтрувати та сортувати дані за заданими параметрами тощо.

Результати тестування показують успішність імплементації запропонованого методу для більшості випадків використання курсорної пагінації.

Подальше дослідження полягатиме в можливій оптимізації даних за допомогою кеш-таблиць (які підтримуються певними базами даних), розв’язання питань зі складними випадками комплексних фільтрації та сортування даних, які наразі не підтримуються, покриття коду тестами, та підтримка більшої кількості баз даних та ORM систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Jason Ngan (2022). Розуміння курсорної та оффсетної пагінацій [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://medium.com/better-programming/understanding-the-offset-and-cursor-pagination-8ddc54d10d98>
2. Merge.dev (2023). Курсорна пагінація: як працює, переваги та недоліки [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.merge.dev/blog/cursor-pagination>
3. Kellton (2024). Найкращі фреймворки для бекенд розробки [Електронний ресурс] / Kellton. – Режим доступу: <https://www.kellton.com/kellton-tech-blog/best-backend-web-development-frameworks>
4. mongo-cursor-pagination (2025). Модуль для реалізації курсорної пагінації в MongoDB [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.npmjs.com/package/mongo-cursor-pagination>
5. typeorm-cursor-pagination (2023). Пакет для курсорної пагінації з використанням TypeORM [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.npmjs.com/package/typeorm-cursor-pagination>
6. sequelize-cursor-pagination (2025). Пакет для курсорної пагінації в Sequelize [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.npmjs.com/package/sequelize-cursor-pagination>
7. about-npm (2023). Про NPM пакети [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.npmjs.com/about-npm>
8. Goodays API Platform (2023). Пагінація, сортування та фільтрація [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://apidocs.goodays.co/docs/sorting-and-pagination>

REFERENCES

1. Jason Ngan (2022). Understanding the Offset and Cursor Pagination [Electronic resource]. – URL: <https://medium.com/better-programming/understanding-the-offset-and-cursor-pagination-8ddc54d10d98>
2. Merge.dev (2023). Cursor pagination: how it works and its pros and cons [Electronic resource]. – URL: <https://www.merge.dev/blog/cursor-pagination>
3. Kellton (2024). Best Backend Web Development Frameworks [Electronic resource] / Kellton. – URL: <https://www.kellton.com/kellton-tech-blog/best-backend-web-development-frameworks>
4. mongo-cursor-pagination (2025). Module for cursor pagination integration in MongoDB [Electronic resource]. – URL: <https://www.npmjs.com/package/mongo-cursor-pagination>
5. typeorm-cursor-pagination (2023). Package for cursor pagination with TypeORM [Electronic resource]. – URL: <https://www.npmjs.com/package/typeorm-cursor-pagination>
6. sequelize-cursor-pagination (2025). Package for cursor pagination with Sequelize [Electronic resource]. – URL: <https://www.npmjs.com/package/sequelize-cursor-pagination>
7. about-npm (2023). About NPM packages [Electronic resource]. – URL: <https://docs.npmjs.com/about-npm>
8. Goodays API Platform (2023). Pagination, sorting and filtering [Electronic resource]. – URL: <https://apidocs.goodays.co/docs/sorting-and-pagination>

Received 15.04.2025.
Accepted 18.04.2025.

Modified method of cursor pagination and data filtering as an NPM package

This article is devoted to the development of a modified cursor pagination method that supports major databases and ORM systems, provides the ability to use complex data filtering and sorting, query indexing, etc. Existing solutions, their use cases, advantages and disadvantages are analyzed. A modified method is formed that includes modified and improved functionality of existing NPM packages, along with new implementations focused on increasing the efficiency and versatility of database queries. The proposed solution is analyzed. Potential directions for further expansion and improvement of the method are given.

The purpose of this research is to increase the efficiency and versatility of cursor pagination by developing and software implementing a method in which query time will be significantly reduced and the number of databases supported will be greater than in existing solutions. In accordance with the stated goal, it is necessary to solve the following tasks: to review existing methods for implementing cursor pagination, to propose a new method with better speed and greater versatility, to experimentally verify the effectiveness of the developed method.

At the moment, there is a very limited number of data packages that provide ready-made functionality for implementing cursor pagination, and none of them is universal enough (only one ORM system or one native database is supported). In addition, such solutions do not include the implementation of query indexing to increase efficiency; there is no optional filtering/sorting of data by the selected parameter. Thus, the problem of the lack of a universal and optimized pagination method is relevant and requires research. Therefore, a modified method of cursor pagination and data filtering is proposed in the form of an NPM package, which will solve the shortcomings of existing methods.

Keywords: cursor pagination, database, ORM system, data filtering, query indexing, NPM package, fuzzy search, merge and heap sort, binary tree, hash function.

Степаненко Андрій Сергійович – магістрант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, факультет прикладної математики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Саяпіна Інна Олександрівна – к.т.н, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, факультет прикладної математики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Stepanenko Andrii – student of the Department of Computer Systems Software, Faculty of Applied Mathematics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

Saiapina Inna – Ph.D., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer Systems Software, Faculty of Applied Mathematics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

Д.С. Вербовий, І.О. Саяпіна

МЕТОД ДЛЯ АВТОМАТИЧНОЇ ПЕРЕВІРКИ ДОКУМЕНТІВ НА ВІДПОВІДНІСТЬ НОРМАТИВНИМ ВИМОГАМ

Анотація: Ця стаття присвячена розробці ефективного методу автоматичної перевірки форматів документів, який дозволяє гарантувати їх відповідність певним стандартам форматування. Переглянуто та проаналізовано наявні підходи, що використовують системи на основі правил і методи машинного навчання. Запропоновано модифікований метод, який об'єднує як структурну, так і лінгвістичну перевірку. Проведено порівняльний аналіз запропонованого методу з наявними підходами. Також запропоновано потенційні напрямки подальших досліджень.

Ключові слова: автоматична перевірка документів, нормативні вимоги, форматування DOCX, LanguageTool API, Word API, відстань Левенштейна, структурний аналіз тексту, оптимізація перевірки тексту.

Постановка проблеми. Автоматична перевірка документів на відповідність нормативним вимогам є важливим завданням у сфері освіти, науки та діловодства. Документи, такі як дипломні роботи, наукові статті та технічні звіти, мають чітко визначені вимоги до форматування, включаючи розмір шрифту, міжрядкові інтервали, відступи, нумерацію сторінок тощо. Невідповідність цим вимогам може призвести до необхідності повторного редагування, що потребує додаткових витрат часу та ресурсів.

На сьогодні більшість перевірок форматування виконується вручну, що є трудомістким процесом, схильним до помилок. Деякі програмні рішення, такі як вбудовані перевірки у текстових редакторах, мають обмежену функціональність і не здатні забезпечити комплексний аналіз документа. Інші системи перевірки базуються на жорстких шаблонах, що не враховують можливих варіацій у форматуванні, або використовують машинне навчання, яке потребує великих обчислювальних ресурсів.

Таким чином, актуальною задачею є розроблення автоматизованого методу перевірки документів, який дозволяє аналізувати як характеристики форматування документа, так і граматичні та стилістичні помилки, при цьому забезпечуючи високу точність і продуктивність роботи системи.

Мета дослідження. Метою даного дослідження є підвищення точності та ефективності перевірки форматування документів шляхом розробки та програмної реалізації методу, який автоматично перевіряє відповідність документів нормативним вимогам, зменшуючи потребу у ручному контролі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наявні методи перевірки форматування документів можна умовно розділити на два основні підходи: методи, засновані на фіксованих правилах, і методи, які використовують машинне навчання для аналізу тексту. Перший підхід дозволяє здійснювати перевірку відповідності певним параметрам, таким як шрифти, розміри тексту, міжрядкові інтервали тощо [1]. Він забезпечує високу точність при роботі з документами, що мають жорстко регламентовані стандарти, однак має обмежену адаптивність до різних варіантів форматування [2]. Другий підхід, що включає використання технологій обробки природної мови (NLP), аналізувати структуру документа, визначати заголовки, абзаци, списки та інші елементи тексту [3]. Дослідження показують, що методи NLP можуть забезпечити вищу гнучкість у перевірці форматування, дозволяючи враховувати контекстні особливості документів, проте вимагає значних обчислювальних ресурсів та специфічних налаштувань моделі для кожного випадку [4].

Ефективність перевірки форматування може бути підвищена завдяки використанню гібридного методу, який поєднує переваги обох підходів. Водночас такий метод вимагає адаптації до різних видів документів і вдосконалення алгоритмів обробки тексту. Крім цього, наявні рішення для перевірки форматування часто зосереджені лише на базових параметрах і не забезпечують комплексний аналіз відповідності документів всім необхідним вимогам.

Запропонований метод. Оскільки більшість користувачів працює з документами у форматі DOCX на персональних комп'ютерах, саме цей формат було обрано як основний для реалізації перевірки форматування. DOCX-файли зберігають детальну інформацію про структуру документа, включаючи шрифти, інтервали, відступи, нумерацію та інші важливі параметри, що дозволяє виконувати повноцінний аналіз форматування. Така деталізація даних робить DOCX ідеальним форматом для задач, пов'язаних з автоматизованою перевіркою відповідності документів стандартам.

Однією з ключових особливостей цього методу є використання гібридного підходу, що поєднує традиційні алгоритмічні перевірки форматування з можливостями NLP. Така інтеграція дозволяє не лише досягти високої точності в перевірці документів, але й охопити як структурні, так і лінгвістичні елементи. Завдяки цьому метод стає більш універсальним, оскільки може бути адаптований під різні стандарти форматування, що є важливим для академічних робіт, які мають специфічні вимоги. У порівнянні з наявними рішеннями, що обмежуються лише базовими аспектами форматування, цей підхід забезпечує глибшу інтеграцію та можливість налаштування специфічних правил для кожного розділу документа.

У процесі розробки методу розглядалися різні підходи для реалізації даного методу. Для реалізації було обрано мову програмування Python, оскільки вона надає широкі можливості для роботи з текстовими документами, обробки форматування та інтеграції з бібліотеками штучного інтелекту.

Для перевірки форматування було досліджено декілька слушних варіантів: python-docx, Aspose.Words, та Word API. Проблемою використання python-docx була

точність перевірок. Якщо легкі аспекти документа (наприклад розмір шрифтів, розміри відступів тощо) було перевірити легко, то до більш складних елементів форматування (наприклад нумеровані списки, таблиці тощо) доступу взагалі не має. Щодо Aspose.Words, то головним мінусом виявилась потреба ліцензії, оскільки програмне забезпечення розроблювалось виключно як безкоштовне. Проте Word API задовольнив більшість необхідних потреб. Хоч він і вимагає детального розуміння XML-структури документів він надає глибокий рівень доступу до структурних компонентів документів, як простих, так і складних, що забезпечує високу точність перевірки форматування.

Для перевірки наявності стилістичних і граматичних помилок було розглянуто два варіанти реалізації: використання натренованих моделей, використання API. Було розглянуто декілька натренованих моделей і виявлено декілька важливих недоліків: високі вимоги до обчислювальних ресурсів (RAM, CPU, GPU, hard drive memory); відносно низька точність моделей для української мови або взагалі відсутність її підтримки; покладання на конкретні версії Python. Однак API повністю вирішувало ці проблеми. Було розглянуто декілька варіантів API: Grammarly та LanguageTool. Обидва показали доволі точні результати, проте головним недоліком Grammarly стала плата за використання. Тому для реалізації гібридного підходу, використовуються Word API та LanguageTool API.

Розглянемо більш детально кожен з наведених компонентів. Word API надає доступ до структурних елементів документа у форматі DOCX та дозволяє отримувати детальну інформацію про його форматування, зокрема шрифти, відступи, поля, інтервали та інші структурні характеристики. Word API працює з документом як із деревоподібною структурою, подібною до Document Object Model (DOM), що дає можливість обробляти документ на рівні окремих елементів. Наприклад, документ можна розділити на логічні частини, такі як заголовки, параграфи, списки, таблиці, та обробляти кожну з цих частин як окремий "діапазон". Ця структура дозволяє точно визначати, до яких елементів застосовуються певні правила форматування, що також спрощує перевірку конкретних частин документа (наприклад титульної сторінки, змісту, основної частини тощо), і дає змогу перевіряти відповідність кожного з них стандартам [5].

LanguageTool API використовується для перевірки граматики, стилістики та орфографії документа. Це відкрите рішення для аналізу тексту, яке поєднує правила перевірки граматики та алгоритми машинного навчання [6]. LanguageTool підтримує багатомовний аналіз тексту та дозволяє виявляти помилки у різних аспектах письма, включаючи граматичні, орфографічні та стилістичні порушення. Основний принцип роботи LanguageTool полягає у використанні бази лінгвістичних правил, яка містить типові шаблони помилок, а також мовних моделей, навчених на великих корпусах текстів. При аналізі документа API перевіряє кожне слово та речення, порівнюючи їх із вбудованими правилами. Додатково застосовуються статистичні моделі, що дозволяють визначати контекстуальні помилки та неточності у формулюваннях. Крім того, сервіс може ідентифікувати стилістичні порушення, такі як надмірне використання пасивного стану, надто довгі або складні речення, невідповідність формального або неформального стилю написання. Це

дозволяє аналізувати не лише формальні помилки, але й покращувати загальну якість тексту [7].

Проте, незважаючи на натренованість цієї моделі, вона все одно мала потенціал для вдосконалення. Без використання фільтрацій API надає доволі багато помилкових результатів, починаючи з неправильних пропозицій для виправлення слів, закінчуючи результатами, які зовсім не мають сенсу. Для розв'язання цієї проблеми було вирішено створити список ігнорованих слів, які не будуть перевірятись. Але і цього було недостатньо, оскільки API може надавати помилкові слова для виправлення або ж видозмінювати їх у виправленій версії (наприклад за відмінком). Тому було вирішено використовувати фільтрування слів за допомогою відстані Левенштейна.

Відстань Левенштейна – це міра різниці між двома рядками, яка визначає мінімальну кількість операцій (вставки, видалення або заміни символів), необхідних для перетворення одного рядка в інший [8]. Для обчислення відстані Левенштейна зазвичай використовується базовий алгоритм, який передбачає побудову матриці розміром $(n + 1) \times (m + 1)$, де n і m — довжини порівнюваних рядків. При цьому операції вставки, видалення та заміни символів мають однакову вагу. Формування матриці здійснюється за допомогою наступного рекурсивного виразу:

$$D_{0,0} = 0$$

$$D_{ij} = \min \begin{cases} D_{i-1,j-1} + 0(equal, nonchange) \\ D_{i-1,j-1} + 1(replace) \\ D_{i-1,j} + 1(insert) \\ D_{i,j-1} + 1(delete) \end{cases}$$

Для відстані Левенштейна існують такі верхня і нижня межі:

- Дистанція Левенштейна не є меншою за різницю довжини рядків, що порівнюються
- Вона не є більшою довжини найдовшого рядка
- Вона дорівнює 0 тоді і тільки тоді, коли рядки однакові (однакові символи на однакових позиціях) [9].

Результати експериментальних досліджень. У ході експерименту було перевірено 60 бакалаврських робіт студентів попередніх років. Оскільки ці роботи вже проходили нормативний контроль і були допущені до друку, очікувалося, що кількість виявлених помилок буде мінімальною. Проте аналіз показав, що навіть у перевірених документах містилося достатньо помилок форматування та граматичних неточностей.

Перевірка за допомогою Word API дозволила автоматично оцінити відповідність документів вимогам щодо шрифтів, розмірів тексту, міжрядкового інтервалу, полів сторінок, структури заголовків, маркованих та нумерованих списків тощо. Точність перевірки параметрів форматування, визначена шляхом підрахунку частки правильних позитивних виявлень серед усіх знайдених помилок, досягла 96%.

Аналіз граматичних та стилістичних помилок виконувався за допомогою LanguageTool, результати якого оцінювалися за формулою:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

TP – кількість правильних виправлень, що відповідають експертному рішення, FP – кількість неправильних виправлень, FN – кількість допущених LanguageTool помилок, TN – кількість правильно проігнорованих помилок. Точність LanguageTool склала близько 92%, при цьому найбільша кількість виправлень стосувалася граматики, оскільки під час ручної перевірки текст здебільшого переглядається поверхово.

Крім покращення точності, автоматизація значно скоротила час аналізу документів. Якщо раніше перевірка одного документа займала близько 30 хвилин, то з використанням автоматизованої системи цей час скоротився до 3 хвилин (у 10 разів швидше). Було виявлено, що швидкість перевірки залежить від обсягу документа: робота на 60 сторінок аналізується приблизно за 3 хвилини, а на 100 сторінок — за 5 хвилин. Для людини ж повна перевірка 100-сторінкового документа займає 30–40 хвилин, залежно від складності змісту.

Висновки. Дослідження було присвячене розробці комбінованого методу автоматичної перевірки документів на відповідність нормативним вимогам. Запропонований підхід, що об'єднує Word API для перевірки форматування та LanguageTool API для аналізу тексту, дозволяє досягти високої точності й універсальності. Результати показують, що метод значно покращує ефективність та точність перевірки форматування, автоматизуючи завдання, які зазвичай виконуються вручну. У майбутніх дослідженнях планується удосконалити метод для підтримки додаткових форматів документів та розширити можливості аналізу складніших стилістичних вимог, що забезпечить ще більш високу адаптивність та надійність системи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Bergman, M., & Dourish, P. (2019). Стандарти форматування документів і відповідність: порівняльне дослідження. DOI: 10.1145/3313831
2. Smith, J., & Taylor, K. (2021). Правило-орієнтована валідація документів: автоматизація перевірки відповідності у великих системах. DOI: 10.1016/j.ijhcs.2021.102667
3. Nguyen, T., & Daumé, H. (2020). Обробка природної мови для автоматизованого аналізу документів. DOI: 10.18653/v1/P19-1234
4. Jurafsky, D., & Martin, J. H. (2022). Обробка мови і мовлення (3-тє видання). DOI: 10.5555/3382195
5. Microsoft. Welcome to the Open XML SDK for Office [Електронний ресурс] // Microsoft Learn. – Режим доступу: <https://learn.microsoft.com/en-us/office/open-xml/open-xml-sdk>.
6. Naber, D. (2003). Правило-орієнтована система перевірки стилю та граматики. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.danielnaber.de/language-tool/download/style_and_grammar_checker.pdf
7. Офіційний сайт LanguageTool. Як LanguageTool порівнюється з іншими засобами перевірки граматики. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://languagetool.org/>

8. Navarro, G. (2001). Огляд методів наближеного зіставлення рядків. DOI: 10.1145/375360.375365
9. Wagner, R. A., & Fischer, M. J. (1974). " Проблема виправлення рядка до рядка". Журнал AOT, 21(1), 168–173. DOI: 10.1145/321796.321811

REFERENCES

1. Bergman, M., & Dourish, P. (2019). Document Formatting Standards and Compliance: A Comparative Study. DOI: 10.1145/3313831
2. Smith, J., & Taylor, K. (2021). Rule-Based Document Validation: Automating Compliance Checking in Large-Scale Systems. DOI: 10.1016/j.ijhcs.2021.102667
3. Nguyen, T., & Daumé, H. (2020). Natural Language Processing for Automated Document Review. DOI: 10.18653/v1/P19-1234
4. Jurafsky, D., & Martin, J. H. (2022). Speech and Language Processing (3rd Edition). DOI: 10.5555/3382195
5. Microsoft. Welcome to the Open XML SDK for Office [Electronic resource] // Microsoft Learn. – URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/office/open-xml/open-xml-sdk>.
6. Naber, D. (2003). A Rule-Based Style and Grammar Checker. [Electronic resource]. URL: https://www.danielnaber.de/language-tool/download/style_and_grammar_checker.pdf
7. LanguageTool Official Site. How LanguageTool Compares to Other Grammar Checkers. [Electronic resource]. – URL: <https://languagetool.org/>
8. Navarro, G. (2001). A Guided Tour to Approximate String Matching. DOI: 10.1145/375360.375365
9. Wagner, R. A., & Fischer, M. J. (1974). "The String-to-String Correction Problem". Journal of the ACM, 21(1), 168–173. DOI: 10.1145/321796.321811

Received 18.04.2025.
Accepted 21.04.2025.

Method for automatic document verification for compliance with regulatory requirements

This paper focuses on developing an efficient method for automatically verifying document formats, ensuring they meet specific formatting standards. Existing approaches utilizing rule-based systems and machine learning techniques are reviewed and analyzed. A modified method that integrates both structural and linguistic checks is proposed. A comparative analysis of the proposed method against existing approaches is conducted. Potential directions for further research are proposed as well.

The study reviews current approaches, including rule-based systems and machine learning techniques, evaluating their effectiveness in detecting formatting inconsistencies. While rule-based methods offer precision and transparency, they are limited in adaptability to complex document structures. Conversely, machine learning techniques demonstrate greater flexibility but often require extensive labeled datasets and struggle with interpretability. To address these challenges, a hybrid approach is proposed, combining structural analysis with linguistic verification. This method integrates predefined formatting rules with natural language processing methods to enhance accuracy and adaptability.

The proposed system is implemented using Word API for structural verification, while LanguageTool API is used to analyze textual aspects to identify stylistic and linguistic deviations. Key formatting aspects evaluated include font consistency, margins, line spacing, paragraph alignment, and numbering styles. Additionally, NLP responses are filtered using Levenshtein distance to prevent false and senseless results.

Keywords: automatic document validation, regulatory requirements, DOCX formatting, LanguageTool API, Word API, Levenshtein distance, structural text analysis, text validation optimization.

Вербовий Дмитро Станіславович – магістрант кафедри програмного забезпечення комп’ютерних систем, факультет прикладної математики, національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Саяпіна Інна Олександрівна – к.т.н, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп’ютерних систем, факультет прикладної математики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Verbovyi Dmytro – student of the Department of Computer Systems Software, Faculty of Applied Mathematics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

Saiapina Inna – Ph.D., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer Systems Software, Faculty of Applied Mathematics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

О.А. Солуян, Л.А. Люшенко

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ WEBASSEMBLY ДЛЯ РОЗРОБКИ ВИСОКОПРОДУКТИВНОГО КОДУ У ВЕБДОДАТКАХ

Анотація: Однією з основних проблем інтерпретованих мов, таких як JavaScript, є їх обмежена швидкодія у порівнянні з компільованими мовами. Інтерпретований код виконується повільніше, що може спричиняти затримки у роботі застосунків, особливо у випадках обробки великих обсягів даних чи виконання складних обчислень. Для подолання цієї проблеми використовуються різноманітні методи оптимізації JavaScript коду. Одним із найбільш перспективних рішень є технологія WebAssembly. WebAssembly дозволяє виконувати код із продуктивністю, наближеною до швидкодії низькорівневих мов, таких як C, C++ або Rust. Серед головних переваг WebAssembly є можливість компіляції коду з різних мов програмування у швидкий і компактний формат, який виконується безпосередньо у браузері. Це значно покращує продуктивність вебзастосунків, забезпечуючи користувачів більш плавним та швидким досвідом взаємодії. Проте потенціал WebAssembly ще не повністю розкритий. Існує необхідність у подальшому розвитку та вдосконаленні методів ефективного кодування, що компілюється у WebAssembly, з метою досягнення максимальної продуктивності сучасних вебзастосунків.

Ключові слова: JavaScript, WebAssembly, оптимізація, продуктивність, вебзастосунки.

Постановка проблеми. У сучасному світі, де зростають вимоги до швидкодії та ефективності вебзастосунків, проблема забезпечення високопродуктивного виконання коду набуває особливої актуальності. Традиційні програмні засоби такі, як JavaScript, хоча й добре адаптовані для розробки інтерфейсів користувача, стикаються з обмеженнями при виконанні складних обчислювальних задач, що призводить до зниження загальної продуктивності застосунків, особливо при роботі з великими обсягами даних чи інтенсивними алгоритмічними операціями. В цьому контексті застосування WebAssembly є перспективним рішенням, яке обіцяє майже нативну швидкість виконання коду завдяки компіляції в низькорівневий байткод, що може виконуватися безпосередньо у браузері. Проте, незважаючи на очевидні переваги, використання WebAssembly для розробки високопродуктивного коду в вебзастосунках стикається з рядом викликів, а саме: необхідно забезпечити ефективну інтеграцію з існуючими вебтехнологіями, вирішити питання сумісності між різними платформами та гарантувати безпеку виконання коду в умовах інтернет середовища. Окрім того дослідження в області оптимізації управління пам'яттю та енергоспоживання, а також аналізуванню

можливостей комбінування WebAssembly з іншими мовами програмування, є критично важливими для повноцінного розкриття потенціалу цієї технології. Таким чином, необхідність комплексного дослідження та розробки нових методологій інтеграції WebAssembly у веброзробку є актуальною задачею, вирішення якої дозволить забезпечити створення продуктивних швидкодіючих вебзастосунків з мінімізацією енерго та комп'ютерних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки було проведено безліч досліджень у галузі оптимізації вебзастосунків. Серед методів, що сприяють підвищенню продуктивності вебзастосунків, можна виділити мінімізацію розміру JavaScript-файлів, оптимізацію запитів до серверу (зокрема, через використання GraphQL), використання кешування, застосування прогресивних вебзастосунків (PWA), а також впровадження асинхронного завантаження компонентів. WebAssembly як метод оптимізації з'явився відносно нещодавно (2017 рік), і кількість наукових публікацій про неї на даний момент не дуже велика.

У роботі "WebAssembly Performance Analysis: A Comparative Study of C++ and Rust Implementations" [1] автори досліджують продуктивність WebAssembly-модулів, згенерованих із програм, написаних на C++ та Rust. Метою є порівняння ефективності виконання завдань, таких як сортування та множення матриць. Результати показали, що модулі, створені з коду на Rust, демонструють вищу швидкість та ефективність порівняно з модулями на C++.

У статті "WebAssembly versus JavaScript: Energy and Runtime Performance" [2] дослідники проводять систематичне вивчення енергоспоживання та часу виконання WebAssembly у порівнянні з JavaScript. Використовуючи мікро-бенчмарки та реальні застосунки, вони виявили, що WebAssembly перевершує JavaScript за швидкістю та енергоефективністю, хоча різниця залежить від конкретних задач та браузерів.

У дослідженні "Empowering Web Applications with WebAssembly: Are We There Yet?" [3] аналізується, як браузерні рушії оптимізують виконання WebAssembly у порівнянні з JavaScript. Результати показують, що WebAssembly може бути швидшим за JavaScript для невеликих обсягів даних, але при збільшенні розміру вхідних даних JavaScript може перевершувати WebAssembly через агресивніші JIT-оптимізації. Крім того, WebAssembly споживає більше пам'яті через свою лінійну модель пам'яті.

У статті "Bringing the Web Up to Speed with WebAssembly" [4] представлено архітектуру та можливості WebAssembly як портативного низькорівневого байт-коду, що забезпечує компактне представлення, ефективну валідацію та компіляцію, а також безпечне виконання з низькими накладними витратами. Автори підкреслюють потенціал WebAssembly для значного підвищення продуктивності веб-застосунків.

Таким чином, незважаючи на відносно невелику кількість наукових публікацій на тему WebAssembly, проведені дослідження показують значний потенціал цієї технології для підвищення продуктивності вебзастосунків. Однак, вибір мови програмування, з якої створюється WebAssembly-модуль, а також тип задачі можуть суттєво впливати на кінцеві показники продуктивності.

Мета дослідження - визначення ключових можливостей інтеграції WebAssembly при створенні високопродуктивних вебзастосунків для виявлення переваг застосування WebAssembly та визначити стратегії використання цієї технології в сучасній веброботі. Визначається продуктивність WebAssembly-коду в порівнянні з аналогічними реалізаціями на JavaScript із застосуванням компілятора Cheerp [5].

Виклад основного змісту. Особливості організації пам'яті та способи її використання мають безпосередній вплив на продуктивність програм. WebAssembly та JavaScript виконуються у середовищі рушіїв JavaScript, проте їх підходи до виконання коду та управління пам'яттю суттєво різняться [6].

Віртуальна машина WebAssembly оперує кількома регіонами пам'яті (рис.1). Пам'ять керованого коду містить безпосередньо код програми WebAssembly та доступна виключно віртуальній машині. В зв'язку з цим WebAssembly код не може її зчитувати чи змінювати. Керований стек викликів зберігає адреси повернення, представлені типом i32, який також використовується для позначення вказівників та адрес у пам'яті. Він забезпечує відстеження активних викликів функцій і захищає від атак, що базуються на підміні адрес повернення. Керований стек оцінки використовується для передачі параметрів інструкціям і збереження їх результатів. Він може містити чотири базові типи WebAssembly — i32, i64, f32 та f64, що відповідають цілим числам і числам з плаваючою крапкою, закодованим на 32 або 64 біти [7].

Лінійна пам'ять призначена для зберігання нескаларних типів даних, таких як рядки, масиви чи списки. Вона являє собою єдиний неперервний сегмент, у якому відсутні поняття прав доступу, тому усі дані можна як читати, так і записувати. Крім того, лінійна пам'ять не використовує механізми рандомізації адрес, як-от ASLR або PIE, які підтримуються всіма основними операційними системами. Управління цією пам'яттю покладається на програму, але у більшості мов програмування і відповідних компіляторів структура організації пам'яті аналогічна нативним виконуваним файлам і включає стек, купу та зону для статичних або заздалегідь визначених значень. Ці зони зберігають основну частину даних, розподілених відповідно до вихідного коду та використовуваного компілятора.

Локальні та глобальні змінні WebAssembly є додатковим механізмом керування пам'яттю. Як і стек оцінки, вони обмежені чотирма базовими типами. Глобальні змінні доступні у межах усього модуля, а локальні — лише в межах виконуваної функції. Значення цих змінних обробляються за допомогою спеціальних інструкцій і зберігаються у визначеній таблиці, недоступній з лінійної пам'яті. Водночас варто зазначити, що сучасні інструментарії зазвичай не відображають локальні та глобальні змінні з мов програмування безпосередньо на змінні WebAssembly.

Компілятори WebAssembly використовують лінійну пам'ять для створення схеми розташування пам'яті, що включає три зони, а саме: стек, купу та зону для статичних даних. Ці зони можуть бути організовані різними способами, і на практиці різні компілятори приймають різні рішення, що призводить до різних схем. У цій статті буде

зосереджено увагу на двох варіантах, доступних у LLVM [8] toolchain: «stack-first» та «no-stack-first» (рис. 1).

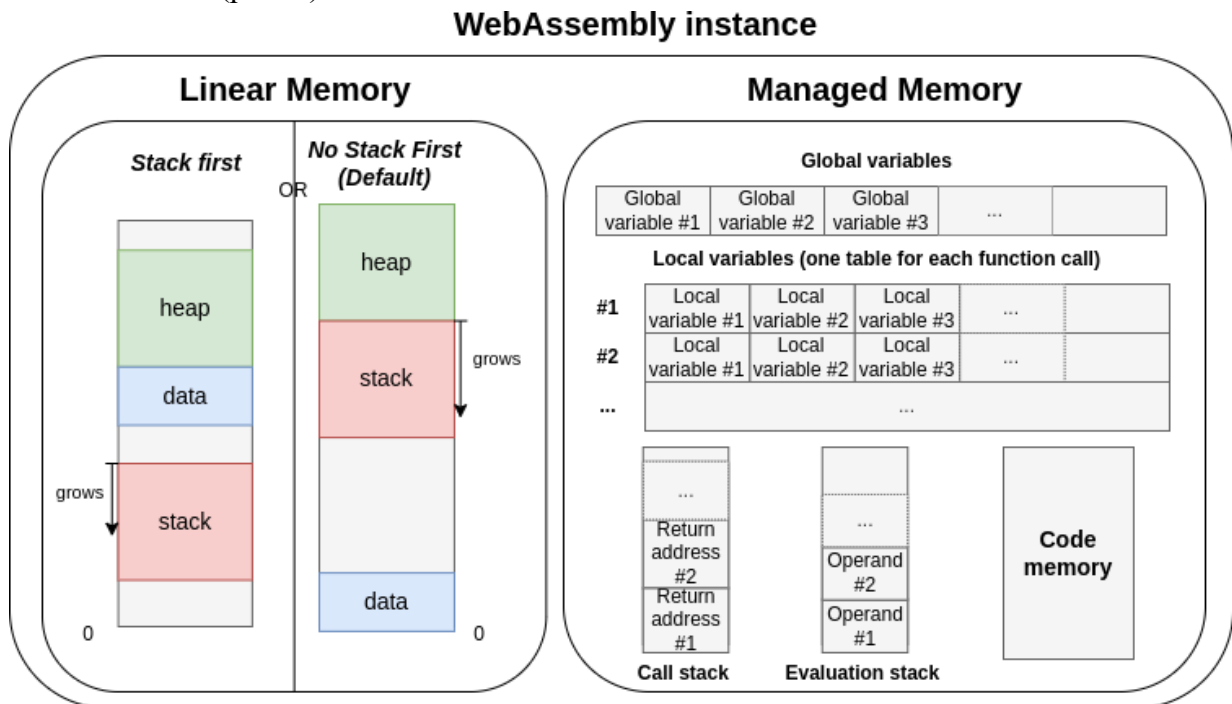


Рисунок 1 - Макет пам'яті віртуальної машини WebAssembly

За замовчуванням LLVM використовує схему «no-stack-first», де зона даних фіксованого розміру розташована за найнижчими адресами. Далі йде стек, який зростає у напрямку до менших адрес, а купа — у напрямку до більших. Відсутність чіткого розмежування пам'яті в WebAssembly означає, що переповнення стека (тобто ситуація, коли його розширення доходить до зіткнення з іншою зоною) може безслідно пошкодити дані у зоні даних. Через цей недолік розробники Rust запропонували схему «stack-first», де стек розташований на нижчих адресах, а зона даних і купа — на вищих. Такий підхід призводить до аварійного завершення роботи WebAssembly runtime у разі переповнення стека, оскільки стек буде зростати до недопустимих (негативних) адрес, не перезаписуючи інші дані, що дає змогу однозначно виявити переповнення та уникнути непередбачуваної поведінки. Станом на сьогодні він був прийнятий за замовчуванням у Rust, у Zig, а в LLVM обговорюють можливість зробити його стандартним.

Однак, для досягнення високої продуктивності недостатньо лише враховувати модель пам'яті. Не менш важливим є аналіз операцій передачі даних між JavaScript і WebAssembly, що супроводжується серіалізацією та десеріалізацією складних структур.

Загалом, правильне вимірювання продуктивності WebAssembly має охоплювати не лише загальний час виконання алгоритму, а й такі аспекти, як ініціалізація WebAssembly, передача даних між JavaScript і WebAssembly, а також витрати часу на перемикання контексту виконання. WebAssembly алгоритм має наступні фази виконання:

1. запуск WebAssembly (час від ініціалізації модуля);
2. вхід у функцію з JavaScript;
3. десеріалізація параметрів;
4. виконання алгоритму;
5. серіалізація результатів;
6. повернення до контексту JavaScript.

WebAssembly у своїй основі підтримує лише чотири примітивні типи (i32, i64, f32 та f64). Це означає, що складні типи, такі як рядки, масиви, об'єкти або структуровані дані, не є частиною його внутрішнього представлення. Робота з такими складними структурами залежить від механізмів серіалізації та десеріалізації, які використовують компілятори мов програмування, що транслюються в WebAssembly. Так у C/C++ зазвичай працюють з покажчиками та виділенням пам'яті, використовуючи malloc та free, а самі складні структури передаються через буфери в пам'яті WebAssembly. Аналогічно в Rust управління пам'яттю відбувається через систему володіння (ownership), а при компіляції в WebAssembly використовується певний механізм для взаємодії з JavaScript, наприклад wasm-bindgen, який може автоматично перетворювати Rust-об'єкти в серіалізовані формати [9].

У JavaScript взаємодія з WebAssembly зазвичай відбувається через WebAssembly.Memory, де велика область пам'яті використовується як масив байтів (ArrayBuffer). Складні структури перетворюються у відповідні масиви байтів перед передачею в WebAssembly, а зворотне перетворення здійснюється при зчитуванні даних. Для цього використовуються бібліотеки та компіляторні утиліти, такі як AssemblyScript [10], який адаптує TypeScript для WebAssembly, або Emscripten для C/C++.

Таким чином, ефективність роботи зі складними структурами у WebAssembly значною мірою залежить від обраної мови програмування та її механізмів обробки пам'яті. Оптимізація серіалізації та десеріалізації, а також мінімізація копіювання даних є ключовими аспектами для підвищення продуктивності.

Це має суттєве значення при дослідженні швидкодії WebAssembly. Адже сама лише серіалізація складних JavaScript-об'єктів в байтовий ArrayBuffer і зворотня десеріалізація можуть зайняти більше часу ніж виконання самого алгоритму у wasm-функції. На лістингах 1 і 2 наведені вбудовані функції компілятора AssemblyScript, які десеріалізують(опускають) складні структури даних до зрозумілого для WebAssembly формату та серіалізують їх назад після завершення виконання функції у контекст JavaScript.

Лістинг 1 - Функція `__lowerArray`

```
function __liftArray(liftElement, align, pointer) {  
    if (!pointer) return null;  
    const dataStart = __getU32(pointer + 4),  
        length = __dataview.getUint32(pointer + 12, true),  
        values = new Array(length);
```



```
for (let i = 0; i < length; ++i) values[i] = liftElement(dataStart + ((i << align) >>> 0));  
return values;}
```

Лістинг 2 - Функція `__liftArray`

```
function __lowerArray(lowerElement, id, align, values) {  
  if (values == null) return 0;  
  const length = values.length,  
        buffer = exports.__pin(exports.__new(length << align,  
1)) >>> 0,  
        header = exports.__pin(exports.__new(16, id)) >>> 0;  
  __setU32(header + 0, buffer);  
  __dataview.setUint32(header + 4, buffer, true);  
  __dataview.setUint32(header + 8, length << align, true);  
  __dataview.setUint32(header + 12, length, true);  
  for (let i = 0; i < length; ++i) lowerElement(buffer + ((i  
<< align) >>> 0), values[i]);  
  exports.__unpin(buffer); exports.__unpin(header);  
  return header;}
```

Коли wasm-функція потребує перетворення великої кількості даних, представлених в javascript-об'єктах, в зрозумілий формат byte-масиву, wasm буде як правило показувати гірший перформанс ніж JavaScript. Це свідчить про те, що відповідним варіантом використання WebAssembly є випадки, коли вхідні дані прості, передача даних обмежена, але вони використовуються для складних обчислень, які дають багато вихідних результатів.

Враховуючи це, основну увагу даного дослідження зосереджено на аналізі продуктивності WebAssembly у порівнянні з JavaScript в умовах ізольованого виконання алгоритмів без передачі контексту.

Гіпотеза дослідження полягає у припущенні, що WebAssembly здатен забезпечити вищу продуктивність у виконанні обчислювально-інтенсивних алгоритмів у порівнянні з JavaScript за рахунок попередньої компіляції у байткод та ефективнішого управління пам'яттю. Очікується, що саме у сценаріях із обмеженою передачею складних структур даних між JavaScript і WebAssembly, останній продемонструє значну перевагу в швидкодії.

У якості тестових прикладів обрано алгоритми лінійної алгебри з набору бенчмарків PolyBenchC [11]. Це дозволяє провести об'єктивне порівняння сирової обчислювальної продуктивності обох технологій без впливу зовнішніх факторів. У таблиці 1 представлено 20 програм на C з набору бенчмарків PolyBenchC.

Бенчмарки PolyBenchC

№	Бенчмарк	Опис
1	2mm	Two matrix multiplications
2	3mm	Three matrix multiplications
3	atax	Matrix transpose vector multiplication
4	bicg	BiConjugate gradient
5	cholesky	Matrix decomposition
6	deriche	Smoothing filter (Deriche)
7	durbin	Toeplitz systems solver (Durbin's algorithm)
8	floyd-warshall	All-pairs shortest paths
9	gemm	General Matrix Multiplication
10	gemver	Multiple Matrix-Vector Multiplication
11	gesummv	Summed Matrix-Vector Multiplication
12	gramschmidt	Orthogonalization (Gram-Schmidt process)
13	lu	LU decomposition
14	ludcmp	LU decomposition (compact)
15	mvt	Matrix vector multiplication
16	symm	Symmetric matrix multiplication
17	syr2k	Symmetric rank-2k update
18	syrk	Symmetric rank-k update
19	trisolv	Triangular matrix solver
20	trmm	Triangular matrix multiplication

На рис.2 наведено процедуру вимірювання продуктивності WebAssembly та JavaScript, яка складається з чотирьох етапів:

1. Трансформація вихідного коду.
2. Компіляція у Wasm/JS.
3. Розгортання.
4. Збір даних.

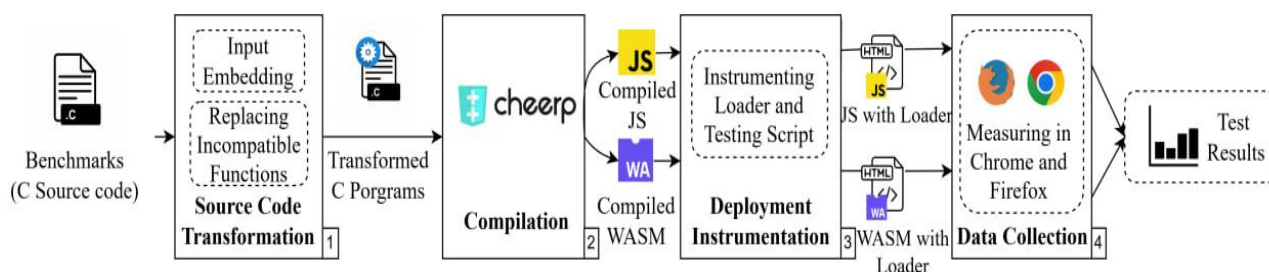


Рисунок 2 - Вимірювання продуктивності WebAssembly та JavaScript

Оскільки деякі реалізації алгоритмів мали помилки компіляцій, виправляємо їх на першому етапі, застосовуючи трансформацію вихідного коду. Трансформація вихідного коду передбачає заміну несумісних конструкцій мови C, які не підтримуються

Cheerp. На другому етапі компілюємо 20 програм на C за допомогою Cheerp для генерації WebAssembly та JavaScript. Попередньо до компіляції додаємо код для вимірювання часу виконання алгоритмів. На третьому етапі створюємо мінімальну HTML-сторінку для завантаження програм на WebAssembly/JavaScript. На четвертому етапі запускаємо згенеровані програми WebAssembly/JavaScript на HTML-сторінках і збираємо дані про час виконання та використання пам'яті за допомогою вбудованих інструментів розробника у браузерях. В таблиці 2 наведені результати проведеного дослідження.

Таблиця 2

Часові показники виконання WebAssembly і JavaScript

Алгоритм	Розмір даних	JavaScript Сер. час (с)	WebAssembly Сер. час (с)	Performance Ratio (JS/WASM)
3mm	SMALL	0.016500	0.003060	5.392157
3mm	MEDIUM	0.056000	0.051440	1.088647
3mm	LARGE	5.266580	8.851160	0.595016
atax	SMALL	0.003960	0.000640	6.187500
atax	MEDIUM	0.008160	0.002780	2.935252
atax	LARGE	0.047140	0.027160	1.735641
bicg	SMALL	0.005160	0.000820	6.292683
bicg	MEDIUM	0.009360	0.002380	3.932773
bicg	LARGE	0.049800	0.024320	2.047697
cholesky	SMALL	0.011280	0.006940	1.625360
cholesky	MEDIUM	0.088400	0.132020	0.669596
cholesky	LARGE	14.906300	21.574020	0.690938
deriche	SMALL	0.024220	0.001520	15.934211
deriche	MEDIUM	0.069100	0.013540	5.103397
deriche	LARGE	0.901520	0.273100	3.301062
durbin	SMALL	0.001900	0.000580	3.275862
durbin	MEDIUM	0.002820	0.000880	3.204545
durbin	LARGE	0.011560	0.013400	0.862687
floyd	SMALL	0.022100	0.013540	1.632201
floyd	MEDIUM	0.282500	0.219700	1.285844
floyd	LARGE	46.080300	38.256420	1.204512
gemm	SMALL	0.005780	0.001580	3.658228
gemm	MEDIUM	0.025000	0.018420	1.357220
gemm	LARGE	1.300060	2.171760	0.598620
gemver	SMALL	0.005220	0.000740	7.054054
gemver	MEDIUM	0.012180	0.002700	4.511111
gemver	LARGE	0.065880	0.043280	1.522181
gesummv	SMALL	0.003480	0.000700	4.971429
gesummv	MEDIUM	0.006260	0.001100	5.690909

gesummv	LARGE	0.045220	0.019140	2.362591
gramschmidt	SMALL	0.008900	0.001180	7.542373
gramschmidt	MEDIUM	0.025680	0.027900	0.920430
gramschmidt	LARGE	3.681840	4.257600	0.864769
lu	SMALL	0.012500	0.006600	1.893939
lu	MEDIUM	0.099860	0.151680	0.658360
lu	LARGE	18.965720	27.973800	0.677982
ludcmp	SMALL	0.012920	0.006280	2.057325
ludcmp	MEDIUM	0.111520	0.143000	0.779860
ludcmp	LARGE	19.636700	24.696860	0.795109
mvt	SMALL	0.005020	0.000620	8.096774

На рис. 3 наведено результати експериментів, у яких WebAssembly продемонстрував кращу швидкодію на певних алгоритмах з визначеним розміром вхідних даних. У свою чергу, на рис. 4 показані експерименти, де JavaScript показав себе краще на інших алгоритмах з іншими розмірами вхідних даних.

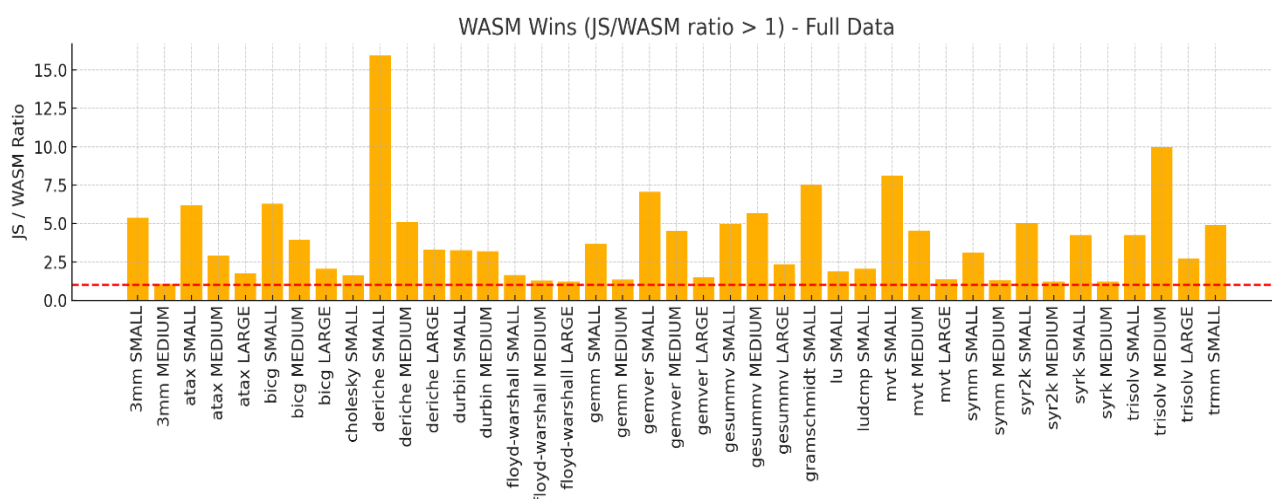


Рисунок 3 - Експерименти, де WebAssembly швидше за JS

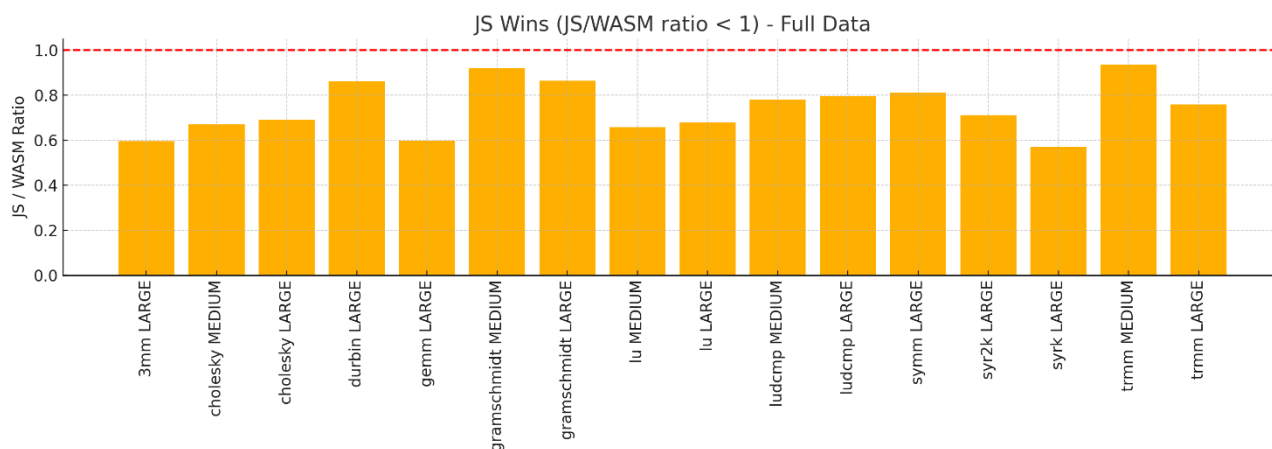


Рисунок 4 - Швидкодія JavaScript вища за WebAssembly

Таким чином, дослідження продуктивності WebAssembly і JavaScript дозволило отримати низку важливих результатів. По-перше, WebAssembly продемонстрував істотну перевагу у виконанні обчислювально інтенсивних алгоритмів на малих та середніх обсягах даних. У багатьох випадках фіксувалося прискорення в 5–15 разів порівняно з JavaScript. Найвищу продуктивність WebAssembly показав у задачах, що пов’язані з лінійною алгеброю, фільтрацією сигналів та симуляціями — зокрема, у таких алгоритмах як *deriche*, *atax*, *trisolv*, *gemm*, *bicg*.

По-друге, у випадку великих наборів даних спостерігалася змішана динаміка: частина алгоритмів (*cholesky*, *lu*, *syr2k*, *trmm*) працювала швидше у JavaScript або з мінімальною різницею. Це пояснюється тим, що великі об’єми даних збільшують витрати на серіалізацію/десеріалізацію, ініціалізацію пам’яті та завантаження WebAssembly-модулів, тоді як рушії JavaScript (наприклад, V8) активно оптимізують довготривалі обчислення. У таких сценаріях традиційний JavaScript, завдяки прямому доступу до об’єктної моделі та оптимізації рушіїв, може виявитися більш продуктивним.

Таким чином, результати підтверджують, що WebAssembly є найбільш доцільним у контекстах, де:

- структура даних є простою;
- обмін між WebAssembly та JavaScript мінімальний;
- обчислення зосереджені у самій *wasm*-функції;
- критично важлива продуктивність.

На основі проведеного дослідження доцільно рекомендувати використання WebAssembly у вебзастосунках, що потребують високої обчислювальної продуктивності за умов мінімального обміну даними з JavaScript. Найефективніше ця технологія проявляє себе у виконанні математичних та логічних обчислень, зокрема в алгоритмах лінійної алгебри, фільтрації, обробці сигналів, симуляціях, коли структура вхідних даних є простою, а сама обробка зосереджена всередині WebAssembly-модуля. У таких випадках WebAssembly дозволяє досягти значного прискорення порівняно з JavaScript, особливо на малих і середніх наборах даних.

Тому доцільним є комбінований підхід: обчислювальні «гарячі точки» реалізуються за допомогою WebAssembly, а загальна логіка застосунку, обробка подій і взаємодія з DOM залишаються у JavaScript. Крім того, важливо компілювати WebAssembly-модулі з максимальними оптимізаціями (*-O3*, *-Ofast*) і обов’язково проводити тестування кожного конкретного випадку, щоб обґрунтовано оцінити доцільність застосування цієї технології.

Висновки. JavaScript залишається основною мовою веброзробки завдяки своїй універсальності, інтеграції з DOM та потужним рушіям виконання. Однак його інтерпретована природа створює обмеження при вирішенні задач, які потребують високої продуктивності.

WebAssembly, як компільована альтернатива, надає суттєві переваги у швидкодії, особливо для обчислювально важких задач, що реалізуються мовами типу C/C++ або

Rust. Його можливості забезпечують продуктивність, близьку до нативної, у браузерному середовищі, при цьому зберігаючи платформну незалежність.

Тема дослідження є актуальною у зв'язку з постійним зростанням потреб у високопродуктивних вебдодатках, зокрема у галузях:

- фінансового моделювання;
- машинного навчання в браузері;
- візуалізації великих даних;
- ігрової індустрії.

Проведений аналіз підтверджує, що WebAssembly є ефективним інструментом для покращення швидкодії вебдодатків. Водночас його використання повинне базуватись на точному розумінні архітектури застосунку, характеру задач і обсягу даних, які передаються. У майбутньому очікується подальше вдосконалення засобів інтеграції WebAssembly у вебсередовище, що ще більше розширить можливості його практичного застосування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Rishi Kiran Aiyatham Prabakar. WebAssembly Performance Analysis: A Comparative Study of C++ and Rust Implementations. *Blekinge Institute of Technology, bachelor's thesis work*. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1879948/FULLTEXT01.pdf> (дата звернення 05.01.2025).
2. Joao De Macedo, Rui Abreu, Rui Pereira, Joao Saraiva. WebAssembly versus JavaScript: Energy and Runtime Performance. *2022 International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)*. URL: <https://repositorio.inesctec.pt/server/api/core/bitstreams/0870fb76-d463-456b-9e34-5b33bb7c0dd1/content> (дата звернення 15.01.2025).
3. Weihang Wang. Empowering Web Applications with WebAssembly: Are We There Yet? *2021 36th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE)*. URL: <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10312863https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3062341.3062363> (дата звернення 04.01.2025).
4. Andreas Haas, Andreas Rossberg, Derek L. Schuff, Ben L. Titzer. Bringing the Web up to Speed with WebAssembly. *PLDI 2017: Proceedings of the 38th ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation*. URL: <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3062341.3062363> (дата звернення 20.01.2025).
5. Cheerp Documentation Overview. *Documentation*. URL: <https://cheerp.io/docs/overview> (дата звернення 19.02.2025).
6. WebAssembly Developer Documentation. *Documentation*. URL: <https://webassembly.org/> (дата звернення 02.02.2025).
7. Securing Stack Smashing Protection in WebAssembly Applications. *Preprint publication*. URL: https://www.researchgate.net/publication/385177717_Securing_Stack_Smashing_Protection_in_WebAssembly_Applications (дата звернення 05.02.2025).

8. LLVM Reference Manual. *Documentation*. URL: <https://llvm.org/docs/CodeGenerator.html> (дата звернення 15.02.2025).
9. Jacob Nilsson, Andreas Trattner. Analyzing front-end performance using Webassembly. *Lund University, master's thesis work*. URL: <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=9094683&fileId=9094684> (дата звернення 07.02.2025).
10. AssemblyScript Runtime Variants. *The AssemblyScript Book*. URL: <https://www.assemblyscript.org/runtime.html> (дата звернення 01.03.2025).
11. PolyBench/C -- Homepage. *PolyBench/C the Polyhedral Benchmark suite*. URL: <https://www.cs.colostate.edu/~pouchet/software/polybench/> (дата звернення 10.03.2025).

REFERENCES

1. Rishi Kiran Aiyatham Prabakar. WebAssembly Performance Analysis: A Comparative Study of C++ and Rust Implementations. *www.diva-portal.org*. Retrieved from <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1879948/FULLTEXT01.pdf>.
2. Joao De Macedo, Rui Abreu, Rui Pereira, Joao Saraiva. WebAssembly versus JavaScript: Energy and Runtime Performance. *repositorio.inesctec.pt*. Retrieved from <https://repositorio.inesctec.pt/server/api/core/bitstreams/0870fb76-d463-456b-9e34-5b33bb7c0dd1/content>.
3. Weihang Wang. Empowering Web Applications with WebAssembly: Are We There Yet? *par.nsf.gov*. Retrieved from <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10312863https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3062341.3062363>.
4. Andreas Haas, Andreas Rossberg, Derek L. Schuff, Ben L. Titzer. Bringing the Web up to Speed with WebAssembly. *dl.acm.org*. Retrieved from <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3062341.3062363>.
5. Cheerp Documentation Overview. *cheerp.io*. Retrieved from <https://cheerp.io/docs/overview>.
6. WebAssembly. *webassembly.org*. Retrieved from <https://webassembly.org/>
7. Securing Stack Smashing Protection in WebAssembly Applications. *www.researchgate.net*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/385177717_Securing_Stack_Smashing_Protection_in_WebAssembly_Applications
8. https://www.researchgate.net/publication/385177717_Securing_Stack_Smashing_Protection_in_WebAssembly_Applications
9. LLVM Reference Manual. *llvm.org*. Retrieved from <https://llvm.org/docs/CodeGenerator.html>
10. Jacob Nilsson, Andreas Trattner. Analyzing front-end performance using Webassembly. *lup.lub.lu.se*. Retrieved from <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=9094683&fileId=9094684>
11. AssemblyScript Runtime Variants. *www.assemblyscript.org*. Retrieved from <https://www.assemblyscript.org/runtime.html#variants>
- PolyBenchC: the polyhedral benchmark suite. *web.cs.ucla.edu*. Retrieved from <http://web.cs.ucla.edu/~pouchet/software/polybench/>

Received 22.04.2025.
Accepted 25.04.2025.

***Research of WebAssembly usage for high-performance code
development in web applications***

The paper examines the potential of using WebAssembly in web applications to ensure high performance. It is shown that WebAssembly technology allows achieving nearly native speed compared to JavaScript due to bytecode compilation. The performance of WebAssembly is analyzed using linear algebra algorithms with PolyBenchC benchmarks. The research results demonstrated that WebAssembly shows advantages in executing computationally intensive algorithms with small and medium data sizes. The main factors affecting WebAssembly's efficiency when processing large data volumes are identified.

Люшенко Леся Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

Солуян Олександр Анатолійович – магістр кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

Liushenko Lesia – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Software for Computer Systems, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

Soluian Oleksandr – master of the Department of Software for Computer Systems, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

М.М. Нестеренко, В.В. Ведмідь

ПЕРЕМІЩЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ВКЛЮЧЕНЬ У ЛЕГКОБЕТОННИХ СУМІШАХ ПРИ ВІБРАЦІЙНОМУ УЩІЛЬНЕННІ

Анотація. У статті розглянуто процес вібраційного ущільнення полістиролбетонної суміші з урахуванням хвильового збудження. Актуальність зумовлена необхідністю підвищення однорідності та зниження пористості легкобетонних виробів. Метою дослідження є створення динамічної моделі системи «платформа – бетонна суміш» та визначення ефективних режимів ущільнення. Методами дослідження є аналітичне моделювання, чисельний розрахунок градієнтів тиску та аналіз переміщення повітряних включень у середовищі з високою в'язкістю. Отримано залежності швидкості дрейфу бульбашок від параметрів вібрації та доведено переваги комбінованого коливального збудження. Результати можуть бути використані для оптимізації режимів ущільнення у виробництві полістиролбетону.

Ключові слова: полістиролбетон, вібраційне ущільнення, комбіновані коливання, повітряні включення, динамічний тиск, хвильові ефекти, модель установки, амплітуда, градієнт тиску, дрейф бульбашок.

Постановка проблеми. Одним із важливих чинників, що визначає якість легкобетонних виробів, є ефективне видалення повітряних включень під час вібраційного ущільнення. Наявність замкнених або частково зв'язаних повітряних пор негативно впливає на однорідність структури, щільність та міцнісні характеристики матеріалу. Механізми переміщення повітря в легкобетонних сумішах відрізняються від важких бетонів через особливості структури, меншу густину та підвищену деформативність заповнювача.

Аналіз останніх досліджень. Упродовж останніх десятиліть проблема підвищення ефективності вібраційного ущільнення легких бетонів, зокрема полістиролбетону, привертає значну увагу дослідників. У роботах [1 - 4] встановлено, що характер розподілу динамічного тиску у стовпі бетонної суміші суттєво впливає на процес витіснення повітряних включень, а імпульсне збудження забезпечує рівномірний градієнт тиску, що сприяє покращенню структури матеріалу.

Значна кількість праць [1, 3, 4] присвячена дослідженню руху повітряних бульбашок у в'язкому середовищі та їх взаємодії з коливальними полями. Зокрема, показано, що у випадку гармонічного збудження в бетонному середовищі формуються зони депресії, які можуть викликати повторне втягування повітря, що погіршує ущільнення. Також встановлено, що під впливом комбінованих (вертикальних і горизонтальних) ко-

ливань повітряні включення переміщуються по спіралеподібній траєкторії з ефективним дрейфом до поверхні.

Актуальним напрямом сучасних досліджень є моделювання взаємодії бетонної суміші з вібраційною платформою як масово-пружинної системи [2, 5, 6]. Такий підхід дозволяє врахувати динаміку збудження, демпфування та резонансні ефекти, які суттєво впливають на ефективність ущільнення, особливо в умовах використання легких заповнювачів, таких як полістирольні кульки.

Незважаючи на наявні напрацювання, недостатньо дослідженим залишається вплив висоти бетонного шару та різних режимів на переміщення повітря у полістиролбетоні при його вібраційному ущільненні. Це зумовлює потребу у подальшому дослідженні даної проблематики з метою підвищення якості легкобетонних виробів.

Мета досліджень. Метою досліджень є розроблення та обґрунтування математичної моделі процесу вібраційного ущільнення полістиролбетонної суміші з урахуванням динамічної взаємодії між вібраційною платформою, бетонною сумішшю та формою, а також дослідження впливу режимів коливального збудження на ефективність видалення повітряних включень.

Викладення основного матеріалу дослідження. Дослідження розподілу динамічного тиску по висоті стовпа суміші [4] свідчать, що при імпульсному збудженні створюється рівномірний градієнт тиску без зон негативного тиску, що сприяє ефективному витісненню повітря із суміші. Натомість гармонічне навантаження супроводжується локальними зонами депресії, які є джерелом вторинного підсмоктування повітря.

Використання комбінованих коливань (одночасне вертикальне та горизонтальне збудження) дозволяє забезпечити об'ємне ущільнення суміші: вертикальні імпульси активізують спливання включень, а горизонтальні – сприяють їх переміщенню до вільної поверхні або бічних зон форми [4]. Рух частинок можна розглядати як невеликі періодичні коливання для великих і як суцільне завихрення дрібних частинок [7].

Рух повітряних включень у легкобетонній суміші може бути змодельовано за допомогою критеріїв Рейнольдса та рівнянь гідродинаміки для руху сферичних частинок у в'язкому середовищі :

$$Re = \frac{\rho \cdot d \cdot v_{\text{пд}}}{\mu}, \quad (1)$$

де ρ – густина суміші,

d – характерний діаметр бульбашки повітряних включень,

v – швидкість підйому,

μ – динамічна в'язкість середовища.

Розв'язуючи рівняння для умов ламінарного підйому $Re < 1$, отримаємо критичний діаметр бульбашки, здатної до ефективного спливання:

$$d = \sqrt{\frac{18\mu v}{\rho g}} \quad (2)$$

Розрахунок показує, що для легких бетонів (низька густина, висока в'язкість) повітряні бульбашки діаметром менше 0,5 мм можуть залишатися в товщі суміші, якщо не створити достатнього градієнта тиску.

Вивчаючи рух повітряних бульбашок під дією періодичних коливань, встановлено, що амплітуда переміщення бульбашки у три рази перевищує амплітуду коливань самої суміші: $u_{\text{бульб}} \approx 3 \cdot u_{\text{сер}}$

Цей ефект пояснюється тим, що повітряне включення має малу масу, тому чутливо реагує на зміни прискорення середовища, формуючи диференційований рух (дрейф) у напрямку максимального градієнта тиску.

На практиці застосовуються три типи коливального навантаження: вертикальні, горизонтальні та комбіновані коливання [7]. При вертикальному гармонічному режимі, зміна тиску в бетонному стовпі описується функцією:

$$p(z, t) = p_0(z) + \Delta p \cdot \sin(\omega t) \quad (3)$$

де $p_0(z)$ – статичний тиск на висоті z , $\Delta p \cdot \sin(\omega t)$ – амплітуда динамічного тиску, що періодично змінюється з частотою ω . В такому полі тиску повітряні включення зазнають циклічного стиснення та розширення, що, однак, не завжди супроводжується ефективним їх виштовхуванням. Як показують експерименти веденні КБ «Вібротехніка» Полтавської політехніки на окремих висотах можуть утворюватися ділянки від'ємного надлишкового тиску:

$$\frac{\partial p(z, t)}{\partial z} < 0. \quad (4)$$

У цих зонах виникає локальний підсмоктуючий ефект, який перешкоджає підйому бульбашок і навіть може втягувати повітря назад у тіло суміші, особливо при пошаровому ущільненні.

При імпульсному (неперіодичному) режимі збудження, коливання носять квазілінійний характер, що описується ступінчастими функціями або короткими тригерами тиску:

$$p(z, t) = p_0(z) + \sum_{n=1}^N A_n \cdot \delta(t - t_n), \quad (5)$$

де $\delta(t - t_n)$ – дельта-функція, яка моделює імпульс у момент t_n , а A_n – відповідна амплітуда. У цьому випадку швидкий перехід через градієнт тиску викликає хвильовий

зсув суміші, а градієнт динамічного тиску $\frac{\partial p}{\partial z} \gg 0$ спрямовує повітряні бульбашки до

зон з меншим опором – переважно вгору або у вільні пори, що сприяє активному очищенню структури. Саме імпульсне ущільнення забезпечує умови, при яких повітряне включення мігрує не циклічно, а з чітко вираженим дрейфом у напрямку розвантаження:

$$\frac{dt_{\text{бульб}}}{dz} = f\left(\frac{\partial p}{\partial z}, d, \mu, \rho\right), \quad (6)$$

тобто швидкість вертикального переміщення бульбашки визначається похідною від тиску, її діаметром, в'язкістю середовища та густиною суміші. Згідно з [1], коли градієнт тиску перевищує критичне значення, починається лавиноподібне спливання включень, яке за короткий проміжок часу радикально змінює структуру шару.

У випадку комбінованих коливань, вектор коливального збудження можна розглядати як суму двох незалежних гармонічних впливів по вертикалі та горизонталі:

$$\vec{d}(t) = A_v \cdot \sin(\omega t) \cdot \hat{z} + A_h \cdot \sin(\omega t + \varphi) \cdot \hat{x} \quad (7)$$

де A_v , A_h – амплітуди вертикального і горизонтального коливання, φ – фазовий зсув.

Такий режим призводить до складної траєкторії переміщення повітряних бульбашок:

$$\frac{dt}{dr} = v_{\text{дрейф}} = v_z + v_x = f(\nabla p, \mu, \rho, d, \omega, A), \quad (8)$$

Відповідно до формули (8) де бульбашка виконує спіралеподібний дрейф з наростаючою швидкістю, що дозволяє уникнути її ізоляції в локальних капілярах суміші. Саме комбіноване навантаження забезпечує найвищу ймовірність виведення повітря навіть з важкодоступних зон поблизу арматури чи бічних поверхонь форми.

Важливо зазначити, що характер розподілу тиску залежить також від висоти бетонного стовпа, де верхні шари мають менше статичне навантаження і, відповідно, повітря в них виходить легше, тоді як нижні потребують або збільшення частоти/амплітуди коливань, або подачі додаткового динамічного тиску. Саме тому спостерігаються ділянки з від'ємними тисками у нижній частині, які свідчать про недосконалі режими ущільнення при гармонічному навантаженні.

Таким чином, аналіз диференційного розподілу тиску та похідних швидкостей руху повітряних включень дозволяє обґрунтувати вибір режиму вібраційного ущільнення для досягнення найвищої однорідності та мінімальної пористості легкогобетонних виробів.

Модель ущільнення полістиролбетону під дією вібраційного збудження. Полістиролбетон є різновидом легкобетону, у якому як заповнювач використовується спінений полістирол сферичної форми з діаметром 3–6 мм. Завдяки низькій густині (15–25 кг/м³), кульки полістиролу значно змінюють механічну поведінку суміші під час вібраційного ущільнення. Густина полістиролбетону при розрахунках приймається $\rho_{\text{псб}} = 600 \text{ кг} / \text{м}^3$.

У математичній моделі ущільнення полістиролбетонної суміші основними допущеннями є такі положення. Об'ємна концентрація полістирольного заповнювача становить приблизно 60%, що суттєво впливає на механічні та динамічні характеристики матеріалу. Полістирольні кульки діаметром 3–6 мм вважаються рівномірно розподілені-

ми у квазіізотропному середовищі, при цьому між ними присутній розчинний прошарок, який забезпечує передачу напружень і формування структури суміші. Повітря в системі присутнє як у вигляді відкритих пор, що сполучаються з зовнішнім середовищем, так і у формі закритих мікропустот, розташованих між заповнювачем, що впливає на загальну пружність і здатність до ущільнення. Важливою складовою моделі є врахування взаємодії між платформою, формою та бетонною сумішшю, яка описується як масово-пружинна система з демпфуванням.

Динамічна модель системи «платформа – полістиролбетонна суміш» моделюється як одновимірний пружний осцилятор із масою, жорсткістю опор і силовим гармонічним збудженням. Рівняння руху платформи без суміші

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin(\omega t),$$

де $m = 1000$ Н – маса рухомої рами,

$k = 120000$ Н/м – жорсткість вертикальних опор,

c – коефіцієнт демпфування (оцінюється експериментально),

F_0 – амплітуда збуджуючої сили,

ω – кутова частота.

Для кожного з трьох режимів (табл. 1) ми можемо знайти реакцію системи у вигляді амплітуди A , яка, згідно з класичним гармонічним збудженням, становить

$$A = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}}. \quad (9)$$

Амплітуди переміщення платформи без суміші визначені експериментально (таблиця 1). Але після завантаження сумішшю загальна маса системи зростає на

$$m_{\text{суміш}} = \rho_{\text{псб}} \cdot V_{\text{сум}} = \rho \cdot (L \cdot B \cdot H), \quad (10)$$

де L B H – внутрішні габарити форми.

Таблиця 1

Режими вібраційного збудження

Режим	Кутова частота ω , рад/с	Амплітуда сили F_0 , Н	Амплітуда коливань платформи без суміші, мм
1	290	2100	0,4
2	250	1700	0,6
3	180	1300	0,8

Можна визначити зміну резонансних характеристик і амплітуди рухомої рами вібраційної установки:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m + m_{\text{суміш}}}}. \quad (11)$$

Ураховуючи наявність полістирольних кульок локальні градієнти тиску формуються у вузьких міжгранулярних проміжках, в'язкість розчинової частини і її динаміч-

на деформація визначає швидкість витіснення повітря. Через аморфну структуру заповнювача ефективно ущільнення залежить від частоти коливань платформи та тривалості впливу.

Швидкість підйому повітряних бульбашок у суміші можна оцінити за модифікованим законом Стокса:

$$v_{\text{підйом.пов}} = \frac{1}{9} \cdot \frac{(\rho_{\text{д}} - \rho_{\text{пов}}) \cdot g \cdot d^2}{\mu}. \quad (12)$$

Але для вібраційного режиму ми розглядаємо міграцію з урахуванням динамічного тиску

$$\frac{dt}{dz} = \alpha \cdot \nabla p(t). \quad (13)$$

Відповідно провівши розрахунки можна стверджувати, що для суміші висотою $H = 50$ мм вплив динамічного навантаження передається повністю, і повітряні включення мігрують до поверхні, а при $H \geq 150$ мм ефективність ущільнення залежить від комбінації: достатнього збудження (режим 1 або 2) та зменшення часу дії, щоб уникнути псевдопластичних потоків у суміші. Найкраща ефективність полістиролбетонних сумішей буде при режимі 1 (290 рад/с, 2100 Н), коли система наближається до умов резонансу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Назаренко І. І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем : навч. посіб. / І. І. Назаренко. – 2-ге вид. – Київ : Видавничий Дім «Слово», 2010. – 440 с.
2. Maslov O., Savielov D. Theoretical definition of the law of motion for mobile frame of a vibrating platform with polymer concrete when compacting it // Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. – 2020. – No 4. – С. 84–90. – DOI: <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2020.4.84-90>
3. Назаренко І., Дєдов О., Дьяченко О. Обґрунтування алгоритму розрахунку вібраційної установки для ущільнення бетонних сумішей зі змінним режимом роботи // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2019. – No 93. – С. 19–26.
4. Назаренко І. І., Дьяченко О. С. Експериментальні дослідження робочого процесу вібраційної установки для ущільнення бетонних сумішей зі змінним режимом роботи // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2018. – Вип. 92. – С. 24–31.
5. Maslov O., Savielov D., Salenko Y., Javadova M. Theoretical study of the dynamic system «Vibration Platform – Polymer Concrete» stress–strain state // Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations (ICBI 2020) : Lecture Notes in Civil Engineering. – Cham : Springer, 2022. – Vol. 181. – P. 191–201. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_19
6. Nesterenko M., Maslov A., Salenko J. Investigation of vibration machine interaction with compacted concrete mixture // International Journal of Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 7, No 3.2. – P. 260–264. – DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14416>

7. Черевко О. М., Давиденко Ю. О., Черевко П. О. Вплив параметрів вібрації на процес ущільнення бетонних сумішей // 3б. наук. пр. (Галузеве машинобудування, будівництво) / редкол.: О. Г. Онищенко (голов. ред.) [та ін.]. – Полтава : ПолтНТУ, 2010. – Вип. 26. – С. 138–146.

REFERENCES

1. Nazarenko, I. I. (2010). *Prykladni zadachi teorii vibratsiinykh system: Navchalnyi posibnyk* [Applied Problems of Vibration Systems Theory: Textbook] (2nd ed.). Kyiv: Vydavnychi Dim "Slovo".
2. Maslov, O., & Savielov, D. (2020). Theoretical definition of the law of motion for mobile frame of a vibrating platform with polymer concrete when compacting it. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, (4), 84–90. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2020.4.84-90>
3. Nazarenko, I., Dedov, O., & Diachenko, O. (2019). Obgruntuvannya alhorytmu rozrakhunku vibratsiinoi ustanovky dlia ushchilnennia betonnykh sumishei zi zminnym rezhymom roboty [Justification of the algorithm for calculating a vibration unit for compacting concrete mixtures with a variable operating mode]. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny – Mining, Construction, Road and Reclamation Machinery*, (93), 19–26.
4. Nazarenko, I. I., & Diachenko, O. S. (2018). Eksperymentalni doslidzhennia robochoho protsesu vibratsiinoi ustanovky dlia ushchilnennia betonnykh sumishei zi zminnym rezhymom roboty [Experimental research of the working process of a vibration unit for compacting concrete mixtures with a variable operating mode]. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny – Mining, Construction, Road and Reclamation Machinery*, (92), 24–31.
5. Maslov, O., Savielov, D., Salenko, Y., & Javadova, M. (2022). Theoretical study of the dynamic system "Vibration Platform – Polymer Concrete" stress–strain state. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations (ICBI 2020), Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 181, pp. 191–201). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_19
6. Nesterenko, M., Maslov, A., & Salenko, J. (2018). Investigation of vibration machine interaction with compacted concrete mixture. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(3.2), 260–264. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14416>
7. Cherevko, O. M., Davydenko, Y. O., & Cherevko, P. O. (2010). Vplyv parametriv vibratsii na protses ushchilnennia betonnykh sumishei [Influence of vibration parameters on the compaction process of concrete mixtures]. In O. H. Onyshchenko (Ed.), *Zbirnyk naukovykh prats "Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo"* [Collected Scientific Works "Industry Mechanical Engineering, Construction"] (Issue 26, pp. 138–146). Poltava: Poltava National Technical University.

Received 25.04.2025.
Accepted 28.04.2025.

***Movement of air voids in lightweight concrete
mixtures during vibration compaction***

The article investigates the process of vibrational compaction of polystyrene concrete mixture under the influence of combined harmonic excitation. The relevance of the study is due to the need to improve the structural uniformity and reduce the porosity of lightweight concrete products by optimizing compaction regimes. The study addresses the specific problem of inefficient air inclusion removal in mixtures with a high content of deformable polystyrene aggregates. The aim is to develop a dynamic model of the "platform – concrete mixture – mold" system and to determine optimal vibration parameters that ensure effective expulsion of air bubbles. The research methodology includes analytical modeling of dynamic pressure fields, numerical estimation of air bubble drift velocity using modified Stokes law, and evaluation of pressure gradients during vertical, horizontal, and combined excitation modes. The results demonstrate that combined excitation significantly enhances the upward migration of air inclusions due to spiral drift and pressure wave interaction. The highest compaction efficiency is achieved near the resonance frequency of the system. The findings can be applied to improve the technological parameters of vibrational compaction in the production of polystyrene concrete elements.

Keywords: polystyrene concrete, vibrational compaction, combined oscillations, air inclusions, dynamic pressure, wave effects, setup model, amplitude, pressure gradient, bubble drift.

Нестеренко Микола Миколайович - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID:0000-0002-4073-1233

Ведмідь Василь Васильович - аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID: 0000-0003-1514-1212

Nesterenko Mykola - PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of industrial mechanical engineering and mechatronics National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID: 0000-0002-4073-1233

Vedmid Vasyl - Postgraduate student of the Department of industrial mechanical engineering and mechatronics National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ID ORCID: 0000-0003-1514-1212

**RESEARCH OF OPERATING RELIABILITY OF PORTAL CRANES
"GANZ" 5-30 RIVER PORT**

Abstract. Portal cranes are a key piece of equipment in any modern port. They perform the indispensable function of moving cargo between ships and the coastal zone, guarantee prompt and productive handling of containers, various cargoes, bulk materials and other types of products, which directly affects the speed of cargo turnover and profitability of the port. The efficiency of loading and unloading operations in river ports is largely determined by the availability and serviceability of portal cranes. However, unfortunately, in Ukraine a significant part (over 90%) of these cranes have already exhausted their service life, but continue to be actively used. This creates a serious problem, as stable and uninterrupted operation of portal cranes is critical for continuous functioning of the port infrastructure. The study analyzed malfunctions of the mechanisms of GANZ portal cranes with a lifting capacity of 5 tons that occur during operation under heavy load conditions in a river port. Within the framework of the study, 16 cranes of the same type with a lifting capacity of 5 tons, operating in the grapple mode in the water areas of river ports, were selected.

Data from the maintenance and repair logs of these cranes for the period from 2015 to 2022 were used for the analysis.

Based on the collected data, the availability factors were calculated.

The analysis of the study results showed that the largest number of failures was found in the mechanisms for moving, lifting and changing the reach of the crane boom. The main reasons for the failure of the lifting mechanisms are the wear of brake pulleys, destruction and wear of shafts and bearings in gearboxes. The failures of the slewing mechanisms are mainly due to damage to the coupling that connects the gearbox to the open gear. Failures of the boom outreach change mechanisms are caused by damage to the rack and pinion teeth, hinge joints, bearings, and dampers.

The identified malfunctions of the mechanisms were caused by non-compliance with the established requirements for their operation and repair. The cause of defects in the mechanisms is a violation of the operating procedures and repair processes.

Keywords: portal crane, reliability, availability, failure.

Introduction. Portal cranes are the real workhorses of any modern port. These powerful and tall structures play a critical role in the process of transferring cargo from ship to shore and back again [1-11]. They ensure efficient and fast handling of containers, general cargo, bulk materials and other types of goods, which directly affects the speed of turnover and

economic efficiency of the port [2-11]. Loading and unloading operations in river ports largely depend on portal cranes [1-11]. Unfortunately, in Ukraine, the majority of these cranes (over 90%) have already reached the end of their service life, but continue to be heavily used [4-8]. This poses a serious problem, as the reliable operation of portal cranes is critical for the smooth functioning of port lines [2-11]. The operation of such cranes under cyclic loads leads to the accumulation of fatigue damage, which increases the risk of breakdowns and accidents. Therefore, ensuring the safe and reliable operation of portal cranes, either through modernization or replacement, is a crucial task [1-13].

Given that portal cranes are a key element of the technological process, their reliable and uninterrupted operation directly affects the efficiency of port lines [2,4-9].

Literature Review

Nowadays, insufficient attention is paid to the study of reliability of portal crane mechanisms operated for more than 35 years in sea and river ports, as evidenced by the analysis of works [1-9].

Insufficiently in-depth study of processes occurring in metal structures significantly reduces the probability of timely detection and prevention of various defects. The use of cranes with defects can lead to the destruction of metal structures and accidents with casualties. In this regard, each portal crane requires individual and detailed study [6,9]. Given the annual increase in the volume of cargo transshipment in the world, this problem is of particular relevance. Predicting equipment breakdowns is crucial to minimize maintenance costs, downtime and safety risks [13-16].

The purpose of this paper is to analyze failures of mechanisms of portal cranes “GANZ” 5 with overtime periods of operation in the river port.

Research methodology and results. For the study, 16 cranes of the same type, each with a lifting capacity of 5 tons, were selected, operating in grab mode in the waters of sea and river ports.

The information contained in the relevant maintenance and repair logs of the respective cranes from 2015 to 2022 was used for the analysis. The frequency of visual inspection of the cranes was once every six months during the observation period.

Statistical data on crane failures were collected directly at the ports, at the place of crane operation, from crane operation passports and logbooks, as well as from the shift mechanic's department and other port services,

Reliability analysis of portal cranes implies consideration of the working process as a set of failure and recovery flows. As a key reliability parameter a complex indicator - availability factor - is used (K_r):

$$K_r = \frac{T_M}{T_M + T_B} \quad (1)$$

where T_M - is the average operating time between crane failures for a specified period of time;

T_B - is the average recovery time for a specified period of time.

The availability factor is determined by two key parameters: the length of time the unit has been in operation T_M and the time taken to repair the unit T_R . Repair time represents the period required to repair a crane malfunction. This indicator is of paramount importance in evaluating and comparing different designs, as it directly reflects the crane's ability to perform its functions over a period of time. This makes it possible to analyze the dynamics of changes in the characteristics of various crane installations depending on their service life.

The availability factor was determined for each of the 16 cranes and the results were averaged (Fig. 1).

A comparison of crane reliability levels shows two extremes (Fig.1), which are associated with the arrival of investors in ports and, consequently, an increase in the amount of money spent on crane maintenance and repair.

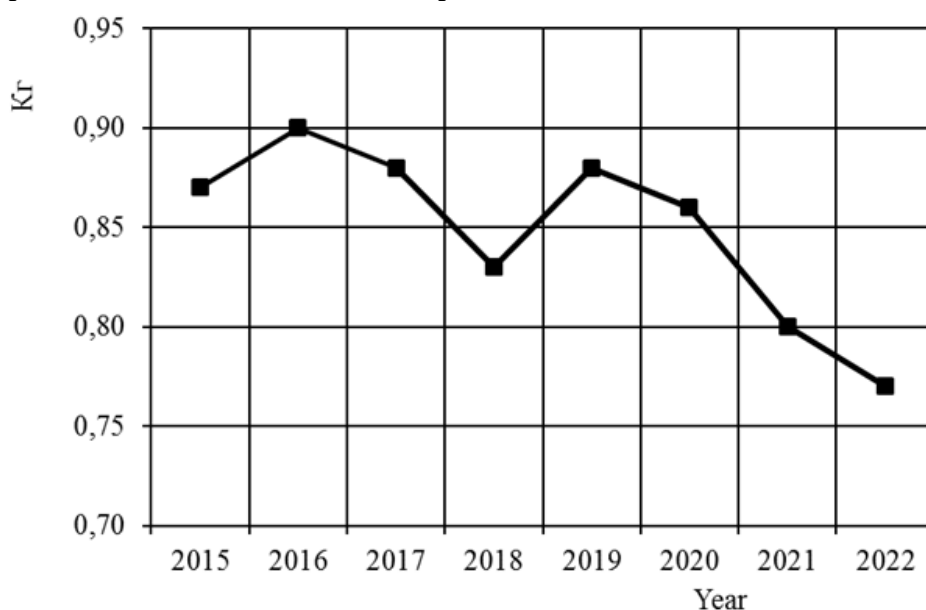


Figure 1 - Dependence of average values of availability coefficients K_r on portal cranes operation time (year)

The histogram of probability distribution of the amount of cargo lifted by the portal crane in each cycle of its operation, during the transshipment of bulk materials under the warehouse-ship option for the navigation period is shown in Fig. 2.

Analysis of the results of the study showed that the largest number of failures was identified in the traveling, lifting and luffing mechanisms of the crane (Fig..3).

The main causes of failures of lifting mechanisms are wear of brake pulleys, destruction and wear of shafts and bearings in gearboxes. Failures of slewing mechanisms are mainly associated with damage to the coupling connecting the gearbox to the open gear. The main causes of failure of lifting mechanisms are brake drum wear, damage and wear of shafts and bearings in the gearboxes. Failure of slewing mechanisms is most often associated with damage to the coupling connecting the gearbox to the open gear. In addition, in the process of research at half of the cranes was found wear of rollers of slewing and support devices.

The key element of any crane installation is the lifting mechanism. The analysis of Fig. 2 shows that during the working shift the crane mechanisms are subjected to uneven load. In

reality, the trajectory of the grab is formed under the combined influence of the lifting, boom reach, swivel and running gear. Fluctuations in luffing speed cause inconsistencies in grab velocity due to the flexible steel wire connection. To address this, the grab's speed alteration must be managed and attuned until synchronization is achieved. This is due to the uneven scooping of cargo by the grapple. In addition, as follows from the figure, two grapples with different scooping volumes were used for cargo reloading.

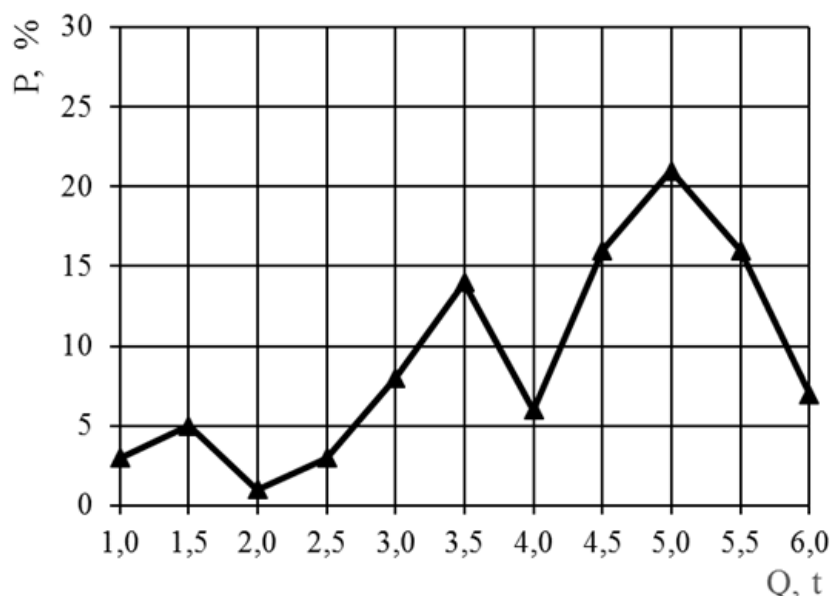


Figure 2 - The histogram of probability distribution of the amount of cargo lifted by the portal crane in each cycle of its operation, during the transshipment of bulk materials under the warehouse-ship option for the navigation period

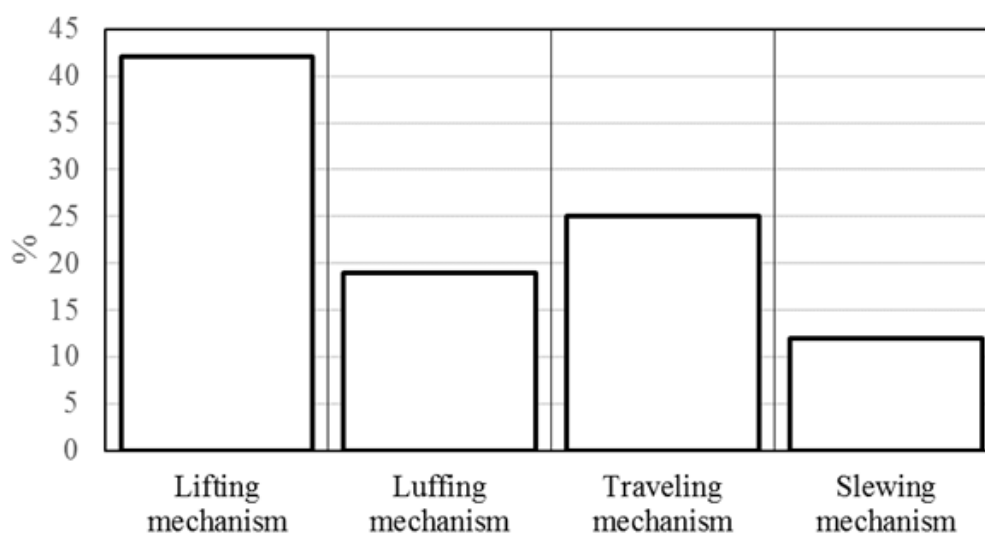


Figure 3 - Luffing mechanism of portal crane «Ganz»

The main failures of the traveling mechanism come from the gearbox and the open gear support (Fig.4).

It should be noted that they were similar to failures of the crane “Gantz”¹⁶.

Failures of the boom outreach mechanisms are related to damage of rack teeth, swivel joints, bearings and dampers. Replacement of shock absorbers is not difficult. It should also be noted the following failures of the outreach mechanism: loosening of gearbox fastening, damage of laths, lath attachment units to the boom, wear of shock absorber rods.

Among the most typical failures of the boom and metal structures it should be noted: cracks in the lower portal tighteners, welds of the lower column support and portal head, damage of fastening bolts. The appearance of cracks can be attributed to poor welding quality and unsuccessful design.

In almost all the examined stocky metal structures, water was found inside.

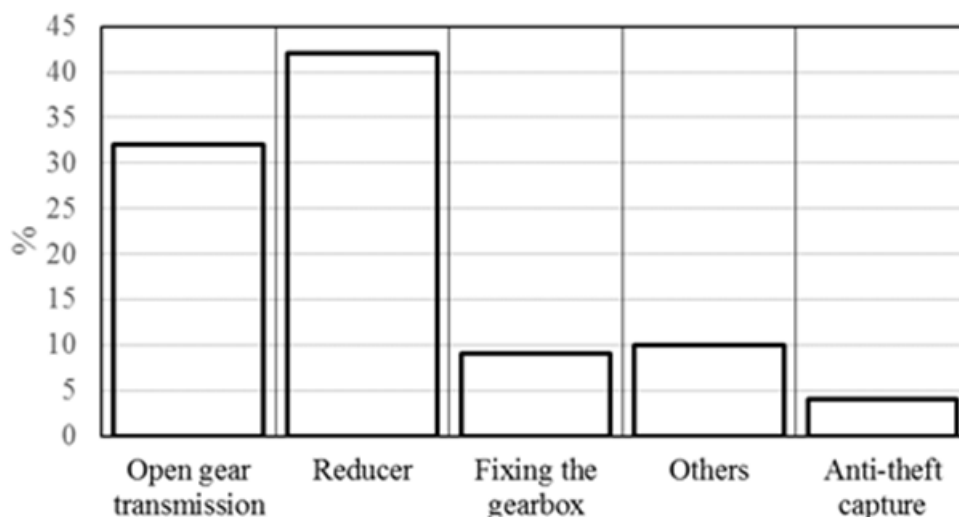


Figure 4 -The main failures of the traveling mechanism portal crane «Ganz»

Practically in all examined chunky metal structures water was found inside, which contributes to premature failure, Besides, in 3 cranes corrosion damage of elements of metal structures of the boom was revealed, which exceeds permissible norms. As a consequence, the booms of the cranes were replaced with new ones. These lesions can be explained by gross violation of painting technology and untimely maintenance and repair activities.

The defects in the mechanisms were caused by non-compliance with the rules of use and improper repair. Violation of the rules of use and repair technology led to defects in the mechani In the course of the study, the nature of the damage occurring in the crane mechanisms was determined. The information obtained will allow specialists involved in the operation of crane equipment to optimize the planning of preventive maintenance work, as well as the volume and range of spare parts and components needed for replacement.sms.Improper operation and poor repair caused defects in the mechanisms.

Conclusions. The study analyzed malfunctions of the mechanisms of GANZ portal cranes with a lifting capacity of 5 tons that occur during operation under heavy load conditions in a river port. Within the framework of the study, 16 cranes of GANZ of the same type with a lifting capacity of 5 tons, operating in the grapple mode in the water areas of river ports, were selected. When comparing different portal crane models, the availability factor serves as a key reliability indicator to gauge their performance. Defects in machinery are the result of non-compliance with operating rules and repair technology. It was found that the

main causes of failure of the lifting mechanisms are wear of brake drums, damage and wear of shafts and bearings in gearboxes. The failure of the lifting mechanisms is mostly due to damage to the clutch that connects the gearbox to the open gear. Failures of the boom outreach change mechanisms are caused by damage to the rail teeth, hinge joints, bearings and damping devices. In the course of the conducted research, the specifics of damage occurring in the mechanisms of crane equipment were revealed. The data obtained will allow crane operators to plan preventive maintenance more efficiently, as well as determine the optimal volume and range of spare parts and components needed for replacement. Predicting equipment breakdowns is crucial to minimize maintenance costs, downtime and safety risks. Predicting equipment breakdowns is crucial to minimize maintenance costs, reduce downtime, and prevent safety hazards.

REFERENCES

1. Hryhorov, O.V., & Petrenko, N.O. (2006). Vantazhopidiomni mashyny. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut, [*Lifting machines*]. Kharkiv. [in Ukrainian].
2. Liu, L., Guan, K., & Wu, P. (2022). Analysis and research on energy utilization efficiency of port portal crane. In E3S Web of Conferences (Vol. 341, p. 01024). EDP Sciences..
3. Cigolini, R., Pero, M., & Rossi, T. (2013). Sizing off-shore transshipment systems: a case study in maritime dry-bulk transportation. *Production planning & control*, 24(1), 15-27.
4. Strelbitskyi, V.V. (2021). Perspektyvy vykorystannia kvadrokopteriv dlia diahnostuvannia portalnykh kraniv. In *Topical issues of practice and science. Abstracts of XXVI International Scientific and Practical Conference*. Varna, Bulgaria, 760-762 [in Ukrainian].
5. Kibakova, N.O., Strelbitskyi, V.V. (2022). EKSPERYMENTALNE doslidzhennia napruzhen u strili krana «Albatros». In *The 10th International scientific and practical conference “Analysis of modern ways of development of science and scientific discussions”* (November 29-December 02, 2022) Bilbao, Spain. International Science Group. 2022, 569.[in Ukrainian].
6. Bovnegra, L., Pavlyshko, A., Nemchuk, O., Strelbitskyi, V., & Karabegovich, I. (2023). Experimental study of longevity in the metallic structure of boom for a portal crane of seaport. In *Grabchenko’s International Conference on Advanced Manufacturing Processes*. Cham: Springer Nature Switzerland, 432-439.
7. Pustovyi, V. M., Semenov, P. O., Nemchuk, O. O., Hredil, M. I., Nesterov, O. A., Strelbitskyi, V. V. (2022). Degradation of steels of the reloading equipment operating beyond its designed service life. *Materials Science*, 57(5), 640-648.
8. Strelbitskyi, V.V., Yaremenko, V.A., Kokoshko, Ye.M. (2023). Doslidzhennia tekhnichnoho stanu mekhanizmiv peresuvannia kozlovykh kraniv KK-12, 5, 285-286. [in Ukrainian].
9. Zahrebelnyi, Ye. O., Strelbitskyi, V. V. (2022). Analiz defektiv mekhanizmiv peresuvannia portalnykh kraniv «Kondor». In *The 10th International scientific and practical conference “Analysis of modern ways of development of science and scientific discussions”* (November

- 29-December 02, 2022) Bilbao, Spain. International Science Group. 2022. p. 561. [in Ukrainian].
10. Strelbitskyi, V. (2022). Otsinka nadiinosti mekhanizmiv portalnykh kraniv Albatros. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences, 313(5), 196-199. [in Ukrainian].
11. Zhang, B., Li, G. F., Huang, Z. Q., Tong, Y. T. (2021). The research on mechanical performance of portal crane main steel structure based on sustainable development. In E3S Web of Conferences. EDP Sciences. 257, 01069.
12. Okanminiwei, L., & Oke, S. A. (2021). Port equipment downtime prediction and lifetime data analysis: evidence from a case study. JIEMS (Journal of Industrial Engineering and Management Systems), 14(1).
13. Faltinová, E., Mantič, M., Kuřka, J., Kopas, M. (2018). Reliability analysis of crane lifting mechanism. Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska, (98), 15-26.
14. Depale, B., Bennebach, M. (2022). Residual Life of Structures and Equipment. Procedia Structural Integrity, 38, 317-330.
15. Gardoni, P. (2017). Risk and reliability analysis. Springer International Publishing, 2-24.
16. Modarres, M., Groth, K. (2023). Reliability and risk analysis. CRC Press.

Received 25.04.2025.
Accepted 28.04.2025.

Дослідження експлуатаційної надійності портальних кранів "ГАНЦ" 5-30 річкових портів

Портальні крани є ключовим обладнанням будь-якого сучасного порту. Вони виконують незамінну функцію переміщення вантажів між суднами та прибережною зоною, гарантують оперативну та продуктивну обробку контейнерів, різноманітних вантажів, сипучих матеріалів та інших видів продукції, що безпосередньо впливає на швидкість вантажообігу та прибутковість порту. Ефективність вантажно-розвантажувальних робіт у річкових портах значною мірою визначається наявністю та справністю портальних кранів. Але, на жаль, в Україні значна частина (понад 90%) цих кранів вже відпрацювала свій ресурс, але продовжує активно використовуватися. Це створює серйозну проблему, оскільки стабільна та безперебійна робота портальних кранів є критичною для безперебійного функціонування портової інфраструктури. У дослідженні проаналізовано несправності механізмів портальних кранів GANZ вантажопідйомністю 5 тонн, які виникають під час експлуатації в умовах великого навантаження в річковому порту. У рамках дослідження було відібрано 16 однотипних кранів вантажопідйомністю 5 тонн, що працюють в грейферному режимі на акваторіях річкових портів.

Для аналізу були використані дані журналів технічного обслуговування та ремонту цих кранів за період з 2015 по 2022 рік.

На основі зібраних даних розраховано коефіцієнти доступності.

Аналіз результатів дослідження показав, що найбільшу кількість відмов виявлено в механізмах переміщення, підйому та зміни вильоту стріли крана. Основними причинами виходу з ладу підйомних механізмів є знос гальмівних шківів, руйнування та зношення валів і підшипників у коробках передач. Відмови механізмів повороту в основно-

му пов'язані з пошкодженням муфти, яка з'єднує коробку передач з відкритою передачею. Відмови механізмів зміни вильоту стріли викликані пошкодженням зубів зубчасної рейки, шарнірних з'єднань, підшипників і амортизаторів.

Виявлені несправності механізмів виникли внаслідок недотримання встановлених вимог щодо їх експлуатації та ремонту. Причиною дефектів механізмів є порушення режиму експлуатації та ремонтних процесів.

Ключові слова: портальний кран, надійність, готовність, відмова.

Стрельбіцький Віктор Васильович – доцент, кандидат технічних наук, кафедра Підйомно-транспортні машини та інжиніринг портового технологічного обладнання, Одеський національний морський університет.

Strelbitskyi Viktor Vasylovych – PhD, associated professor, Hoisting and transport machines and engineering of port technological equipment, Odessa National Maritime University.

ЗМІСТ

CONTENTS

Білозьоров В.Є., Зайцев В.Г., Погорєлов О.В., Хижа О.Л. Проблеми аналізу електроенцефалограм методами нелінійної динаміки	3	Belozyorov V.Ye., Zaytsev V.G., Pohorielov O.V., Khizha A.L. Problems of analysis of electroencephalograms by methods of nonlinear dynamics	3
Гречаний О.М., Васильченко Т.О., Власов А.О., Івахненко О.П., Вернидуб М.В. Роль САПР у розробці інженерних рішень для металургійної галузі: досвід застосування ANSYS, AUTOCAD, SOLIDWORKS та MATLAB	10	Hrechanyi O.M., Vasilchenko T.O., Vlasov A.O., Ivakhnenko O.P., Vernydub M.V. The role of CAD in the development of engineering solutions for the metallurgical industry: experience in using ANSYS, AUTOCAD, SOLIDWORKS and MATLAB	10
Дмитрієва І.С., Бімалов Д.В. Аналіз емоцій з використанням виразів обличчя та голосових ознак	21	Dmytriieva I.S., Bimalov D.V. Analysis of emotions using facial expressions and voice features	21
Ситник Р.С., Гнатушенко Вік.В. Метод забезпечення достовірності та цілісності персональних даних, що обробляються в блокчейн-системі	28	Sytnyk R., Hnatushenko Vik. Method for ensuring the reliability and integrity of personal data processed in a blockchain system	28
Гожий О.П., Калініна І.О., Гожий В.О., Димо В.В. Системний підхід до прогнозування попиту на електроенергію на основі машинного навчання	36	Gozhy O.P., Kalinina I.O., Gozhy V.O., Dymo V.V. System approach to forecasting electricity demand based on machine learning	36
Швачич Г.Г., Мороз Б.І., Щербина П.О., Олішевський І.Г., Мороз Д.М. Інтелектуальна система прогнозування управління технологічним процесом на основі штучної нейронної мережі	48	Shvachych G., Moroz B., Shcherbyna P., Olishevskiy I., Moroz D. Intelligent process control forecasting system based on artificial neural network	48

Панасенко Є.С., Білозьоров В.Є. Класифікація стану очей на основі ЕЕГ-даних з використанням рекурентного аналізу	58	Panasenko Ye.S., Belozyorov V.Ye. Classification of eye state based on EEG data using recurrence analysis	58
Швачич Г.Г., Щербина П.О., Кабаченко О.В., Олішевський І.Г., Іщук П.О. Розробка та дослідження паралельних технологій задач стохастичного програмування	74	Shvachych G., Shcherbyna P., Kabachenko O., Olishevskiy I., Ishchuk P. Development and exploration of parallel technologies in stochastic programming tasks	74
Інкін О.А., Білозьоров В.Є. Гібридне моделювання ЕЕГ: модель Фітцхью – Нагумо – Лоренца	87	Inkin O.A., Belozyorov V.E. Hybrid modeling of EEG: the Fitzhugh-Nagumo-Lorenz model	87
Гуда А.І., Іванов О.П., Шинкаренко В.І., Саблін О.І. Атрибутивне насичення конструктивно-продукційної моделі ділянки системи електропостачання тяги постійного струму	96	Guda A., Ivanov O., Shynkarenko V., Sablin O. Attribute saturation of the constructive-synthesizing model of the DC traction power supply system section	96
Отсровська К.Ю., Зимогляд А.Ю., Козакова А.О. Моделювання нейромережевого алгоритму для аналізу дефектів відеопотоку	110	Otsrovska K.Yu., Zymogliad A.Yu., Kozakova A.O. Simulation of a neural network algorithm for the analysis of video flow defects	110
Кононов Д.О., Єрмократьєв В.О., Ціколія А.З. Визначення параметрів коливань еластичного сита вібраційного грохота методами явної та неявної динаміки гумового елемента	117	Kononov D.O., Tsikolia A.Z., Ermokratev V.A. Determination of oscillation parameters of the elastic screen of a vibrating sieve using explicit and im- plicit dynamics methods for a rubber element	117

Жуков О.О., Горбенко В.І. Використання часових рядів та нейронних мереж LSTM для ідентифікації станів вулика	128	Zhukov O.O., Horbenko V.I. Using time series and lstm neural networks for identification of hive states	128
Шопський О.М., Малець І.А. Класифікація та просторовий аналіз пожеж у системі оперативно- диспетчерського управління	140	Shopsky O.M., Malets I.A. Classification and spatial analysis of fires in the operational dispatch control system	140
Журба А.О., Модзалевський Є.О. Огляд існуючих технологій складського обліку з використанням штучного інтелекту	149	Zhurba A., Modzalevskyi Y. Overview of existing warehouse accounting technologies using artificial intelligence	149
Малініч І. П., Іванчук Я. В. Особливості розміщення мікросервісів систем управління навчанням у гібридних хмарах	157	Malinich I.P., Ivanchuk Y.V. Features of microservices placement of learning management systems in hybrid clouds	157
Степаненко А.С., Саяпіна І.О. Модифікований метод курсорної пагінації та фільтрації даних у вигляді пакету NPM	171	Stepanenko A.S., Saiapina I.O. Modified method of cursor pagination and data filtering as an NPM package	171
Вербовий Д.С., Саяпіна І.О. Метод для автоматичної перевірки документів на відповідність нормативним вимогам	181	Verbovyi D.S., Saiapina I.O. Method for automatic verification of documents for compliance with regulatory requirements	181
Солуян О.А., Люшенко Л.А. Дослідження можливостей використання WebAssembly для розробки високопродуктивного коду у вебдодатках	188	Soluian O., Liushenko L. Research of WebAssembly usage for high-performance code development in web applications	188
Нестеренко М.М., Ведмідь В.В. Переміщення повітряних включень у легкобетонних сумішах при вібраційному ущільненні	201	Nesterenko M.M., Vedmid V.V. Movement of air voids in lightweight concrete mixtures during vibration compaction	201

Стрельбіцький В.В.

Дослідження експлуатаційної
надійності порталних кранів
"ГАНЦ" 5-30 річкових портів

209

Strelbitskyi V.V.

Research of operating reliability of
portal cranes "GANZ" 5-30 river port

209

РЕФЕРАТИ

УДК 519.2:004.9

Білозьоров В.Є., Зайцев В.Г., Погорелов О.В., Хижа О.Л. **Проблеми аналізу електроенцефалограм методами нелінійної динаміки** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(158). – Дніпро, 2025. – С.3 – 9.

У даної роботи зроблено аналіз проблем обробки електроенцефалограм методами нелінійної динаміки. Показано, що отримані результати різними методами, включаючи методи машинного/глибокого навчання, нейронні мережі дозволяють виконати класифікацію нападу епілепсії за даними ЕЕГ з точністю від 94% та вище. Вказано проблеми, які мають місце під час виконання цих досліджень. Розглянуто проблеми, що виникають при використанні методів нелінійної динаміки, аналізу даних взятих з різних баз. Проведено їх порівняння та кластеризація за даними показників JRQA аналізу даних ЄЄГ та показниками Херста. Однак виявити аналітичну залежність у напрямку прогнозу нападу епілепсії зараз не вдається.

Бібл. 28, табл. 2.

УДК 621.9:004.94

Гречаний О.М., Васильченко Т.О., Власов А.О., Івахненко О.П., Вернидуб М.В. **Роль САПР у розробці інженерних рішень для металургійної галузі: досвід застосування ANSYS, AUTOCAD, SOLIDWORKS та MATLAB** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(158). – Дніпро, 2025. – С.10 – 20.

Розглянуто особливості використання сучасних програмних інструментів для проєктування продуктів металургійної галузі. Визначені переваги та недоліки конкретних програмних продуктів у контексті металургійних завдань, таких як моделювання технологічних процесів, проєктування механічних компонентів, аналіз теплових і механічних навантажень. Запропонований мультифізичний підхід, що поєднує в собі інтеграцію потужних програмних інструментів (ANSYS, AutoCAD, SolidWorks, MATLAB) для моделювання складних металургійних процесів з акцентом на механічний, термічний та структурний аналіз.

Ключові слова: автоматизоване проєктування, комп'ютерне моделювання, інженерні розрахунки, технічні стандарти, аналіз даних.

Бібл. 19, табл. 4

УДК 004.934

Дмитрієва І.С., Бімалов Д.В. **Аналіз емоцій з використанням виразів обличчя та голосових ознак** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(158). – Дніпро, 2025. – С.21 – 27.

Стаття присвячена дослідженню систем розпізнавання емоцій, які використовують як голосові, так і візуальні дані. У роботі розглядаються основні методи опрацювання акустичних ознак і виразів обличчя. Особливу увагу приділено аналізу й обробці акустичних характеристик, як, інтонація, гучність, темп мовлення і тривалість пауз, а також використанню методів комп'ютерного зору для детекції виразів обличчя, таких як посмішка, затиснуті губи або насуplied брови.

Бібл. 4, іл. 3, табл. 1.

УДК 004.623

Ситник Р.С., Гнатушенко Вік.В. **Метод забезпечення достовірності та цілісності персональних даних, що обробляються в блокчейн-системі** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(158). – Дніпро, 2025. – С.28 – 35.

Розроблено комплексний метод забезпечення достовірності та цілісності персональних даних у блокчейн-системах з використанням динамічної системи верифікації. Запропоновано математичну модель оцінки достовірності даних та архітектуру системи з ієрархічною структурою вузлів верифікації. Реалізовано метод для блокчейн-системи з модифікованим алгоритмом консенсусу Proof-of-Authority для захисту даних при збереженні зручності їх використання.

Бібл. 7.

УДК 004.85

Гожий О.П., Калініна І.О., Гожий В.О., Димо В.В. **Системний підхід до прогнозування попиту на електроенергію на основі машинного навчання** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(158). – Дніпро, 2025. – С.36 – 47.

У статті досліджено системний підхід до вирішення проблеми прогнозування попиту на електроенергію в Україні на основі методів машинного навчання. Представлено послідовність етапів обробки даних при розв'язанні задачі прогнозування методами машинного навчання. Розглянуто методологію вирішення задачі прогнозування на часових рядах.

Бібл. 28.

УДК 004.8:62-50

Швачич Г.Г., Мороз Б.І., Щербина П.О., Олішевський І.Г., Мороз Д.М. **Інтелектуальна система прогнозування управління технологічним процесом на основі штучної нейронної мережі** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(158). – Дніпро, 2025. – С.48 – 57.

Дослідження спрямовані на розробку моделі нейронної мережі для обробки мережевих даних, яка може бути використана для управління технологічними процесами в сучасному металургійному виробництві на різних етапах обробки металу. Запропонована система відзначається високою швидкістю, точністю, надійністю та ефективністю, що сприяє покращенню якості продукції. Система включає кластер мережевих датчиків, які можна реконфігурувати та підключити до високопродуктивної розподіленої системи. Вона також забезпечує механізм резервування ключових компонентів і спрямована на підвищення ефективності технологічного процесу на кожному його етапі.

Бібл. 14, іл. 2.

УДК 519.2:004.9

Панасенко Є.С., Білозьоров В.Є. **Класифікація стану очей на основі ЕЕГ-даних з використанням рекурентного аналізу** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(158). – Дніпро, 2025. – С.58 – 73.

Актуальність цієї статті зумовлена зростаючим інтересом до портативних ЕЕГ-пристроїв та необхідністю розробки ефективних алгоритмів аналізу мозкової активності за обмежених технічних ресурсів. У цій статті розглядається проблема класифікації станів мозку за даними електроенцефалографії (ЕЕГ) з метою розрізнення конкретних двох станів розслабленості та концентрації. Досліджується класифікація відкритих і закритих очей, оскільки закриття очей асоціюється з підвищеною розслабленістю. Запропоновано метод класифікації на основі кількісного аналізу рекурентних діаграм, що є одним із підходів теорії хаосу, та проведено його порівняння з традиційним аналізом мозкових ритмів.

Бібл. 22, іл. 4, табл. 1.

УДК 004.8:62-50

Швачич Г.Г., Щербина П.О., Кабаченко О.В., Олішевський І.Г., Ішук П.О. **Розробка та дослідження паралельних технологій задач стохастичного програмування** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(158). – Дніпро, 2025. – С.74 – 86.

У дослідженнях розглядаються паралельні технології моделювання задач методом Монте-Карло. Показано, що основна суть методу полягає у випадковому моделюванні великої кількості сценаріїв та статистичній обробці результатів, що пояснює природну можливість його розпаралелювання. Відзначається, що оскільки окремі ітерації методу Монте-Карло зазвичай незалежні одна від одної, їх легко розподілити між кількома потоками або вузлами кластерної системи. Це робить метод ідеальним для паралельних і розподілених обчислень. Приводяться схеми обчислень, які забезпечують збільшення продуктивності та швидкодії. Ефективність запропонованого підходу ілюструється дослідженнями та графічними інтерпретаціями збіжності та апроксимації розробленого підходу.

Бібл. 10, іл. 5.

УДК 612.8:004.8

Інкін О.А., Білозьоров В.Є. **Гібридне моделювання ЕЕГ: модель Фітцхью – Нагумо – Лоренца** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(158). – Дніпро, 2025. – С.87 – 95.

Це дослідження представляє комбіновану математичну модель для інтерпретації сигналів електроенцефалограми, що поєднує рівняння Фітцхью-Нагумо з системою хаосу Лоренца. Було розроблено нейронну мережу, яка автоматично налаштовує модель відповідно до реальних даних ЕЕГ. Даний підхід успішно відтворює ключові особливості та ритми ЕЕГ, а супровідне програмне забезпечення в MATLAB полегшує реалізацію. Метод є перспективним як для наукових досліджень, так і для медичного застосування в діагностиці захворювань мозку.

Бібл. 9, іл. 6.

УДК 004.94+510.23+510.25+512.567+629.4

Гуда А.І., Іванов О.П., Шинкаренко В.І., Саблін О.І. **Атрибутивне насичення конструктивно-продукційної моделі ділянки системи електропостачання тяги постійного струму** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(158). – Дніпро, 2025. – С.96 – 109.

Раніш розроблена загальна конструктивно-продукційна модель ділянки електропостачання тяги постійного струму збагачується інформацією значень атрибутики складових елементів. У залежності від того яким чином інтерпретується модель засобами алгоритмічного конструктора формуються різні конструктивні системи. Одна з них призначена для випадкового визначення значень атрибутики електроустаткування та поїзної ситуації з множини потенційно можливих з метою формування різних варіантів за якими приймає рішення експерт щодо використання енергії рекуперації. Друга – для збору інформації щодо стану електрообладнання та поїзної ситуації з реальних об'єктів для керування розподілом електроенергії у автоматичному режимі.

Бібл. 9, іл. 1, табл 3.

УДК 004.93

Отсровська К.Ю., Зимогляд А.Ю., Козакова А.О. **Моделювання нейромережевого алгоритму для аналізу дефектів відеопотоку** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(158). – Дніпро, 2025. – С.110 – 116.

В роботі зроблено огляд на існуючі наукові роботи з аналізу відео на виявлення дефектів та технологій цифрового мовлення. Розглядається створення дата-сета, розподілу даних по вибіркам. Описується навчання нейромережевих моделей та отримання результатів навчання. Реалізації методу використання навченої нейронної мережевої моделі.

Бібл. 5, іл. 10.

УДК 622.3:622.7

Кононов Д.О., Єрмократьев В.О., Ціколія А.З. **Визначення параметрів коливань еластичного сита вібраційного грохота методами явної та неявної динаміки гумового елемента** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(158). – Дніпро, 2025. – С.117 – 127.

The work is devoted to determining the dynamic parameters of the movement of the elements of the elastic card sieve of the vibrating screen.

A model of the card elastic sieve element for dynamic analysis using the finite element method has been developed.

Бібл. 9, іл. 8, табл. 1.

УДК 004.8

Жуков О.О., Горбенко В.І. **Використання часових рядів та нейронних мереж LSTM для ідентифікації станів вулика** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(158). – Дніпро, 2025. – С.128 – 139.

В цьому дослідженні розглядається використання часових рядів та рекурентних нейронних мереж LSTM для ідентифікації станів бджолиного вулика. Розроблено під-

хід до попередньої обробки часових даних з бджолиного вулику, що включає агрегацію даних до оптимізованих інтервалів, вибіркового експорт стабільних діапазонів, застосування методів інтерполяції та нормалізації часових рядів. На основі цих даних було зроблено дві моделі для ідентифікації точкових та глобальних станів.

Бібл. 12.

УДК 004.6

Шопський О.М., Малець І.А. **Класифікація та просторовий аналіз пожеж у системі оперативно-диспетчерського управління** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(158). - Дніпро, 2025. – С.140 – 148.

У статті досліджено можливості застосування сучасних інформаційних технологій, зокрема методів обробки великих даних, штучного інтелекту та машинного навчання для аналізу оперативної інформації, накопиченої в системі оперативно-диспетчерського управління (СОГУ) Головного управління ДСНС України у Львівській області. Запропоновано інформаційну модель для прогнозування ризикових ситуацій, що включає етапи структурування даних, класифікації подій, геокодування адрес та візуалізації результатів у вигляді теплових карт. Розроблено підхід до семантичного аналізу текстових даних та гнучкого групування подій за типами. Продемонстровано практичну цінність моделі для оптимізації реагування на надзвичайні ситуації, зокрема пожежі, з урахуванням просторових та типологічних особливостей.

Бібл. 14, іл. 4.

УДК 004.8

Журба А.О., Модзалевський Є.О. **Огляд існуючих технологій складського обліку з використанням штучного інтелекту** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(158). – Дніпро, 2025. – С.149 – 156.

Зростання значення складської логістики в умовах глобалізації та цифрової трансформації економіки вимагає підвищення ефективності управління запасами. Традиційні методи обліку не здатні забезпечити необхідну точність і швидкість аналізу великих обсягів даних, що призводить до втрат і зниження конкурентоспроможності. Використання штучного інтелекту відкриває нові можливості для автоматизації процесів, оптимізації ресурсів і прогнозування попиту в реальному часі. Дослідження спрямоване на визначення сучасного рівня розробок адаптації штучного інтелекту до завдань складського обліку.

Бібл. 12.

УДК 004.75

Малініч І. П., Іванчук Я. В. **Особливості розміщення мікросервісів систем управління навчанням у гібридних хмарах** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(158). – Дніпро, 2025. – С.157 – 170.

У статті приділяється увага різним підходам та методам розміщення мікросервісів у хмарах, а також особливості їх застосування при розміщенні у гібридній хмарі мікросервісів систем управління навчанням. Завдяки запропонованій схемі потоків даних автоматизованого розміщення мікросервісів у гібридній хмарі визначено способи вдосконалення методів розподілу мікросервісів таким чином щоб вони давали користувачеві

достатній контроль над процесом, а також враховували особливості систем управління навчанням.

Бібл. 22, іл. 2.

УДК 004.65

Степаненко А.С., Саяпіна І.О. **Модифікований метод курсорної пагінації та фільтрації даних у вигляді пакету NPM** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(158). – Дніпро, 2025. – С.171 – 180.

Ця стаття присвячена розробці модифікованого методу курсорної пагінації, що має підтримку основних баз даних та ORM систем, надає можливість використання комплексних фільтрації та сортування даних, індексації запитів тощо. Проаналізовані наявні рішення, випадки їх використання, переваги та недоліки. Сформовано модифікований метод, який містить в собі видозмінені та покращені функціональні можливості існуючих NPM пакетів, разом з новими впровадженнями, що зосереджені на збільшенні ефективності та універсальності запитів до баз даних. Проведено аналіз запропонованого рішення. Наведено потенційні напрями подальших розширень та поліпшень методу.

Бібл. 8.

УДК 004.4:004.8:681.3.06:004.912

Вербовий Д.С., Саяпіна І.О. **Метод для автоматичної перевірки документів на відповідність нормативним вимогам** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(158). – Дніпро, 2025. – С.181 – 187.

Ця стаття присвячена розробці ефективного методу автоматичної перевірки форматів документів, який дозволяє гарантувати їх відповідність певним стандартам форматування. Переглянуто та проаналізовано наявні підходи, що використовують системи на основі правил і методи машинного навчання. Запропоновано модифікований метод, який об'єднує як структурну, так і лінгвістичну перевірку. Проведено порівняльний аналіз запропонованого методу з наявними підходами. Також запропоновано потенційні напрямки подальших досліджень.

Бібл. 9.

УДК 004.43: 004.054

Солуян О.А., Люшенко Л.А. **Дослідження можливостей використання WebAssembly для розробки високопродуктивного коду у вебдодатках** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(158). – Дніпро, 2025. – С.188 – 200.

Розглянуто можливості використання WebAssembly у вебзастосунках для забезпечення високої продуктивності. Показано, що технологія WebAssembly дозволяє досягти майже нативної швидкодії у порівнянні з JavaScript завдяки компіляції в байткод. Проаналізовано продуктивність WebAssembly на прикладі алгоритмів лінійної алгебри з використанням бенчмарків PolyBenchC. Результати досліджень показали, що WebAssembly демонструє переваги у виконанні обчислювально інтенсивних алгоритмів

на малих та середніх обсягах даних. Визначено основні фактори, що впливають на ефективність WebAssembly при обробці великих обсягів даних.

Бібл. 11, іл. 3, табл. 2.

УДК 666.9.033

Нестеренко М.М., Ведмідь В.В. **Переміщення повітряних включень у легкобетонних сумішах при вібраційному ущільненні** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(158). – Дніпро, 2025. – С.201 – 208.

У статті розглянуто процес ущільнення полістиролбетону з урахуванням впливу хвильових ефектів. Побудовано динамічну модель системи «платформа – бетонна суміш – форма» та досліджено ефективність трьох режимів коливального збудження. Встановлено, що комбіновані коливання (вертикальні + горизонтальні) забезпечують спіралеподібний дрейф повітряних включень і сприяють активному очищенню структури. Результати можуть бути використані для оптимізації технологічних режимів ущільнення в умовах виробництва легкобетонних виробів.

Бібл. 7, табл. 1.

УДК 621.875.56

Стрельбіцький В.В. **Дослідження експлуатаційної надійності порталних кранів "ГАНЦ" 5-30 річкових портів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(158). – Дніпро, 2025. – С.209 – 216.

У роботи були проаналізовані несправності механізмів порталних кранів «Ганц» вантажопідйомністю 5 тонн, що виникають при експлуатації в річковому порту. Аналіз результатів дослідження показав, що найбільша кількість відмов було виявлено в механізмах переміщення, підйому і зміни вильоту крана. Основними причинами відмов підйомних механізмів є знос гальмівних шківів, руйнування і зношування валів і підшипників в редукторах.

Бібл. 16.

UDC 519.2:004.9

Belozyorov V.Ye., Zaytsev V.G., Pohorielov O.V., Khizha A.L. **Problems of analysis of electroencephalograms by methods of nonlinear dynamics** // System technologies. N 3(158) - Dnipro, 2025.- P.3 – 9.

In this paper, the analysis of the problems of processing electroencephalograms by nonlinear dynamics methods is made. It is shown that the results obtained by different methods, including machine/deep learning methods, neural networks allow classifying an epileptic seizure based on EEG data with an accuracy of 94% or higher. The problems that occur when performing these studies are indicated. The problems of analyzing data taken from different databases that arise when using nonlinear dynamics methods are considered. Their comparison and clustering are carried out according to the JRQA indicators of EEG data analysis and Hurst indices. However, it is currently not possible to identify an analytical dependence in the direction of predicting an epileptic seizure.

Bible 28, tab. 2.

UDC 621.9:004.94

Hrechanyi O.M., Vasilchenko T.O., Vlasov A.O., Ivakhnenko O.P., Vernydub M.V. **The role of CAD in the development of engineering solutions for the metallurgical industry: experience in using ANSYS, AUTOCAD, SOLIDWORKS and MATLAB** // System technologies. N 3(158) - Dnipro, 2025.- P.10 – 20.

The features of using modern software tools for designing products in the metallurgical industry are considered. The advantages and disadvantages of specific software products in the context of metallurgical tasks, such as modeling technological processes, designing mechanical components, analyzing thermal and mechanical loads, are determined. A multiphysics approach is proposed, combining the integration of powerful software tools (ANSYS, AutoCAD, SolidWorks, MATLAB) for modeling complex metallurgical processes with an emphasis on mechanical, thermal and structural analysis.

Key words: computer-aided design, computer modeling, engineering calculations, technical standards, data analysis

Ref. 19, table 4.

UDC: 004.934

Dmytriieva I.S., Bimalov D.V. **Analysis of emotions using facial expressions and voice features** // System technologies. N 3(158) - Dnipro, 2025.- P.21 – 27.

The article is devoted to the study of emotion recognition systems that use both voice and visual data. The paper discusses the main methods of processing acoustic features and facial expressions. Particular attention is paid to the analysis and processing of acoustic characteristics such as intonation, volume, speech rate and pause duration, as well as the use of computer vision methods to detect facial expressions such as smiling, pursed lips or furrowed brows.

Ref. 4, fig. 3, Table 1.

UDC 004.623

Sytnyk R., Hnatushenko Vik. **Method for ensuring the reliability and integrity of personal data processed in a blockchain system** // System technologies. N 3(158) - Dnipro, 2025.- P.28 – 35.

A comprehensive method for ensuring the reliability and integrity of personal data in blockchain systems using a dynamic verification system has been developed. A mathematical model for data reliability assessment and system architecture with a hierarchical structure of verification nodes is proposed. The method has been designed for a blockchain system with a modified Proof-of-Authority consensus algorithm for data protection while maintaining usability.

Refs. 7.

UDC 004.85

Gozhy O.P., Kalinina I.O., Gozhy V.O., Dymo V.V. **System approach to forecasting electricity demand based on machine learning** // System technologies. N 3(158) - Dnipro, 2025.- P.36 – 47.

The article explores a systemic approach to solving the problem of forecasting electricity demand in Ukraine based on machine learning methods. The sequence of data processing stages when solving the forecasting problem using machine learning methods is presented. The methodology for solving the forecasting problem on time series is considered.

Refs. 28.

UDC 004.8:62-50

Shvachych G., Moroz B., Shcherbyna P., Olishevskiy I., Moroz D. **Intelligent process control forecasting system based on artificial neural network** // System technologies. N 3(158) - Dnipro, 2025.- P.48 – 57.

The research is aimed at developing a neural network model for network data processing, which can be used to control technological processes in modern metallurgical production at various stages of metal processing. The proposed system is characterized by high speed, accuracy, reliability and efficiency, which contributes to improving product quality. The system includes a cluster of network sensors that can be reconfigured and connected to a high-performance distributed system. It also provides a mechanism for redundancy of key components and is aimed at increasing the efficiency of the technological process at each stage.

Libr. 14, ill. 2.

UDC 519.2:004.9

Panasenko Ye.S., Belozyorov V.Ye. **Classification of eye state based on EEG data using recurrence analysis** // System technologies. N 3(158) - Dnipro, 2025.- P.58 – 73.

The relevance of this study is driven by the growing interest in portable EEG devices and the need to develop efficient algorithms for analyzing brain activity with limited technical resources. This paper addresses the problem of classifying brain states based on electroencephalography (EEG) data to distinguish between two specific states: relaxation and concentration. The classification of open and closed eyes is examined, as eye closure is associated with increased relaxation. A classification method based on the quantitative analysis of recur-

rence plots, which is one of the approaches of chaos theory, is proposed and compared with traditional brain rhythm analysis.

Bible 22, ill. 4, tab. 1.

UDC 004.8:62-50

Shvachych G., Shcherbyna P., Kabachenko O., Olishevskiy I., Ishchuk P. **Development and exploration of parallel technologies in stochastic programming tasks** // System technologies. N 3(158) - Dnipro, 2025.- P.74 – 86.

Study investigates parallel approaches to problem modeling using the Monte-Carlo method. It has been demonstrated that the core of this method lies in the random modeling of a vast number of scenarios and the statistical analysis of the results, which explains its inherent parallelizability. It is noted that since individual iterations of the Monte-Carlo method are usually independent of each other, they can be easily distributed across multiple threads or nodes in a cluster system. This makes method ideal for parallel and distributed computing. The calculation schemes that enhance productivity and performance are presented. The effectiveness of the proposed approach is demonstrated through research and graphical interpretations, showcasing the convergence and approximation of the developed method.

Бібл. 10, іл. 5.

UDC 612.8:004.8

Inkin O.A., Belozyorov V.E. **Hybrid modeling of EEG: the Fitzhugh-Nagumo-Lorenz model** // System technologies. N 3(158) - Dnipro, 2025.- P.87 – 95.

This study presents a combined mathematical model for interpreting electroencephalogram signals that combines the FitzHugh-Nagumo equation with the Lorentz chaos system. A neural network has been developed that automatically adjusts the model to match real EEG data. This approach successfully reproduces the key features and rhythms of the EEG, and the accompanying MATLAB software facilitates implementation. The method is promising for both scientific research and medical applications in the diagnosis of brain diseases.

Bible 9, ill. 6.

УДК 004.94+510.23+510.25+512.567+629.4

Shynkarenko V., Guda A., Sablin O., Ivanov O. **Attribute saturation of the constructive-synthesizing model of the DC traction power supply system section** // System technologies. N 3(158) - Dnipro, 2025.- P.96 – 109.

The previously developed general constructive-synthesizing model of the DC traction power supply section is enriched with information on the values of the attributes of the constituent elements. Depending on how the model is interpreted by the algorithmic designer, various structural systems are formed. One of them is intended for randomly determining the values of the attributes of electrical equipment and the train situation from a set of potentially possible ones in order to form different options according to which the expert makes a decision on the use of recuperation energy. The second is for collecting information on the state of electrical equipment and the train situation from real objects for controlling the distribution of electricity in automatic mode.

Bibl. 9, il. 1, tabl.

UDC 004.93

Otsrovska K.Yu., Zymogliad A.Yu., Kozakova A.O. **Simulation of a neural network algorithm for the analysis of video flow defects** // System technologies. N 3(158) - Dnipro, 2025.- P.110 – 116.

The paper reviews existing scientific works on video analysis for detecting defects and digital broadcasting technologies. The creation of a data set, data distribution by samples are considered. The training of neural network models and obtaining training results are described. Implementation of the method of using a trained neural network model.

Bibl. 5, ill. 10.

UDC 622.3:622.7

Kononov D.O., Tsikolia A.Z., Ermokratev V.A. **Determination of oscillation parameters of the elastic screen of a vibrating sieve using explicit and implicit dynamics methods for a rubber element** // System technologies. N 3(158) - Dnipro, 2025.- P.117 – 127.

The work is devoted to determining the dynamic parameters of the movement of the elements of the elastic card sieve of the vibrating screen.

A model of the card elastic sieve element for dynamic analysis using the finite element method has been developed.

Bibl. 9, Fig. 8, Tab. 1.

UDK 004.8

Zhukov O.O., Horbenko V.I. **Using time series and lstm neural networks for identification of hive states** // System technologies. N 3(158) - Dnipro, 2025.- P.128 – 139.

This study examines the use of time series and LSTM recurrent neural networks to identify beehive states. An approach to preprocessing temporal data from beehives is developed, which includes data aggregation into optimized intervals, selective export of stable ranges, application of interpolation methods, and time series normalization. Based on these data, two models were developed to identify events and global states.

Bibl. 12.

UDK 004.6

Shopsky O.M., Malets I.A. **Classification and spatial analysis of fires in the operational dispatch control system** // System technologies. N 3(158) - Dnipro, 2025.- P.140 – 148.

The article explores the possibilities of using modern information technologies, in particular big data processing methods, artificial intelligence and machine learning for analyzing operational information accumulated in the operational dispatch control system (OSCU) of the Main Directorate of the State Emergency Service of Ukraine in Lviv region. An information model for predicting risk situations is proposed, which includes the stages of data structuring, event classification, address geocoding and visualization of results in the form of heat maps. An approach to semantic analysis of text data and flexible grouping of events by type is developed. The practical value of the model for optimizing response to emergencies, in particular fires, taking into account spatial and typological features is demonstrated.

Bibl. 14, ill. 4.

UDC 004.8

Zhurba A., Modzalevskyi Y. **Overview of existing warehouse accounting technologies using artificial intelligence** // System technologies. N 3(158) - Dnipro, 2025.– C.149 – 156.

The growing importance of warehouse logistics in the context of globalization and digital transformation of the economy requires increasing the efficiency of inventory management. Traditional accounting methods are unable to provide the necessary accuracy and speed of analysis of large volumes of data, which leads to losses and a decrease in competitiveness. The use of artificial intelligence opens up new opportunities for process automation, resource optimization and demand forecasting in real time. The study is aimed at determining the current level of development of artificial intelligence adaptation to warehouse accounting tasks.

Bibl. 12.

UDC 004.75

Malinich I.P., Ivanchuk Y.V. **Features of microservices placement of learning management systems in hybrid clouds** // System technologies. N 3(158) - Dnipro, 2025.– C.157 – 170.

The article focuses on various approaches and methods for deploying microservices in the cloud, as well as the specifics of their application for hosting microservices in a hybrid cloud environment for learning management systems. The proposed data flow solution for the automated deployment of microservices in a hybrid cloud provides ways to improve microservice distribution methods giving users sufficient control over the process including features of learning management systems.

Ref. 22, fig. 2.

UDC 004.65

Stepanenko A.S., Saiapina I.O. **Modified method of cursor pagination and data filtering as an NPM package** // System technologies. N 3(158) - Dnipro, 2025.– C.171 – 180.

This article is devoted to the development of a modified method of cursor pagination, which has support for basic databases and ORM systems, provides the ability to use complex data filtering and sorting, query indexing, etc. Existing solutions, their use cases, advantages and disadvantages are analyzed. A modified method has been formed, which includes modified and improved functionality of existing NPM packages, along with new implementations focused on increasing the efficiency and versatility of database queries. The proposed solution is analyzed. Potential directions for further expansion and improvement of the method are given.

Bibl. 8.

UDC 004.4:004.8:681.3.06:004.912

Verbovyi D.S., Saiapina I.O. **Method for automatic verification of documents for compliance with regulatory requirements** // System technologies. N 3(158) - Dnipro, 2025.– C.181 – 187.

This article is devoted to the development of an effective method for automatic verification of document formats, which allows to guarantee their compliance with certain formatting standards. Existing approaches using rule-based systems and machine learning methods are reviewed and analyzed. A modified method is proposed that combines both structural and linguistic verification. A comparative analysis of the proposed method with existing approaches is conducted. Potential directions for further research are also suggested.

Bibl. 9.

UDC 004.43: 004.054

Soluian O., Liushenko L. **Research of WebAssembly usage for high-performance code development in web applications** // System technologies. N 3(158) - Dnipro, 2025.– C.188 – 200.

The paper examines the potential of using WebAssembly in web applications to ensure high performance. It is shown that WebAssembly technology allows achieving nearly native speed compared to JavaScript due to bytecode compilation. The performance of WebAssembly is analyzed using linear algebra algorithms with PolyBenchC benchmarks. The research results demonstrated that WebAssembly shows advantages in executing computationally intensive algorithms with small and medium data sizes. The main factors affecting WebAssembly's efficiency when processing large data volumes are identified.

Ref. 11, fig. 3, tab. 2.

UDC 666.9.033

Nesterenko M.M., Vedmid V.V. **Movement of air voids in lightweight concrete mixtures during vibration compaction** // System technologies. N 3(158) - Dnipro, 2025.– C.201 – 208.

The paper investigates the compaction process of polystyrene concrete under the influence of wave excitation. A dynamic model of the "platform – concrete mixture – mold" system is developed and three vibration excitation modes are analyzed. It was found that combined oscillations (vertical + horizontal) generate spiral drift of air inclusions and promote effective structure cleaning. The results can be applied to optimize compaction regimes in the production of lightweight concrete products.

Ref. 7, Table 1.

UDK 621.875.56

Strelbitskyi V.V. **Research of operating reliability of portal cranes "GANZ" 5-30 river port** // System technologies. N 3(158) - Dnipro, 2025.– C.209 – 216.

The robot analyzed the malfunctions of the mechanisms of Gantz portal cranes with a lifting capacity of 5 tons that occur during operation in a river port. Analysis of the results of the study showed that the greatest number of failures was found in the traveling, lifting and luffing mechanisms of the crane. The main causes of failures of lifting mechanisms are wear of brake pulleys, destruction and wear of shafts and bearings in gearboxes.

Ref. 16.

Системні технології
ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
Випуск 3 (158)

Головний редактор: к.т.н., доц. Т.В. Селівьорстова

Технічний редактор та секретар збірки: к.т.н., доц. К.Ю. Островська

Здано до набору 28.04.2025. Підписано до друку 30.04.2025.

Формат 60x84 1/16. Друк - різнограф. Папір типограф.

Умов. друк арк. – 16,64. Обл.–видавн. арк. – 14,56.

Тираж 300 прим. Замовл. – 03/25

Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»,
кафедра Інформаційних технологій та систем: ІВК «Системні технології»
49600, Дніпро, а/с 493

<http://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st>

Свідомство про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації:

Серія КВ № 8684 від 23 квітня 2004 рік

Редакційна колегія

Селівьорстова Тетяна Віталіївна
(головний редактор)

доцент, кандидат технічних наук

Алпатов Анатолій Петрович

Член-кореспондент НАН України,
професор, доктор технічних наук

Архипов Олександр Євгенійович

професор, доктор технічних наук

Бабічев Сергій Анатолійович

доцент, доктор технічних наук

Білозьоров Василь Євгенович

професор,

доктор фізико-математичних наук

Гече Федір Елемирович

професор, доктор технічних наук

Гуда Антон Ігорович

(заст. головного редактора)

професор, доктор технічних наук

Гнатушенко Вікторія Володимирівна

(вчений секретар)

професор, доктор технічних наук

Гнатушенко Володимир Володимирович

професор, доктор технічних наук

Гожий Олександр Петрович

професор, доктор технічних наук

Єрьомін Олександр Олегович

професор, доктор технічних наук

Кіріченко Людмила Олегівна

професор, доктор технічних наук

Світличний Дмитро Святозарович

професор, доктор технічних наук

Скалозуб Владислав Васильович

професор, доктор технічних наук

Хандецький Володимир Сергійович

професор, доктор технічних наук

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Інститут технічної механіки

НАНУ і ДКАУ, Україна

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського", Україна

Jan Evangelista Purkyně University
in Ústí nad Labem

Університет імені Яна Євангеліста Пуркіне, Усті над Лабем, Чеська Республіка

Дніпровський національний університет імені
Олеса Гончара, Україна

Ужгородський національний університет, Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка», Україна

Чорноморський національний університет імені
П.Могили, Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Харківський національний університет
радіоелектроніки, Україна

Akademia Górniczo-Hutnicza

Краківська гірничо-металургійна академія ім. С.
Сташіца, Польща

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту» Україна

Дніпровський національний університет імені
Олеса Гончара, Україна