МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ТАВРІЙСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО

Журнал заснований у 1918 році

ВЧЕНІ ЗАПИСКИ

ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО

Серія: Технічні науки

Том 36 (75) № 1 2025

Частина 2

Видавничий дім
«Гельветика»
2025

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 7 від 20 лютого 2025 року)

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки»
зареєстровано відповідно до Рішення Національної ради України
з питань телебачення і радіомовлення № 1136 від 11.04.2024 року.

Мови видання: українська, англійська, польська, німецька,
французька, словацька, румунська, італійська.

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») з технічних наук (спеціальності: G1 Хімічні технології та інженерія; G4 Енерговиробництво (за спеціалізацією); G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка) відповідно до Наказу МОН України від 17.03.2020 № 409 (додаток 1), F2 Інженерія програмного забезпечення; F6 Інформаційні системи і технології; F7 Комп'ютерна інженерія; G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка; D3 Менеджмент; G11 Машинобудування (за спеціалізаціями); J5 Морський та внутрішній водний транспорт; J6 Авіаційний транспорт; J7 Залізничний транспорт; J8 Автомобільний транспорт відповідно до Наказу МОН України від 02.07.2020 № 886 (додаток 4)

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International (Республіка Польща)

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

ISSN 2663-5941 (Print)
ISSN 2663-595X (Online)

ЗМІСТ

CONTENTS

ELECTRICAL ENGINEERING

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.3
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/01

Литвин В.І.
Національний університет біоресурсів та природокористування України

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПОБУТОВИХ ЄМНІСТНИХ ЕЛЕКТРОНАГРІВАЧІВ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ СИСТЕМУ ТА ШЛЯХІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ЇХ РОБОТИ

Стаття присвячена аналізу роботи ємнісних електричних електронагрівачів, що є одними з найбільших споживачів електричної енергії в побутовому секторі. Відмова багатьох міст України від централізованого теплозабезпечення зробила такий тип гарячого водопостачання практично безальтернативним для житлових багатоповерхових будинків.

Беручи до уваги загальну потужністю зазначених електроспоживачів, а також значний потенціал в частині акумулювання енергії, розробка алгоритмів керування такими установками, а також методик підбору їх ємності є дуже актуальною, особливо в умовах дефіциту потужності генеруючих установок. Також зазначені підходи можуть бути використані під час оцінювання та підбору сонячних електростанцій в багатоповерхових будинках і їх використання для потреб гарячого водопостачання. Стаття описує результати аналізу споживання ємнісними електричними водонагрівачами, а також методи підбору ємності обладнання.

В ході дослідження була зібрана інформація по профілям споживання гарячої води в багатоквартирних житлових будинках, що дозволило проаналізувати попит на електричну енергію пов'язаний з використанням ємнісних електричних водонагрівачів. Для визначення фактичних потреб електричної енергії з розрахунку на одне домогосподарство були використані показники споживання теплової енергії для будинків з централізованим гарячим водопостачанням, що дозволило отримати узагальнені профілі споживання енергії на потреби гарячого водопостачання та визначити потенціал зниження піків споживання за рахунок керування навантжаненням ємністних еletкричних водонагрівачів.

Розраховані потреби в гарячому водопостачанні дозволяють моделювати режими споживання електричної енергії житловими будівлями на потреби гарячого водопостачання та в подальшому керувати попитом в межах як окремої будівля так і електричних мереж районів та міст загалом. Це особливо важливо з огляду на роботу в дефіцитній енергосистемі, а також з огляду на вибір оптимальної конфігурації (потужності, ємності накопичувачів) будинкових сонячних електростанцій.

Також розкритий потенціал зниження навантаження енергосистеми в умовах використання комбінованого виробництва теплової та електричної енергії за рахунок відмови від електричного підігріву води та використання централізованого гарячого водопостачання в кобмінації з відновлювальними джерелами енергії.

Ключові слова: *керування попитом, балансування навантаження, гаряче водопостачання, ємнісні електронагрівачі, дефіцит потужності, відновлювальні джерела енергії, енергосистема, балансування.*

Постановка завдання. Останніми роками відбувається суттєва зміна в системах енергопостачання спричинена широким використанням відновлювальних джерел енергії, зокрема сонячної електроенергії, що характеризується нерівномірністю графіку генерації. В умовах роботи української енергосистемі додатково накладаються обмеження, що викликані руйнуваннями енергетичної інфраструктури в наслідок військової агресії Російської Федерації, а саме недостатня кількість генеруючих потужностей та обмежена пропускна спроможність систем передачі електроенергії.

При цьому аналіз роботи споживача електроенергії, що становить від 50 до 75% від загального споживання домогосподарства, а відповідно і керування їм стає пріоритетним завданням, яке може суттєво пом'якшити наслідки дефіциту

потужності, а також зменшити потребу в маневровій генерації на традиційному паливі.

Одним з найбільших споживачів електричної енергії в побутовому секторі є ємнісні елекричні водонагрівачі, що з огляду на руйнування систем централізованого гарячого водопостачання та тарифну політику стали основним джерелом гарячої води в багатоквартирних будівлях. В той же час акумулююча здатність таких приладів дає можливість суттєво впливати на графіки споживання електричної енергії побутовими споживачами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням використання навантаження на побутове гаряче водопостачання для керування попитом присвячено значну кількість досліджень та публікацій [1, 2, 3, 5, 7].

Стратегія керування попитом на стороні споживача [13], як правило розглядалася без врахування можливостей генерації електричної енергії на рівні будівель та аналізу потенціалу щодо одночасного керування попитом та генерацією на рівні будівлі. З огляду на збільшення долі гарячого водопостачання в балансі споживання електричної енергії домогосподарством (через впровадження значної кількості енергоощадних споживачів, зокрема освітлення та побутових приладів), а також все ширше розповсюдження дахових сонячних електростанцій та теплових насосів постає задача щодо розробки ефективних моделей керування зазначеними споживачами, зокрема з огляду на потенціал акумулювання і балансування навантаження. При цьому постає питання не лише щодо керування вже встановленим обладнанням, а також вибору оптимальних характеристик (в першу чергу ємності водонагрівачів та потужності електронагрівальних пристроїв), що дозволить найбільш раціонально використовувати наявні джерела електричної енергії.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є оцінювання потенціалу балансування електричних мереж за рахунок ємнісних електричних водонагрівачів, що використовуються в житлових та громадських будівлях. З огляду на те, що потужність ємністних водонагрівачів наразі оцінюється лише для м. Києва в 300-400 МВт, що співрозмірно з блоком електростації, а в межах України цей показник може становити близько 3 ГВт. При цьому, з огляду на погодинні графіки потреби в гарячому водопостачанні, спостерігається одночасна робота зазначених споживачів і залишається не використаним потенціал зміщення максимуму навантаження таких установок.

Відповідно гаряче водопостачання може розглядатися як дуже суттєвий споживач-регулятор в енергосистемі України. З огляду на значні руйнування генеруючих потужностей, а особливо маневрових, ефективне керування попитом дозволить пом'якшити наслідки дефіциту електроенергії, а після будівництва нових потужностей – забезпечити ефективне балансування відновлювальних джерел енергії та сприятиме досягненню цілей України щодо декарбонізації.

Вимірювання попиту на електричну енергію на потреби гарячого водопостачання в багатоквартирних житлових будівлях дозволить в подальшому підготувати пропозиції щодо оптимізації споживання та покриття зазначеного навантаження, вирівнювання графіків електроспоживання та інтеграції в будинкові системи електропостачання відновлювальних джерел енергії, зокрема будинкових сонячних електростанцій.

Виклад основного матеріалу. Методи. Найбільш складною задачею для визначення потенціалу використання ємнісних електронагрівачів в якості споживачів-регуляторів є оцінювання фактичної потреби домогосподарств в гарячому водопостачанні протягом доби і визначення фактичних витрат енергії на гаряче водопостачання серед загального енергоспоживання.

Використання нормативних витрат гарячої води, як правило не дає достовірних результатів як з огляду на зміни звичок споживачів та використання таких приладів як пральні та посудомийні машини, так і з огляду на відсутність достовірної інформації щодо кількості мешканців. Для проведення оцінювання фактичних потреб в енергії були використані статистичні дані по споживанню гарячої води багатоповерховими будівлями, де практично в повній мірі зберіглося централізоване гаряче водопостачання (рис. 1, 2).

Для оцінювання потреби в гарячому водопостачанні з використанням вузлів обліку теплової енергії і подальшого перерахунку в споживання електричної енергії для будівель, де централізоване гаряче водопостачання відсутнє були враховані наступні умови:

– споживання теплової енергії на гаряче водопостачання включає як витрати безпосередньо на підігрів холодної води так і втрати в трубопроводах, лінії циркуляції та в опалювальних приладах (рушникосушарках) підключених до системи гарячого водопостачання;

– виокремлення втрат в трубопроводах можливе за умови аналізу теплоспоживання в нічні години, коли розбір гарячої води є мінімальним

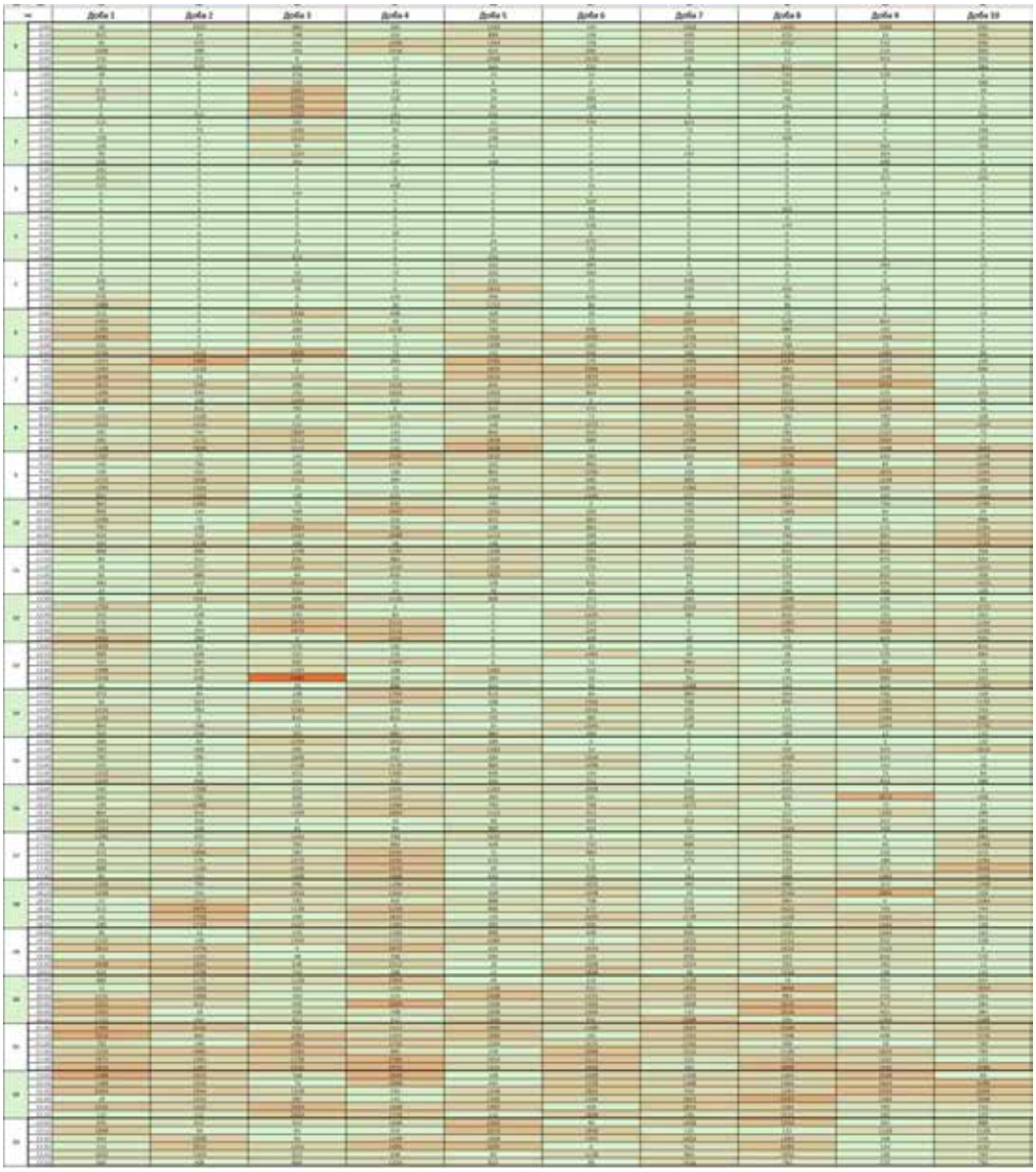


Рис. 1. Теплова карта розподілу споживання гарячої води протягом доби

а отже вся підведена енергія витрачається на покриття тепловтрат;

– контрольним параметром споживання гарячої води, що йде на підігрів може служити загальнобудинкове споживання холодної води з огляду на те, що пропорція споживання холодної та гарячої води, як правило, зберігається;

– для випадків, коли відсутній окремий облік споживання теплової енергії на гаряче водопостачання, лічильник теплової енергії обліковує загальне споживання на опалення та гаряче водопостачання, виокремити потребу енергії на гаряче водопостачання можливе в міжопалювальний період, коли відсутнє навантаження на опалення.

– у випадку, якщо для аналізу попиту на гаряче водопостачання використовується міжопалювальний період важливо зкоригувати споживання енергії на підігрів в зимових період з огляду на нижчу температуру холодної води, що йде на підігрів (5 ^{0}C – в зимовий період та 15^{0}C – в міжопалювальний період).

По результатам аналізу півгодинних інтервалів споживання гарячої води була побудована теплова карта (Рис. 1). Як видно, на рис. 1 попри загальну тенденцію щодо відповідності узагальненому графіку споживання гарячої води (Рис. 2) показники для різних діб можуть досить суттєво відрізнятися в частині початку та закінчення максимуму споживання води, а отже і моментів увімкнення/вимкнення електронагрівачів. Це обумовлюється як днем тижня і режимом використання так і іншими факторами, зокрема зовнішньою

Рис. 2. Усереднені дані споживання гарячої води протягом доби в багатоквартирному житловому будинку

температурою, що повинно бути проаналізовано додатково. Відповідно до цього має бути визначена оптимальна стратегія роботи водонагрівачів як для будинкових потреб так і в розрізі кожного домогосподарства.

В якості об'єкта дослідження був вибраний житловий 10 поверховий 6 під'їзний будинок, збудований за типовим проєктом. Кількість квартир 240.

Аналіз узагальнених добових показників водопоспоживання вказує на середньодобовий показник в межах 65-80 л. на одну квартиру. Що в енергетичному еквіваленті становитиме 3.4-4.2 кВт-год (1):

$$E = 0{,}052 \times V, \quad (1)$$

де E – кількість енергії, необхідної на нагрів,

V – об'єм використаної гарячої води, л.

За умови, що приготування гарячої води відбувалося б в електричних ємнісних електронагрівачах, їх встановлена потужність склала б 480 кВт, а добова потреба в електичній енергії – 912 кВт-год.

Відповідно повне заряджання електричних бойлерів могло б здійснюватися протягом приблизно 2 годин. Що дозволило б заповнити провал в графіку електроспоживання, який ми спостерігаємо в період з 0:30 до 5:00, або використати потенціал сонячної генерації в денні години. Масштабування зазначених рішень на великі міста або країну дозволило б достатньо гнучко керувати попитом на електроенергію.

Зазначений підхід може також бути застосований під час аналізу потенціалу використання сонячної енергії на дахах багатоквартирних житлових будинків. Маючи інформацію про потенціальний обсяг енергоспоживання, а також потенціал генерації сонячними електростанціями є можливість проводити оцінювання оптимальної потужності енергоспоживання для використання в локальних системах електрозабезпечення.

Попередній аналіз такого потенціалу (з врахуванням потенціалу розміщення сонячних панелей на дахах будівель та їх помісячної генерації (рис. 3) наведено в таблиці 1.

Як видно з таблиці 1 ємнісні водонагрівачі можуть розглядатися як основний акумулятор електричної енергії в будівлях без централізованого гарячого водопостачання. При цьому сонячні електростанції можуть покривати значний відсоток потреб в електроенергії в літній період, а з врахуванням застосування теплових насосів з коефіцієнтом перетворення 2,5 та вище повністю забезпечити гаряче водопостачання з березня по жовтень в 5 поверхівках та з квітня по вересень – в 9 поверхових житлових будинках.

Місяць	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Рік
Генерація, кВт-год	317	528	870	1190	1416	1436	1427	1263	931	627	286	234	10 525

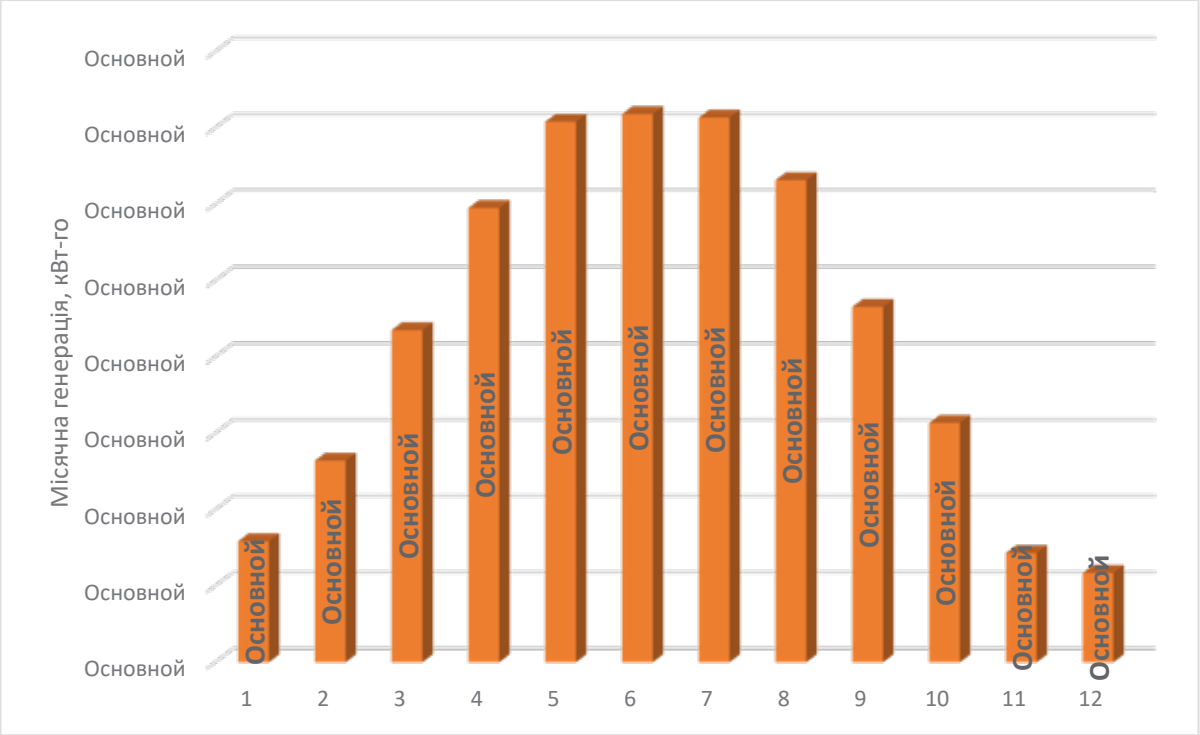


Рис. 3. Дані щодо генерації сонячною електростацією потужністю 10 кВт протягом року

Таблиця 1

Потенціал покриття потреб житлових будинків сонячними системами

Місяць	5 поверхівки		9 поверхівки		16 поверхівки	
	Газова плита, без бойлера	Газова плита + бойлер	Газова плита, без бойлера	Газова плита + бойлер	Електроплита без бойлера	Електроплита + бойлер
Січень	53%	21%	29%	12%	6%	4%
Лютий	88%	35%	49%	20%	9%	6%
Березень	145%	58%	81%	32%	15%	10%
Квітень	198%	79%	110%	44%	21%	14%
Травень	236%	94%	131%	52%	25%	16%
Червень	239%	96%	133%	53%	25%	17%
Липень	238%	95%	132%	53%	25%	17%
Серпень	211%	84%	117%	47%	22%	15%
Вересень	155%	62%	86%	34%	16%	11%
Жовтень	105%	42%	58%	23%	11%	7%
Листопад	48%	19%	26%	11%	5%	3%
Грудень	39%	16%	22%	9%	4%	3%

При цьому будинки в 16 та вище поверхів, що як правило негазифіковані, маючи незначний потенціал покриття електроспоживання за рахунок локальних сонячних установок в той же час мають найбільшу потреби в керуванні попитом на електричну енергію.

Результати. В ході дослідження була зібрана інформація по профілям споживання гарячої води в багатоквартирних житлових будинках, що дозволило проаналізувати попит на електричну енергію пов'язаний з використанням ємнісних електричних водонагрівачів.

Розраховані потреби в гарячому водопостачанні дозволяють моделювати режими споживання електричної енергії житловими будівлями на потреби гарячого водопостачання та в подальшому керувати попитом в межах як окремої будівля так і електричних мереж районів та міст загалом. Це особливо важливо з огляду на роботу в дефіцитній енергосистемі, а також з огляду на вибір оптимальної конфігурації (потужності, ємності накопичувачів) будинкових сонячних електростанцій.

Проаналізований потенціал зниження енергоспоживання та навантаження за рахунок заміщення гарячого водопостачання централізованими системами, а також потенціал щодо зниження електричного навантаження багатоквартирних будинків за рахунок використання акумулюючих ємностей водонагрівачів, що наразі співрозмірно з будівництвом декількох нових енергоблоків маневрової генерації.

Висновки.

1. Системи гарячого водопостачання на базі ємнісних водонагрівачів є одними з найбільш перспективних для України з огляду на потенціал керування попитом на електричну енергію.

2. Аналіз показників теплоспоживання для будівель, де збереглося централізоване споживання гарячої води дозволяє визначити фактичну потребу в енергії на підігрів холодної води, а отже ідентифікувати потужність та споживання електроенергії житловими будівлями на потреби гарячого водопостачання.

3. Реалізація потенціалу акумулювання ємнісних електричних водонагрівачів дозволить в межах країни суттєво знизити дефіцит електричної потужності в години максимуму енергоспоживання. Окрім цього при проєктуванні систем розподіленої генерації це дозволить зменшити потужності розподільчих мереж, а з врахуванням впровадження систем комбінованого виробництва електричної та теплової енергії – в ряді випадків відмовитися від використання електронагрівачів на користь централізованого гарячого водопостачання.

4. З огляду на індивідуальні особливості споживання гарячої води як для окремих споживачів так і для будівель загалом важливим є побудова коректних моделей для прогнозування попиту на гаряче водопостачання, а також систем керування ємнісними водонагрівачами, що дозволили б не погіршуючи комфорту кінцевих споживачів максимально адаптуватися до потреб системи електропостачання та можливості максимального використання відновлювальних джерел енергії.

Список літератури:

1. Оптимізація функціонування інтегрованих систем енергозабезпечення споживачів: Ю.А. Веремійчук, В.П. Опришко, І.В. Притискач, О.С. Ярмолюк.

2. Горский В. Особливості споживання електроенергії населенням – Science in the context of modern challenges: problems and development priorities

3. Агеєва Т. П. Методичні основи оцінки енергозбереження та прогнозування енергоспоживання в сфері житлового та комунально-побутового обслуговування населення України : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.14.01 / Ін-т заг. енергетики НАН України. Київ, 2002. 20 с.

4. Гребченко М. Системи електропостачання з локальними джерелами енергії та керування ними. Київ : Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського» проспект Берест., 37, м. Київ, 03056, 2023. 78 с. https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/41e81896-4f4e-4106-96d7-711fa381e244/content

5. КАБІНЕТ МІНІСТРІВ УКРАЇНИ. Концепція Впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/908-2022-p#Text.

6. Карталапов К. М. Розподілена генерація та smart grid. https://www.ukrlogos.in.ua/10.11232-2663-4139.16.23.html.

7. Кіянчук В. М., Махотіло К. В. Участь побутових споживачів на енергетичних ринках через керування попитом. https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/c84e34e8-9332-464d-8290-08663c229d04.

8. Панасюк М., Замулко А. І. Особливості проведення аналізу нерівномірності споживання електроенергії. https://en.iee.kpi.ua/files/2012/153-165.pdf.

9. A review of strategies for building energy management system: Model predictive control, demand side management, optimization, and fault detect & diagnosis https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710220310627

10. Ackermann T., Andersson G., Söder L. Electric Power Systems Research. 3rd ed. Sweden : Department of Electric Power Engineering, Royal Institute of Technology, Electric Power Systems, Teknikringen 33, 10044 Stockholm, 2001. Vol. 57 : Distributed generation: a definition. 194-204 p. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779601001018.

11. A comprehensive overview on demand side energy management towards smart grids: challenges, solutions, and future direction / M. S. Bakare et al. URL: https://energyinformatics.springeropen.com/articles/10.1186/s42162-023-00262-7.

12. Palensky P., Dietrich D. Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. URL: https://www.researchgate.net/publication/224243498_Demand_Side_Management_Demand_Response_Intelligent_Energy_Systems_and_Smart_Loads

13. Williams B., Bishop D., Gallardo P. Demand Side Management in Industrial, Commercial, and Residential Sectors: A Review of Constraints and Considerations. URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/16/13/5155.

14. Farhangi H., Joos G. Microgrid Planning and Design: A Concise Guide. 2019. 256 p. URL: https://ieeexplore.ieee.org/book/8671408.

Lytvyn V.I. WAYS TO OPTIMIZE THE ENERGY CONSUMPTION OF RESIDENTIAL AND PUBLIC BUILDINGS IN THE PRESENCE OF ALTERNATIVE ENERGY SOURCES

The article is devoted to the analysis of capacitive electric water heaters, which are one of the largest consumers of electricity in the domestic sector. The refusal of many Ukrainian cities from district heating has made this type of hot water supply practically unavailable for residential multi-storey buildings.

Taking into account the total capacity of these electricity consumers, as well as their significant potential for energy storage, the development of algorithms for controlling such installations, as well as methods for selecting their capacity, is very relevant, especially in the context of a shortage of generating capacity. These approaches can also be used in the assessment and selection of solar power plants in multi-storey buildings and their use for hot water supply. The article describes the results of the analysis of consumption by capacitive electric water heaters, as well as methods for selecting the capacity of the equipment.

The study collected information on hot water consumption profiles in multi-apartment residential buildings, which allowed us to analyse the demand for electricity associated with the use of capacitive electric water heaters. To determine the actual electricity consumption per household, we used the heat energy consumption figures for buildings with centralised hot water supply, which allowed us to obtain generalised profiles of energy consumption for hot water supply and determine the potential for reducing consumption peaks by controlling the load of capacitive electric water heaters.

The calculated hot water demand allows modelling the modes of electricity consumption by residential buildings for hot water supply and subsequently managing demand within a single building and the electricity networks of districts and cities in general. This is especially important in view of the operation in a deficit power system, as well as the choice of the optimal configuration (power, storage capacity) of residential solar power plants.

The paper also reveals the potential for reducing the load of the power system in the context of combined heat and power generation by eliminating electric water heating and using centralised hot water supply in combination with renewable energy sources.

Key words: *demand management, load balancing, domestic hot water supply, capacitive electric water heaters, power deficit, renewable energy sources, power system, balancing.*

УДК 614.841
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/02

Ніжник В.В.
Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Іллюченко П.О.
Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Михайлов В.М.
Сектор пожежної безпеки та технологій науково-дослідного центру протипожежного захисту

Несенюк Л.П.
Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛООБМІННИКА ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ МАСЛА ПІД ЧАС ПОЖЕЖІ

Метою даної роботи була розробка та проведення повного факторного експерименту залежності площі охолоджуючого контуру теплообміннної системи (далі – теплообмінника) (з наповненням холодоагентом водою) для охолодження трансформаторного масла до температури нижче його температури спалаху (нижче 150 °С) від об'єму трансформаторного масла, що знаходиться в корпусі трансформатора та діаметра гофрованих трубок з нержавкої сталі теплообмінника. Повний факторний експеримент є ефективним методом вивчення складних взаємозв'язків у процесах розвитку та припинення пожежі. Отримані результати допоможуть розробити рекомендації для проєктування ефективності системи попередження поширення пожежі на маслонаповнених електричних трансформаторах.

Нашими попередніми дослідженнями встановлено наступні значущі чинники: мінімальний і максимальний об'єм трансформаторного масла в трансформаторі; мінімальний і максимальний діаметр трубок з нержавкої сталі теплообмінника; величини стандартного ряду площ теплообмінника.

Визначено, що для побудови математичної моделі температурного режиму пожежі у маслонаповнених трансформаторах необхідно провести повний факторний обчислювальний експеримент. Проведено чотири чисельних експерименти згідно з розробленої в ході досліджень матриці планування.

За результатами дослідження було отримано математичну модель охолодження трансформаторного масла до температури нижче його температури спалаху від об'єму трансформаторного масла та діаметра гофрованих трубок з нержавкої сталі теплообмінника. Отримано константи рівняння числової регресії для охолодження трансформаторного масла під час проходження охолоджуючим контуром теплообмінника в ході аварійної розгеметизації корпусу трансформатора під час пожежі. Подальшого розвитку дістало застосування обчислювальних експериментів для визначення температурних режимів пожежі при різних умовах.

Ключові слова: *повний факторний експеримент, температурний режим, параметри теплообмінника, трансформаторне масло, теплообмінник, температура спалаху, температура займання, пожежа трансформаторів, вогнеперегороджувач, гравійна засипка.*

Постановка проблеми. Людство постійно вдосконалює свої моделі використання енергії. У цьому контексті електроенергія широко використовується в усьому світі ефективне джерело енергії.

Силові трансформатори, як електромагнітні пристрої, що призначені для перетворення однієї системи змінної напруги та струму, в іншу систему змінної напруги й струму, за однакової частоти задля передавання електроенергії та її використання. Трансформаторна підстанція, будучи складним технологічним об'єктом, має бути спроєктована та повинна експлуатуватися за певними правилами та нормами, що включають в тому числі і вимоги щодо забезпечення пожежної безпеки.

Так, силові маслонаповнені трансформатори містять від 200 л до 60 000 л мінерального масла, яке використовується для охолодження елементів та ізоляції струмоведучих частин трансформа-

тора. Відповідно до міжнародного стандарту IEC 60596-1-40 [1] з показників пожежної небезпеки електроізоляційних рідин трансформаторні мінеральні масла це горючі ізоляційні рідини класу О1, тобто, що температура займання масла становить ≤ 300 °С, а нижча теплота згорання ≥ 42 °МДж/кг. Наголошується, що пожежі за участю викиду ізоляційних рідин згаданого класу найбільш матеріально збиткові. Зазвичай температура спалаху трансформаторного масла не нижче 140 °С. Причин виникнення пожеж на трансформаторних підстанціях багато. У різних галузях паливно-енергетичному комплексу деякі трапляються рідко, інші досить часто. Аналіз пожеж засвідчив, що основними причинами їх виникнення стали коротке замикання в електричних колах електрообладнання (переважно трансформаторне обладнання) та порушення технологічних процесів через перевантаження електричної мережі. Пожежі на трансформаторах супроводжуються перегрівом масла до температури вище 250 °С, розгерметизацією корпусу трансформатора, витоком масла і його займанням (рисунок 1).

Рис. 1. Приклад пожежі на маслонаповненому силовому трансформаторі

За даними Міністерства енергетики України [2], за останні п'ять років до повномасштабного вторгнення країни-агресора тільки на підприємствах паливно-енергетичного комплексу сталося більше 100 пожеж (рисунок 2), у результаті яких збитки склали близько 158 млн. грн, при чому близько п'ятидесяти відсотків пожеж в цій галузі припадає на трансформаторне обладнання, і як правило, такі пожежі супроводжуються аварійним розливом масла із трансформатора та його загорянням.

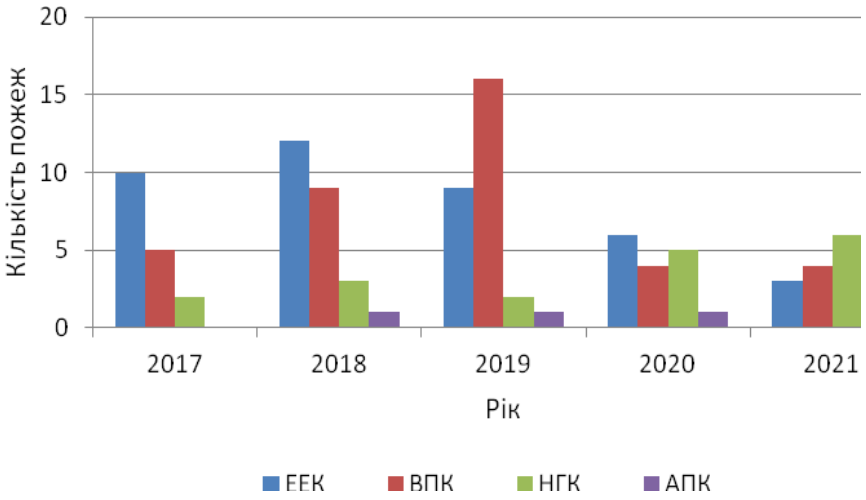
На сьогоднішній день ризик виникнення пожеж на трансформаторних підстанціях значно підвищився, адже в умовах російської агресії об'єкти енергетики, стали одними із пріоритетних цілей завдання ракетних та дронових ударів з метою зламу опору агресору, тому удосконалення систем попередженні поширення пожежі на трансформаторних підстанціях є важливим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час аварійних режимів роботи трансформатора розлив нагрітого вище температури спалаху трансформаторного масла та його подальше займання може сприяти подальшому розвитку пожежі спричинити поширенню територією підприємства на суміжні об'єкти.

Тому з метою обмеження розвитку та поширення пожежі маслонаповненого електроустаткування регламентуються відстані між елементами та спорудами енергетичних об'єктів, застосовуються перегородки з негорючих матеріалів та улаштовують системи пожежогасіння тощо.

Окрім цього, для припинення горіння трансформаторного масла та його охолодження до безпечної температури застосовують системи попередження поширення пожежі, а саме – під трансформатором улаштовують маслоприймач (з функцією відведення масла в маслозбірник або ні) з засипкою з гірських порід в якості вогнезагороджувача. Закордонна практика в якості засипки з гірських порід використовує морську гальку, щебінь з розмірами часток 3,8 см [3–7], а вітчизняні вимоги нормують застосування шару товщиною 0,25 м чистого гравію, промитого гранітного щебеню або непористого щебеню іншої породи з фракцією 50 мм ± 20 мм [8, 9]. Однак внаслідок впливу навколишнього середовища засипка з гірських порід підлягає забрудненню, що значно знижує її здатність пропускати та охолоджувати розігріте до критичних температур масло. Зазначене зумовлює обов'язкове періодичне (відповідно до Правил [9] – не рідше ніж 2 рази у рік) проведення ресурсозатратного комплексу заходів з утримання засипки в чистоті, а в деяких випадках її навіть унормовано до заміни. Окрім того, нормованого в [8, 9] об'єму засипки може бути недостатнім для зниження температури трансформаторного масла при аварійній розгерметизації трансформатора до безпечної (нижче температури спалаху) може бути недостатнім.

Питання безпеки електроенергетики завжди привертало увагу вчених. У розв'язанні питань щодо забезпечення пожежної безпеки, гасіння пожежі на електропідстанціях, обмеження поши-



ЕЕК - електроенергетичний комплекс; ВПК - вугільно-промисловий комплекс; НГК - нафтогазовий комплекс; АПК - атомно-промисловий комплекс

Рис. 2. Розподіл кількості пожеж, які сталися у різних галузях паливно-енергетичному комплексу протягом 2017 – 2021 рр.

рення пожежі між будівлями та дослідження властивостей горіння вуглеводнів, особливо трансформаторних масел, взяли участь як вітчизняні так і закордонні науковці.

Так, в роботі Ніжника В. та Поздєєва С. [10] розглянута проблематика оцінювання небезпеки розвитку поширення вогню на суміжні об'єкти. Вчені дійшли висновку, що тепловий потік від вогнища пожежі є суттєво змінним у часі та залежить від зовнішніх погодними умов. При цьому не рекомендують густину теплового потоку використовувати як основний критерій оцінювання небезпеки поширення пожежі між суміжними будівельними об'єктами. Ними обґрунтовано вибір критерію, що характеризує небезпеку поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти.

Актуальним завданням в електроенергетиці є забезпечення працездатності електротехнічного обладнання після нормованого (розрахункового 25–30 років) терміну служби. Аналіз аварійності, оцінка стану та діагностичне обстеження головних генераторних трансформаторів ТНЦ-1250000/330 уможливили визначити незворотність катастрофічних процесів під час тривалої експлуатації, якщо не здійснюється відновлення міцності їх систем. Автори [11] доводять, що повернення систем трансформаторного обладнання до регламентованого стану зберігає високі показники безпеки, надійності та ефективності.

У дослідженні [12] для моделювання пожежі, з метою вивчення характеристик горіння трансформаторного масла з використанням різних методів подачі вогнегасячої суміші, використовувався сталевий резервуар площею 100 м^2. Результати показали, що температури ближче до краю резервуара, знижувалися зі зростанням його висоти. Швидкість зростання висоти полум'я збільшувалася на етапі, коли початкова температура палива нагрівалася до вищого значення. На ефективність гасіння істотно вплинули концентрація вогнегасних речовин і щільність їх подачі. Хорошим вибором з точки зору безпеки пожежників стало дотримання більшої відстані до резервуара для подачі вогнегасних засобів, а час гасіння має бути коротший. Також зазначено, що для ефективного гасіння пожежі стратегія повинна полягати у використанні двох і більше пожежних машин щоб охопити весь аварійний резервуар.

Полум'я струменя трансформаторного масла становить серйозну загрозу безпеці для обладнання та працівників через його сильне ближнє теплове випромінювання та вплив полум'я на великі відстані. Тому вчені [13] вивчали характеристики горіння струменів трансформаторного масла, щоб забезпечити теоретичну допомогу у запобіганні та гасінні пожеж на підстанціях. У ході проведених експериментів виведено функціональну залежність між висотою полум'я та масовою витратою та функціональну залежність

між температурою полум'я та осьовою висотою. Було створено модель прогнозування променистого теплового потоку струменя трансформаторного масла для маслонаповненого обладнання підстанції.

Температурні режими пожеж на трансформаторах мають суттєве значення для подальшого моделювання, прогнозу їхнього поширення та здійснення заходів щодо запобігання комплексним пошкодженням. В праці [14] дослідниками було розглянуто вплив температурних режимів пожеж на захисні конструкції, призначених для укриття трансформаторів. В результаті обґрунтовано модифікований температурний режим під час пожежі на трансформаторах, розташованих у захисних спорудах, який складав від 900 °С до 1100 °С. Також встановлено нормований час (до 30 хвилин), протягом якого будівельні конструкції захисних споруд повинні витримувати вплив зміненого температурного режиму.

Актуальні питаннями розкриття закономірностей охолодження та припинення горіння вуглеводнів висвітлені дисертаційній роботі [15]. Вченим удосконалено вимоги щодо улаштування системи вогнеперешкоджання (засипки з гірських порід) на маслоприймачах трансформаторних підстанцій.

Проте у вищезазначених роботах не висвітлюється питання вдосконалення заходів щодо запобігання поширенню пожеж у приймачах трансформаторного масла з метою впровадження ефективної швидкодіючої системи теплообміну, яка могла б знизити температуру трансформаторного масла нижче спалаху, придатної замінити засипку з гірських порід. Це підкреслює актуальність проведення досліджень, спрямованих на визначення оптимальних параметрів засобу, який зможе ефективно знизити пожежонебезпечну температуру трансформаторного масла під час його витоку під час аварійної роботи трансформатора.

Постановка завдання. Метою дослідження є визначення залежності площі охолоджуючого контуру теплообмінника, що забезпечує при пожежі охолодження трансформаторного масла до температури нижче його температури спалаху від об'єму трансформаторного масла та діаметра гофрованих трубок теплообмінника.

Метод дослідження – проведення багатофакторного експерименту із урахуванням найбільш значущих чинників, що впливають на процес дослідження. Для повного факторного експерименту обиралися змінні, що впливають на зміну температури трансформаторного масла під час його проходження охолоджуючого контуру теплообмінника.

Виклад основного матеріалу. За результатами досліджень на експериментальній установці [16] встановлено, що трансформаторне масло температурою у 220 °С на вході в теплообмінник в результаті проходження крізь охолоджувальний контур на основі гофрованих труб з нержавкої сталі з заповненням водою охолоджується до температури близько до 110 °С.

Для визначення залежності площі теплообміну від об'єму трансформаторного масла, що необхідно охолодити та діаметру гофрованих трубок охолоджувального контуру, було проведено повний факторний обчислювальний експеримент.

Повний факторний експеримент найчастіше реалізується серед методів активного експерименту. При використанні повного факторного експерименту метою дослідника є отримання лінійної та неповної квадратичної статистичної моделі об'єкту, що досліджується – рівняння регресії [17].

У даній роботі для проведення повного факторного обчислювального експерименту попередньо було визначено такі характеристики: об'єм масла в трансформаторі (V) мінімальний – 200 л, максимальний – 60 000 л; діаметр трубок теплообмінника (d) мінімальний – 50 мм, максимальний – 250 мм; стандартний ряд площ теплообмінника ($м^2$) – 0,5, 1, 5, 10, 25, 50, 100, 150.

Тип регресійної залежності площі охолоджуючого контуру теплообмінника охолодження трансформаторного масла до температури нижче його температури спалаху від об'єму трансформаторного масла та діаметра гофрованих трубок теплообмінника має вигляд (1):

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1 x_2 \qquad (1)$$

де: x_1, x_2, – показники, що враховують обрані параметри;

b_0, b_1, b_2, b_3, – константи рівняння числової регресії.

Повний факторний експеримент передбачає вивчення всіх можливих комбінацій факторів і рівнів. Для визначення констант рівняння числової регресії проведено чотири чисельних експерименти за складеною для цього матрицею планування, наведеною у таблиці 1.

Так, для кожного експерименту розраховано значення площі теплообмінника ($м^2$), залежно від об'єму трансформаторного масла та діаметра гофрованих трубок теплообмінника для всіх обраних значущих параметрів, що наведено в таблиці 2.

Таблиця 1

Матриця планування повного факторного експерименту для побудови математичної моделі

№ експерименту	Показники, що враховують обрані параметри		
	x_1	x_2	x_1, x_2
1	+	+	+
2	-	+	-
3	+	-	-
4	-	-	+

Таблиця 2

Розрахункові значення площ теплообмінника

№ експерименту	1	2	3	4
Значення площі теплообмінника, м^2	104	0,99	128	4,06

Для обробки даних використовуємо регресійний аналіз щодо оцінки впливу кожного фактора та їхніх взаємодій.

Використовуючи отримані дані та формули (2), визначено константи рівняння числової регресії, що наведено у таблиці 3.

$$b_0 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} S; b_1 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} V \cdot S;$$

$$b_2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} d \cdot S; b_3 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} d \cdot V \cdot S; \qquad (2)$$

де: $N = 4$ – кількість проектних сценаріїв згідно з планом експерименту;

V (об'єм масла), d (діаметр трубок) – значення параметрів згідно з матрицею планування (Табл. 1);

S – значення площі теплообмінника (Табл. 2).

Таблиця 3

Константи рівняння числової регресії

Коефіцієнт	b0	b1	b2	b3
Значення	59,2	-6,768	56,737	-5,232

Отже, за результатами проведеного повного факторного експерименту з використанням запропонованих математичних моделей вперше встановлено, що залежність площі охолоджуючого контуру теплообмінника, що забезпечує при пожежі охолодження трансформаторного масла до температури нижче його температури спалаху від об'єму трансформаторного масла та діаметра гофрованих трубок теплообмінника має наступний вигляд (3):

$$S=736,7V+0,29d-1,7Vd-141,8 \qquad (3)$$

Означене положення уможливлює більш точне прогнозування закономірності охолодження трансформаторного масла в умовах його аварійного витоку під час пожежі, що може стати підґрунтям для методичного забезпечення для проектування ефективності системи попередження поширення пожежі на маслонаповнених трансформаторних підстанціях.

Висновки. У результаті проведеного дослідження за попередньо визначених параметрів (діаметр трубок (d), об'єм масла (V), площа теплообміну (S) було обґрунтовано оптимальні параметри теплообмінника трансформатора для ефективного охолодження масла під час пожежі.

За результатами основі проведеного повного факторного експерименту запропоновано математичну модель залежності площі охолоджуючого контуру теплообмінника, що забезпечує при пожежі охолодження трансформаторного масла до температури нижче його температури спалаху від об'єму трансформаторного масла (V) та діаметра гофрованих трубок (d) теплообмінника має вигляд:

$$S=736,7V+0,29d-1,7Vd-141,8$$

Отримана математична модель дозволить здійснювати уточнене прогнозування закономірності охолодження трансформаторного масла в теплообміннику в умовах його аварійного витоку під час пожежі і може бути реалізована для проектування ефективності системи попередження поширення пожежі на маслонаповнених трансформаторних підстанціях, здатних замінити засипку з гірських порід.

Список літератури:

1. IEC 60695-1-40:2013. Fire hazard testing. Part 1-40: Guidance for assessing the fire hazard of electrotechnical products. Insulating liquids. 2nd ed. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2013. 64 p. Мова англійська.

2. Інформаційно-аналітичні матеріали Міністерства енергетики України щодо стану пожежної та техногенної безпеки в паливно-енергетичному комплексі [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/officialcategory?cat_id=245293181. Назва з екрана: Інформаційно-аналітичні матеріали Міністерства енергетики України. Дата звернення: 24.10.2024.3. IEEE 979:2012. Guide for Substation Fire Protection. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012. 98 p. Мова англійська.

4. NFPA 850:2020. Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations. Quincy : National Fire Protection Association, 2020. 150 p. Мова англійська.

5. Guide for Transformer Fire Safety Practices [Електронний ресурс]/Working Group A2.33. Paris: CIGRE, 2013. 139 p. Режим доступу: https://static.mimaterials.com/midel/documents/sales Guide for Transformer Fire Safety Practices.pdf (дата звернення: 10.10.2023). Мова англійська.

6. Transformer Fire Protection. Facilities Instructions, Standards, and Techniques [Текст]. Denver, Colorado: Bureau of Reclamation, U.S. Department of the Interior, 2016. 64 p. Мова англійська.

7. IEC 61936-1:2021. Power installations exceeding 1 kV AC and 1.5 kV DC -- Part 1: AC. 3rd ed. [Текст]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2021. 250 p. Мова англійська.

8. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ): затверджено Міністерством енергетики України. 9-те вид. Харків : Техноцентр, 2020. 712 с.

9. Правила пожежної безпеки в компаніях, на підприємствах та в організаціях енергетичної галузі України: наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 26.09.2018 № 491 [Електронний ресурс]. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0328-19#Text. Назва з екрана: Правила пожежної безпеки в енергетичній галузі. Дата звернення: 11.04.2023.

10. Ніжник В. В., Поздєєв С. В., Жартовський С. В., Фещук Ю. Л. Оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти за критерієм теплового потоку. Міжнародний науковий журнал: Інтернаука, № 11 (73), 2019. С. 47–51.

11. Зозуля Д. В. Разработка и научное обоснование технических предложений по повышению надёжности, энергетической эффективности и продлению ресурса трансформаторов ТНЦ-1250000/330 на блоках АЭС Украины. Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля, вип. 20, 2013. С. 57-67.

12. Wu, C., Zhou, T., Chen, B., Liu, Y., & Liang, P. Experimental study on burning characteristics of the large-scale transformer oil pool fire with different extinguishing methods. Fire Technology, 57(1), 2021. P. 461-481.

13. Sun, R., Wang, J., Yang, X., & Chen, P. Experimental research on the combustion characteristics of transformer oil jet fires in oil-filled equipment under heat. ACS Omega, 6(47), 2021. P. 31843-31853.

14. Palchykov, R., Ballo, Y., Nizhnyk, V., Mykhailov, V., Gavryliuk, A., Loik, V., Synelnikov, O., Synelnikov, S., Stepanenko, V., Nuianzin, O. Substantiating the parametric temperature mode during a fire on transformers placed inside protective structures. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(10(132)), 2024. P. 37–45. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.317332.

15. Климась Р. В. Удосконалення методу прогнозування припинення та поширення горіння системою вогнеперешкодження на маслонаповнених трансформаторних підстанціях : дис. канд. техн. наук: 21.06.02 – Пожежна безпека/Львівський державний університет безпеки життєдіяльності. Львів, 2022. 250 с.

16. Іллюченко П., Ніжник В., Нікулін О., Ратушний О. Щодо розроблення експериментальної установки для зниження температури трансформаторного масла при імітації його аварійного витоку. Матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю 'Надзвичайні ситуації: безпека та захист'. Черкаси : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. С. 97-99.

17. Горбунов О. Д. Конспект лекцій з дисципліни «Інженерний експеримент» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня спеціальності 144 «Теплоенергетика» очної та заочної форм навчання. Кам'янське : ДДТУ, 2016. 42 с.

Nizhnyk V.V., Ilyuchenko P.O., Mykhailov V.M., Neseniuk L.P. JUSTIFICATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF TRANSFORMER HEAT EXCHANGER FOR OIL COOLING DURING A FIRE

The purpose of this work was to develop and conduct a full factorial experiment of the dependence of the area of the cooling circuit of the heat exchange system (hereinafter referred to as the heat exchanger) (with water coolant filling) for cooling transformer oil to a temperature below its flash point (below 150 °C) on the volume of transformer oil in the transformer housing and the diameter of the corrugated stainless steel tubes of the heat exchanger. A full factorial experiment is an effective method for studying complex relationships in the processes of fire development and suppression. The results obtained will help develop recommendations for designing the effectiveness of a fire prevention system for oil-filled electrical transformers.

Our previous studies have established the following significant factors: the minimum and maximum volume of transformer oil in the transformer; the minimum and maximum diameter of the stainless steel tubes of the heat exchanger; the values of the standard series of heat exchanger areas.

It was determined that to build a mathematical model of the temperature regime of a fire in oil-filled transformers, it is necessary to conduct a full factorial computational experiment. Four numerical experiments were conducted according to the planning matrix developed during the research.

According to the results of the study, a mathematical model of cooling transformer oil to a temperature below its flash point was obtained from the volume of transformer oil and the diameter of the corrugated stainless

steel tubes of the heat exchanger. The constants of the numerical regression equation for cooling transformer oil during passage through the cooling circuit of the heat exchanger during emergency depressurization of the transformer housing during a fire were obtained. The use of computational experiments to determine the temperature regimes of a fire under various conditions was further developed.

Key words: *full factorial experiment, temperature regime, heat exchanger parameters, transformer oil, heat exchanger, flash point, ignition temperature, transformer fire, fire barrier, gravel backfill.*

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

UDC 004.8:004.912
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/03

Bautina M.V.
Data Scientist, SoftServe

ADVANCING ENTERPRISE-SCALE INFORMATION RETRIEVAL AND COMPREHENSION USING LARGE LANGUAGE MODELS

The article analyses the implementation of natural language query processing systems for automating information retrieval in enterprises from the perspective of modern information technologies and data science. The study's relevance is determined by the need to optimize access to large volumes of data and enhance the efficiency of management processes by integrating intelligent systems for processing user queries. It has been established that such systems facilitate quick access to relevant information by interpreting natural language queries and generating structured responses. However, problems related to the contextual understanding of queries, multilingual processing, adaptation to domain-specific terminology, and maintaining performance under heavy loads have been identified.

The article aims to analyze the key issues in the operation of natural language query processing systems and develop recommendations for improving their efficiency to optimize information processes in enterprises.

Methodology. *The research is based on a systematic analysis of query processing algorithms, an evaluation of language model performance, and a comparative analysis of accuracy, completeness, and query execution time for queries of varying complexity. Risk analysis methods were used to identify key issues and build optimization models.*

Scientific novelty. *The article comprehensively analyzes the applied aspects of using language models for natural language query processing. The main system limitations have been identified, and measures have been proposed to improve response accuracy and processing speed. Special attention is given to algorithms for automatic query clarification and recommendations for adapting language models to domain-specific data.*

Conclusions. *It has been proven that implementing natural language query processing systems improves the efficiency of information retrieval, provided algorithm transparency and personalization mechanisms are ensured. Recommendations have been made for training models on domain-specific texts, implementing data aggregation algorithms, and using hybrid solutions to optimize query processing in multi-user environments.*

Key words: *artificial intelligence, machine learning, natural language query processing, information retrieval automation, language models, intelligent systems, corporate data, query clarification algorithms, multilingualism, personalization.*

A general statement of the problem and its connection with important scientific or practical tasks. The development of modern artificial intelligence and machine learning technologies opens up new opportunities for optimizing information retrieval and analyzing large amounts of data at enterprises. The increase in the amount of information circulating in corporate systems complicates the process of quick access to relevant data, which affects the efficiency of management decision-making and reduces the competitiveness of enterprises. The main problem is the need to integrate efficient natural language processing models that can not only find relevant information but also provide a deep understanding of it in the context of specific user requests. Big language models show significant potential for improving the accuracy of information retrieval, as they are able to analyze text data with respect to semantic relationships and context. However, the introduction of such technologies at enterprises is accompanied by a number of scientific and practical challenges related to adapting models to industry specifications, increasing their performance, and reducing data processing costs. The issues of ensuring the confidentiality of the information and minimizing the risks associated with the use of automated solutions remain relevant, which requires the development of reliable data protection mechanisms. Thus, the study of the possibilities of

using large language models for information retrieval and data understanding in corporate environments is an important step toward the development of innovative solutions for automating processes and increasing the productivity of enterprises.

Analysis of the latest research and publications. Analyzing works devoted to advancing information retrieval and data comprehension at enterprises using large-scale language models demonstrates diverse approaches to optimizing these processes. F. Borges and his team [1] explore approaches to interpreting natural language queries in corporate search engines, which can improve the accuracy and relevance of results. T. Brown and his colleagues [2] examine the effectiveness of few-shot learning for processing queries with a minimum number of training examples, contributing to models' greater versatility.

The BERT model, developed by J. Devlin and co-authors [3], was an important breakthrough due to its bidirectional learning, which significantly improved the understanding of queries' context.

S. Gupta and his colleagues [4] discuss in detail the use of language models to analyse the tone of texts, which opens up new opportunities for monitoring corporate communications. The study by J. Li and co-authors [5] focuses on using deep learning for entity recognition, which helps improve search accuracy.

P. Liu, X. Qiu, and X. Huang [6] propose recurrent neural network algorithms for multitasking text processing, which provide efficiency in processing large amounts of data. C. Montgomery and his team [7] presented an approach to building systems capable of processing natural language queries during peak loads.

C. Raffel and his co-authors [8] investigated the possibilities of transfer learning for generating answers to complex multifactorial queries, which allows for significantly improved results. I.H. Sarker [9] analyzes practical algorithms for search optimization aimed at reducing model bias in detail.

The work of sun c. And his team [10] focuses on tuning bert models for classifying natural language queries in complex databases. Y. Wang and colleagues [11] consider the integration of large language models for medical data transformation, which contributes to the performance of information systems.

The study by a. Wong and co-authors [12] describes methods for automating data retrieval in corporate systems using nlp algorithms. Xlnet, presented by Z. Yang [13], efficiently considers the dependencies between query elements to generate accurate answers. Finally, L. Yu and others [14] highlight the experience of implementing language models to work with large corporate systems using closed databases.

Thus, research shows that large language models can significantly improve search efficiency in corporate environments. However, improving algorithms to ensure high accuracy, speed, and context support for queries is important. Despite significant advances in natural language query processing, the issues of building complex SQL/No-SQL queries with multi-level logical structures remain unresolved, which limits search accuracy and information access efficiency. The adaptation of language models to highly specialized vocabulary and multilingual queries has not been sufficiently studied, which reduces the effectiveness of systems in multilingual corporate environments.

An important challenge remains to ensure the transparency of algorithms and minimize algorithmic bias, which reduces user confidence in automated systems. Existing algorithms for contextual query refinement are not always able to correct errors without losing meaning, which affects the quality of answers. The proposed research aims to address these gaps by developing flexible algorithms for processing complex queries, training models on highly specialized texts, and implementing algorithm auditing methods to increase the transparency of systems. This will improve the accuracy of query processing, support multilingualism, and create an effective information environment to support management decision-making.

The article aims to study the possibilities of using large language models to automate information retrieval at enterprises by building chatbots capable of converting natural language queries into database query language commands, performing data analysis, and providing users with structured answers instead of raw data.

Objectives of the article:

1. To study methods of automating information retrieval at enterprises using large-scale language models and their role in optimizing business processes, including integration with relational and non-relational databases.

2. Describe a chatbot algorithm for transforming natural language queries into SQL/NoSQL queries, processing data, and generating answers, supplemented with a conceptual diagram.

3. Analyse the problems of developing and implementing such systems, including the limitations of language models, query accuracy, and response quality, and offer recommendations for improvement.

Summary of the main material. Modern methods of automating information retrieval at enterprises have been significantly transformed due to the introduction of advanced technologies, particularly large language models. These models, built based on artificial intelligence, can significantly simplify obtaining, analyzing, and presenting data to users. They provide an understanding of natural language queries and transform them into structures suitable for database execution. This opens up new business opportunities where information retrieval is the basis for making effective decisions. Using such systems helps optimize business processes, reduce the time spent on manual data analysis and increase the accuracy of the information received (Table 1).

The application of these methods in modern conditions demonstrates their practical significance. For example, a system based on SQL generation through NLP can be used to automate the creation of sales reports. A manager enters a query such as "Show sales for the last quarter in region X," after which the system generates a corresponding SQL query, retrieves data from the database, structures it, and presents it as a graph or table. At the same time, integration with No-SQL databases is indispensable for companies that work with large amounts of unstructured information, such as analysing customer feedback or system logs.

Practical cases also demonstrate the benefits of chatbots, which, using large language models, provide quick access to data. For example, a chatbot can promptly provide an HR employee with information on the number of open vacancies by transforming a natural language query into a structured response. The real-time analytics provided by such systems allow you to track changes in business processes, which is critical for risk management.

Thus, modern methods of automating information retrieval, with the help of large language models, simplify the process of working with data and increase the efficiency of business processes by adapting information systems to the needs of the modern dynamic environment.

Language models, such as GPT, BERT, and their analogs, have revolutionized natural language processing, providing high accuracy in analyzing and understanding natural language queries. The basic principle of such models is using transformers that allow one to consider the context of words in the query, analyze their relationships, and provide accurate interpretation. This makes them extremely useful for automating processing information requests in a business environment. Integration of language models with databases adds even more capabilities for enterprises, allowing them to combine the simplicity of natural language with the power of querying complex structured and unstructured databases (Table 2).

Modern language models in business practice allow for solving complex information retrieval tasks. For example, GPT can be used to automate processes in financial institutions. A customer enters a query: "What is the account balance for the last month?" The model interprets the query, generates an SQL query to the database, extracts information, and provides a structured answer.

BERT, in turn, can help classify a large number of requests. For example, in the customer support department, it automatically categorises queries into "technical issue," "financial issue 2," or "general query" and then redirects them to the appropriate specialist.

OpenAI Codex is an indispensable tool for developing automated reports. For example, in a logistics company, a Codex-based system automatically generates SQL queries to monitor the status of transportation, significantly reducing the time spent on data analysis.

Table 1

Modern methods of automating information retrieval at enterprises and their application

Method	How it works	Application in practice
Using SQL generation through NLP	The model recognises a natural language query, transforms it into a SQL query, and searches a structured database.	Automation of internal analytical processes, creation of dashboards for management.
Integration with No-SQL databases	The query adapts to No-SQL databases and works with unstructured data (documents, graphs, etc.).	Work with complex data such as reports, system logs, and multi-layered documents.
Using chatbots based on LLM	The user enters a query, the chatbot processes it, extracts data from the database, analyses it, and provides a clear answer.	Customer support, automation of repetitive tasks in commercial organisations.
Integration of real-time analytics	Models work with data streams and analyse them in real time.	Operations monitoring, risk management, real-time business process analytics.

Source: compiled by the author on the basis of [2; 5; 11; 12; 14]

Table 2

Principles of Operation of Language Models and Their Integration with Relational and Non-Relational Databases

Model	How requests are processed	Integration with databases
GPT	It uses an autoencoder to generate text in response to a query, which is capable of understanding the context.	Integrates via API to create SQL queries or analyse text data.
BERT	It uses bidirectional text analysis, taking into account the context on both sides of the query.	It is used to classify queries and build accurate search indexes.
OpenAI Codex	It is focused on generating program code, including SQL queries.	It is used to create complex queries to SQL/ No-SQL databases.
Tuned language models	They adapt to the specifics of the domain and analyse requests based on industry specifics.	Ensure high accuracy when working with industry databases.

Source: compiled by the author on the basis of [1; 4; 6; 9; 13]

The practical application of tuned models is especially noticeable in medical institutions where specific terms and contexts require high accuracy. For example, an adapted language model can be used to search for information in large medical research databases based on natural language queries from doctors.

Thus, integrating language models with databases provides an effective mechanism for working with large amounts of information, automating routine tasks, and improving the quality of customer service in various fields.

Chatbots for natural language query processing automate data access by converting user text into structured SQL or No-SQL queries and generating answers in an understandable format. Such systems consist of several key modules that ensure consistent operation: the natural language processing module identifies the essence and intent of the user's query, the query generator forms a SQL or No-SQL query depending on the type of database, the query execution module sends the query to the database to obtain results, and the result processing module converts the received data into a response that is understandable to the user. The algorithm works in stages: After the user enters the text, the system performs its semantic analysis, highlighting key parameters, generates a query to search for data, and returns a structured response after execution. In practical terms, such a system provides quick access to data, automatically processing even complex queries. Figure 1 shows the sequence of interaction between the main components of the algorithm, illustrating the key stages of information processing and data transfer between modules.

The natural language query processing algorithm starts with the user entering text. The natural language processing module analyses the text to identify key entities and query intentions. The identified parameters are passed to the query generator, which generates a structured SQL or No-SQL query depending on the specifics of the database. The query is sent to the database, where the information is searched, and the results are sent to the processing module. This module converts the data into a user-friendly format and returns the answer, for example, as a table, text message, or graphical display.

To test the chatbot's efficiency, a research experiment was conducted to assess the accuracy and speed of processing natural language queries when interacting with a database of scientific publications. The experiment aimed to determine whether the system could correctly form SQL and No-SQL queries and provide answers in a structured and clear format. The experiment was conducted under standard conditions of access to a database with real-time scientific articles and reports. Three types of queries were tested: simple queries with one parameter, queries of medium complexity with several conditions, and complex queries with typos and incomplete phrases.

Simple queries included searching for data by year of publication or the author's name. Medium-complexity queries contained several criteria, such as "show all articles on neural networks in the last three years." Complex queries with errors involved entering incomplete queries or words with typographical errors, such as "publications instead of publication." For each query type, the processing time, response accuracy, and data completeness were recorded to assess how the algorithm responds to both correct and incorrect wording.

Table 3 presents the results of testing the effectiveness of the natural language query processing algorithm.

The accuracy metric was calculated as the percentage of correctly generated responses divided by the total number of requests for a specific query type. The formula used for this calculation was:

$$\text{Accuracy}(\%) = \frac{(\text{Number of correct responses})}{(\text{Total requests})} * 100\% \quad (1)$$

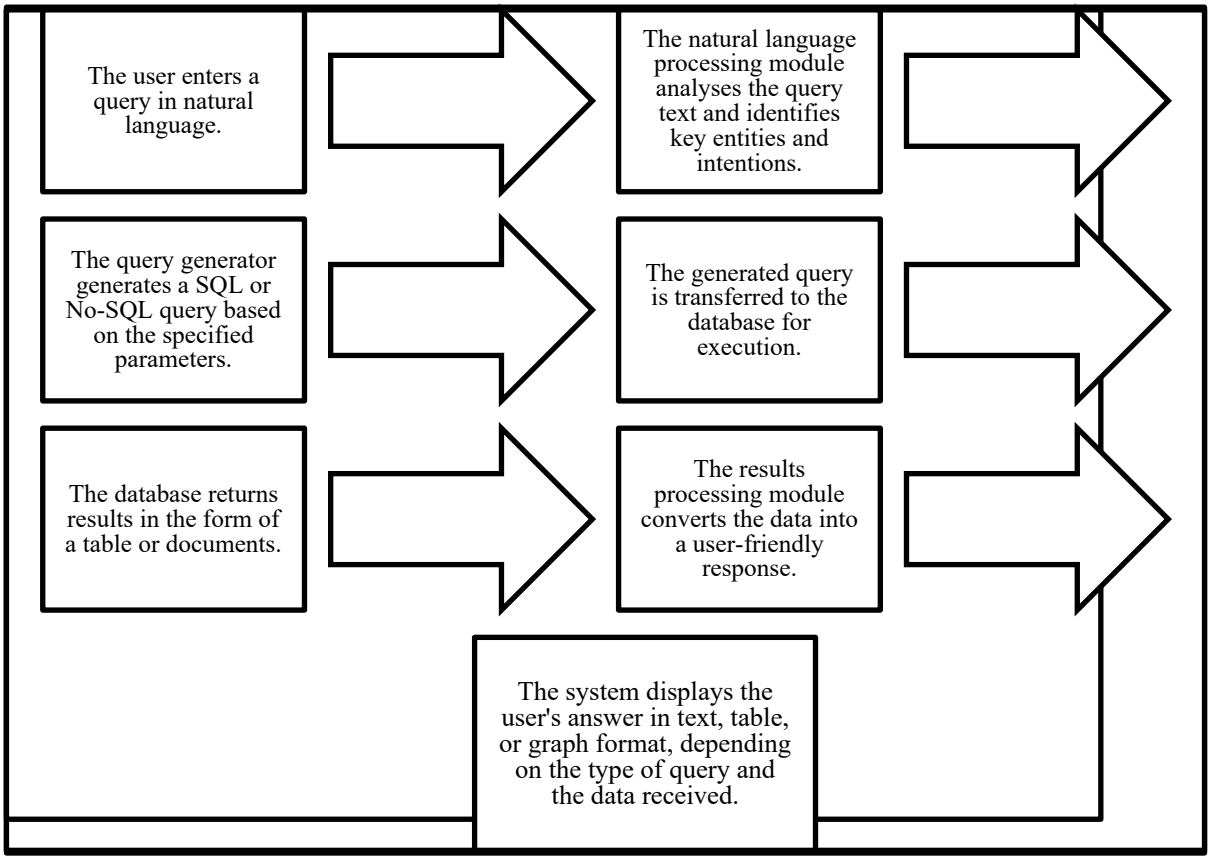


Fig. 1. The sequence of the query transformation algorithm

Source: author's development

Table 3

Results of testing the effectiveness of the natural language query processing algorithm

Request type	Number of requests	Accuracy, %	Completeness, %	Processing time, s
Simple query with one parameter	20	97	96	0,7
Medium complexity request	20	93	90	1,1
Request with errors or incomplete wording	10	82	78	1,6

Source: author's development

For example, if 19 out of 20 simple queries returned correct results, the accuracy would be:

$$\text{Accuracy} = \frac{19}{20} * 100\% = 95\%$$

Completeness measured the proportion of retrieved data relative to the total expected data. It was calculated as follows:

$$\text{Completeness}(\%) = \frac{\text{Amount of retrieved data}}{\text{Total expected data}} * 100\% \quad (2)$$

For instance, if a medium-complexity query retrieved 45 out of 50 expected records, the completeness would be:

$$\text{Completeness}(\%) = \frac{45}{50} * 100\% = 90\%$$

Processing time, reflecting the average time taken to process each query type, was calculated as:

$$\text{Processing Time}(\text{s}) = \frac{\text{Total processing time for all requests}}{\text{Number of request}} \quad (3)$$

The experiment results showed that the natural language query processing system algorithm demonstrates high accuracy when executing simple queries with clearly defined parameters. However, when processing complex queries containing numerous conditions, logical operators, and filters, a decrease in accuracy, increased processing time, and a complication in generating a relevant answer was observed. These results indicate several problems related to the functioning of language models, the optimization of computing processes, and the

system's ability to interpret contextual relationships between query elements.

One of the main problems is the limitation of language models used for query analysis. Most modern models are trained on large publicly available corpora of texts, which often do not take into account the specifics of individual fields of knowledge and professional terminology [3]. This leads to difficulties in understanding highly specialized vocabulary and complex syntactic constructions. It is especially problematic to process ambiguous words and terms with different meanings depending on the context. In scientific and corporate environments, this problem manifests when forming queries containing specific abbreviations, scientific terms, or multi-component constructions. As a result, the system can incorrectly identify query entities and incorrectly form SQL or No-SQL queries, significantly reducing the answer's accuracy.

The problem of contextual understanding is also a key factor affecting system performance. Natural language processing algorithms try to identify key entities and parameters. However, when processing polysemous words or queries with multiple logical conditions, the system may lose the connection between individual query elements [6]. This leads to errors in query generation and irrelevant results. Such situations are typical for queries with time frames, numeric values, and comparison operators that require processing complex logical dependencies. For example, a query such as "Show all project progress reports for the last three years that have been approved but do not contain budget changes" may be misinterpreted if the system cannot combine all parameters in the correct order.

Another important issue is the quality of the answer that the system returns to the user. In many cases, the result of query processing is presented in the form of a large amount of data, which makes it difficult to perceive information and inconvenient to search for key results. For example, a query about financial indicators for a certain period may return a large amount of data without aggregation, forcing the user to analyze each record independently [9]. This reduces system efficiency and increases decision-making time. Thus, it is necessary to implement mechanisms that allow filtering and aggregating data so that the response contains only the key information relevant to the user's request.

Computing resource limitations also significantly affect system performance, especially when processing many simultaneous requests. In systems with large amounts of data, query processing time can increase during peak load, which creates delays in generating a response. This is critical for businesses where timely access to data is a key factor in successful operations, such as financial services and monitoring systems. Delays can slow down decision-making processes and increase the risk of errors due to untimely data updates.

Another problem is the system's resistance to incorrect or incomplete queries. Users may make typos, enter incomplete wording, or use non-standard language constructions. The absence of contextual clarification algorithms means the system may return false results or provide no answer. This reduces user confidence in the system and may limit its use in critical tasks. Therefore, it is necessary to integrate algorithms that can automatically correct typos, offer refined query options, or generate queries based on the analysis of previous requests.

Support for multilingualism also remains an important task for system improvement. Most language models are optimised for the English language, which limits the system's effectiveness in multilingual environments [11]. To process queries in other languages, additional training of models on relevant corpora of texts that take into account language and cultural peculiarities is required. This will ensure the accuracy of query processing in different languages and avoid errors in recognizing grammatical structures or words with multiple meanings.

To improve chatbot performance in the context of automating information retrieval, it is recommended that comprehensive measures be implemented, including adapting language models to specific industry needs by training on corporate texts and documents. This will allow the system to process highly specialized queries more efficiently and improve the accuracy of identifying key entities. An important step is introducing refinement and contextual analysis algorithms that can correct typos and generate query refinement options. It is advisable to use hybrid solutions that combine relational databases with caching and distributed data storage systems to accelerate query processing. This will optimize system performance even in high load conditions. Filtering mechanisms and automatic aggregation of results will help create clear and concise answers that provide users access to key information without overloading them with unnecessary data.

Personalized chatbot algorithms allow you to adapt their functions to individual user needs, considering the history of requests and generating suggestions based on typical search scenarios. This improves the system's usability and speeds up access to the necessary data. The prospects for the use of such chatbots

cover various industries: in the financial sector, they speed up the creation of analytical reports and simplify access to key indicators; in the logistics sector, they facilitate the tracking and management of operations; in educational institutions, they provide quick access to educational materials and research results. In the long term, such systems will contribute to creating an automated information environment that ensures efficient interaction with large amounts of data and optimization of internal processes at enterprises.

Conclusions. It has been established that using language models in natural language query processing systems increases the efficiency of information retrieval automation but is accompanied by several limitations. The main problems are insufficient contextual understanding of complex queries, limited adaptation to highly specialized vocabulary, difficulties with multilingualism, and increased processing time under high load. The system can also generate large amounts of irrelevant data, which makes it difficult for the user to get a clear answer. To address these shortcomings, we propose additional training of models on industry texts, algorithms for contextual query refinement, and hybrid caching and filtering systems to optimize data processing. Introducing personalised algorithms will allow the history of queries to be considered to generate more accurate answers.

Further research should focus on providing multilingual support, developing mechanisms for algorithmic transparency and user confidence, and improving the system to adapt answers to the query context. These measures will create an effective information environment for making management decisions based on accurate data.

Bibliography:

1. Query Understanding for Natural Language Enterprise Search / F. Borges et al. *arXiv preprint*. 2020. Available at: https://arxiv.org/abs/2012.06238 (date of access: 10.01.2025).

2. Language Models are Few-Shot Learners / T. Brown et al. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2020. Vol. 33. P. 1877-1901. Available at: https://proceedings.neurips.cc/paper/2020/hash/1457c0d6bfcb4967418bfb8ac142f64a-Abstract.html (date of access: 10.01.2025).

3. Devlin J., Chang M.W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. *arXiv preprint*. 2018. Available at: https://arxiv.org/abs/1810.04805 (date of access: 10.01.2025).

4. Gupta S., Singh A., Kumar V. Emoji, Text, and Sentiment Polarity Detection Using Natural Language Processing. *Information*. 2023. Vol. 14, no. 4. P. 222. URL: https://doi.org/10.3390/info14040222 (date of access: 12.01.2025).

5. A Survey on Deep Learning for Named Entity Recognition / J. Li et al. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2020. P. 1. URL: https://doi.org/10.1109/tkde.2020.2981314 (date of access: 12.01.2025).

6. Liu P., Qiu X., Huang X. Recurrent Neural Network for Text Classification with Multi-Task Learning. *arXiv preprint*. 2016. Available at: https://arxiv.org/abs/1605.05101 (date of access: 10.01.2025).

7. Montgomery C., Isah H., Zulkernine F. Towards a Natural Language Query Processing System. *2020 1st International Conference on Big Data Analytics and Practices (IBDAP)*, Bangkok, Thailand, 25–26 September 2020. 2020. URL: https://doi.org/10.1109/ibdap50342.2020.9245462 (date of access: 12.01.2025).

8. Exploring the Limits of Transfer Learning with a Unified Text-to-Text Transformer / C. Raffel et al. *Journal of Machine Learning Research*. 2020. Vol. 21, No. 140. P. 1-67. Available at: https://www.jmlr.org/papers/v21/20-074.html (date of access: 10.01.2025).

9. Sarker I. H. Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions. *SN Computer Science*. 2021. Vol. 2, no. 3. URL: https://doi.org/10.1007/s42979-021-00592-x (date of access: 12.01.2025).

10. How to Fine-Tune BERT for Text Classification? / C. Sun et al. *Lecture Notes in Computer Science*. Cham, 2019. P. 194–206. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-32381-3_16 (date of access: 12.01.2025).

11. An integrated big data analytics-enabled transformation model: Application to health care / Y. Wang et al. *Information & Management*. 2018. Vol. 55, no. 1. P. 64–79. URL: https://doi.org/10.1016/j.im.2017.04.001 (date of access: 12.01.2025).

12. A Survey of Natural Language Processing Implementation for Data Query Systems / A. Wong et al. *2021 IEEE International Conference on Recent Advances in Systems Science and Engineering (RASSE)*, Shanghai, China, 12–14 December 2021. 2021. URL: https://doi.org/10.1109/rasse53195.2021.9686815 (date of access: 12.01.2025).

13. Yang Z., Dai Z., Yang Y., Carbonell J., Salakhutdinov R., Le Q.V. XLNet: Generalised Autoregressive Pretraining for Language Understanding. *arXiv preprint*. 2019. Available at: https://arxiv.org/abs/1906.08237 (date of access: 10.01.2025).

14. Experience with Large Language Model Applications for Information Retrieval from Enterprise Proprietary Data / L. Yu et al. *Lecture Notes in Computer Science*. Cham, 2024. P. 92–107. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-78386-9_7 (date of access: 12.01.2025).

Баутіна М.В. АВАНСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ПОШУКУ ТА ОСМИСЛЕННЯ ДАНИХ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ЗА ДОПОМОГОЮ ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ

У статті проаналізовано впровадження систем обробки природномовних запитів для автоматизації інформаційного пошуку на підприємствах з позиції сучасних інформаційних технологій та науки про дані. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю оптимізації доступу до великих обсягів даних і підвищення ефективності управлінських процесів шляхом впровадження інтелектуальних систем для обробки запитів користувачів. Встановлено, що такі системи сприяють швидкому доступу до релевантної інформації завдяки інтерпретації природномовних запитів і формуванню структурованих відповідей. Разом із тим, виявлено проблеми, пов'язані з контекстуальним розумінням запитів, обробкою багатомовних запитів, адаптацією до вузькоспеціалізованої лексики та забезпеченням продуктивності при високих навантаженнях.

Метою статті є аналіз ключових проблем роботи систем обробки природномовних запитів та розробка рекомендацій щодо підвищення їхньої ефективності для оптимізації інформаційних процесів на підприємствах.

Методологія. Дослідження проведено на основі системного аналізу алгоритмів обробки запитів, оцінювання ефективності роботи мовних моделей та порівняльного аналізу показників точності, повноти та часу виконання запитів різного рівня складності. Використано методи аналізу ризиків для виявлення ключових проблем і побудови моделей оптимізації.

Наукова новизна. У статті представлено комплексний аналіз прикладних аспектів використання мовних моделей для обробки природномовних запитів. Виявлено основні обмеження системи та запропоновано заходи для підвищення точності відповідей і швидкості обробки. Окрему увагу приділено алгоритмам автоматичного уточнення запитів та рекомендаціям щодо адаптації мовних моделей до галузевих даних.

Висновки. Доведено, що впровадження систем обробки природномовних запитів сприяє підвищенню ефективності інформаційного пошуку за умови забезпечення прозорості алгоритмів та впровадження механізмів персоналізації. Запропоновано рекомендації щодо навчання моделей на вузькоспеціалізованих текстах, впровадження алгоритмів автоматичної агрегації даних та використання гібридних рішень для оптимізації обробки запитів у багатокористувацьких середовищах.

Ключові слова: *штучний інтелект, машинне навчання, обробка природномовних запитів, автоматизація інформаційного пошуку, мовні моделі, інтелектуальні системи, корпоративні дані, алгоритми уточнення, багатомовність, персоналізація.*

УДК 004.4
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/04

Боровльова С.Ю.
Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Гончаров Д.С.
Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Горбань Г.В.
Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Кандиба І.О.
Чорноморський національний університет імені Петра Могили

ВИЯВЛЕННЯ ОСВІТНІХ ВТРАТ ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗАСОБАМИ МОВИ ПРОГРАМУВАННЯ PYTHON

У статті представлено дослідження інструментарію реалізації аналізу успішності здобувачів закладу вищої освіти з метою визначення освітніх втрат. Досліджено публікації, присвячені питанням якості вищої освіти в надзвичайних умовах та впливу воєнного стану на зростання освітніх втрат. Окрім того, проведено аналіз сучасних систем дистанційної освіти для визначення можливості використання додаткових засобів їх аналізу. Розглянуто можливість застосування вбудованих програмних інтерфейсів (application programming interface, API) та засобів вебскрейпінгу для обробки журналів успішності здобувачів. Запропоновано використання мови програмування Python для аналізу журналів успішності здобувачів та їх подальшої обробки. Досліджено особливості доступу до журналу оцінок в системі Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment (MOODLE), що однією з найбільш розповсюджених навчальних платформ у світі. Наведено опис особливостей реалізації обробки оцінок в зазначеній платформі з використанням вебскрейпінгу та експорту отриманих даних успішності здобувачів. Представлено метод формування набору даних на основі отриманої інформації про успішність для подальшої обробки спеціалізованим інструментарієм. Досліджено можливість використання інструментарію Pandas, Numpy, Matplotlib для проведення первинного статистичного аналізу успішності здобувачів та виявлення зниження цієї успішності, що може свідчити про наявність освітніх втрат. Наведено приклад побудови кореляційних матриць успішності здобувачів на різних дисциплінах засобами Pandas та Seaborn з метою пошуку освітніх втрат у взаємопов'язаних навчальних дисциплінах. Описано метод відображення кореляційної матриці засобами Seaborn. Запропоновано використання інструментарію Matplotlib для більш детального дослідження взаємозв'язку успішності здобувачів на різних дисциплінах. Розглянуто можливість доповнення запропонованого програмного забезпечення інструментарієм штучного інтелекту, що дозволить передбачати можливі освітні втрати засновуючись на аналізі поточної успішності.

Ключові слова: *освітні втрати, статистичний аналіз, Python, Pandas, Matplotlib, Seaborn.*

Постановка проблеми. Карантин викликаний пандемією COVID-19, повітряні тривоги, тимчасова окупація частини територій, проблеми з електропостачанням та інтернет-з'єднанням, переміщення частини населення України призводять до погіршення якості навчання [1, с. 81]. Помітною стає проблема освітніх втрат, що, в свою чергу, негативно впливає на соціально-економічний розвиток держави та призводять до зниження ВВП впродовж наступних десятиліть [2, с. 7]. Освітні втрати визначаються як прогалини у знаннях і навичках, які виникають в здобувачів освіти під час освітнього процесу у порівнянні зі очікуваними результатами навчальних здобутків.

Проблема виявлення та компенсації освітні втрати є актуальною не лише для України, а й для навчальних закладів різного рівня освіти всього світу [3, с. 602]. Своєчасне виявлення освітніх втрат дозволяє скорегувати навчальний процес та усунути зазначену проблему. Сам процес виявлення цих втрат в сучасному світі базується на оцінюванні рівня знань здобувачів. У більшості випадків цей процес не є частиною навчальної програми та вимагає від викладачів додаткової витрати часу на розробку та впровадження

завдання націлених на визначення освітніх втрат. Окрім того відсутність можливості проведення очних занять та навіть доступу до навчальних закладів часто обмежують або зовсім унеможливлюють процес визначення вказаних втрат.

Проте в сьогоденні активно використовується електронні журнали успішності здобувачів, що містять дані про поточну успішність. Цей тип журналів інтегрується з системами дистанційної освіти та оновлюється динамічно. Своєчасне оновлення оцінок в зазначених журналах та їх аналіз може сприяти завчасному виявленню і компенсації освітніх втрат.

Отже актуальним є розробка інструментарію, що дозволить аналізувати поточну успішність та визначати загальні освітні втрати здобувачів освіти на основі проведеного аналізу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження [1] присвячене питання якості вищої освіти в надзвичайних умовах. Авторами розглянуто кілька актуальних питань в цій галузі: реалізація цифрової освіти, проблема освітніх втрат у вищій освіті, еволюція цифрових технологій в освітньому процесі та подальші преспективи цифровізації освіти. Особливу увагу автори приділлять взаємозв'язку дистанційного навчання та зростанню освітніх втрат. Проте питанню питання розробки та використання інструментів визначення зазначених втрат у галузі цифровізації освіти потребує подальшого дослідження.

Актуальним напрямком досліджень є вплив воєнного стану на зростання освітні втрати. В роботі [2] наведено основні питання зазначеного напрямку дослідження, а саме: особливості діагностування освітніх втрат та методи їх компенсації під час воєнного стану. Авторами ґрунтовно досліджено вплив цих втрат на подальший соціально-економічний розвиток країни та прогнозоване зниження ВВП через зменшення кількості фахових кадрів. У той же час питання використання засобів автоматизованого визначення освітніх втрат потребує подальшого дослідження.

Освітні втрати виникають не лише під час воєнного стану. Вперше проблемою всесвітнього масштабу освітні втрати стали під час пандемії COVID-19. В роботі [3] автори проводять дослідження освітніх втрат викликаних саме пандемією та можливості їх виявлення. Наведені дослідження дозволили систематизувати виявлені навчальні втрати та виявити взаємозв'язок між тенденцією до збільшення цих втрат в певних вікових групах. Проте авторами приділяється недостатня увага інструментарію виявлення навчальних втрат, а саме можливості застосування систем дистанційного навчання.

Робота [4] присвячена дослідженню ролі технологічних засобів у діагностування освітніх втрат здобувачів загальної середньої освіти. Описано загальний негативний вплив наявності зазначених втрат саме в галзі загальної середньої освіти. Наведено опис можливості застосування окремих спеціалізованих платформ діагностування освітніх втрат. Незважаючи на ґрунтовний підхід до дослідження питання інтеграції інструментарію діагностування навчальних втрат з системами дистанційного навчання залишається відкритим.

Постановка завдання. Метою цього дослідження є розробка програмного забезпечення для аналіз поточної успішності здобувачів освіти та виявлення освітніх втрат на ранніх стадіях. Розробка такого програмного забезпечення дозволить вчасно виявити освітні втрати та скорегувати курс навчання або ж навчальну програму для їх компенсації.

Для досягнення зазначеної мети поставлені такі завдання:

– аналіз сучасниз засобів оцінювання здобувачів у системах дистанційного навчання;

– дослідження засобів аналізу даних для обробки оцінок здобувачів;

– розробка ПЗ для аналізу успішності здобувачів.

Виклад основного матеріалу. Навчальний процес здобувачів освіти різних рівнів значно ускладнився під час пандемії COVID-19 та воєнного стану. Відсутність можливості проведення аудиторних занять призвела до масового впровадження інструментарію дистанційної освіти. Незважаючи на всі технічні можливості сучасні дослідження показують зростання освітніх втрат при реалізації дистанційної освіти [1, с. 83].

Важливим фактором компенсації освітніх втрат є вчасне їх виявлення. В сьогоденні основним інструментом діагностування зазначених втрат є проведення додаткового контролю: написання контрольних робіт, проведення опитування та тестування. Проте зазначені види робіт потребують додаткових витрат часу на створення та проведення. У той же час системи дистанційного навчання підтримують поточне оцінювання та різні варіації журналів успішності [5, с. 19], своєчасний аналіз яких може допомогти виявити освітні втрати без проведення додаткового контролю.

Занзначений аналіз можна виконати пясля обробки журналів успішності в системах дис-

танційної освіти. Ці журнали мають різний функціонал, але у більшості випадків підтримують можливість перегляду з допомогою вебінтерфейсу, що, в свою чергу, забезпечує можливість їх обробки засобами вебскрейпінгу [6, с. 25] або за допомогою вбудованих прогамних інтерфейсів (application programming interface, API).

Вебскрейпінг використовується для отримання інформації з вебсторінок, які призначені для перегляду людиною за допомогою браузера. Цей підхід використовується у разі відсутності API або можливості експорту журналу у вигляді електронної таблиці csv або xls. Виконання вебскрейпінгу є першим кроком для розробки програмного забезпечення (ПЗ) аналізу для аналіз поточної успішності здобувачів освіти.

Реалізація вебскрейпінгу потребує застосування мови загального призначення, що підтримує можливість підключення засобів аналізу даних. У наш час існує багато мов загального призначення з підтримкою технологій вебскрейпінгу та аналізу даних, але варто виділити Python. Ця мова програмування має цілий ряд переваг при розробці ПЗ пов'язаного з аналізом даних: наявність великої кількості бібліотек для обробки даних (Pandas, Matplotlib, Seaborn тощо) [7], підтримка засобів машинного навчання, гнучкість та універсальність на всіх етапах аналізу даних, а саме наявність можливості отримання даних з різних джерел (файлів, баз даних, вебсайтів тощо) та можливість відобразити результат аналізу графічно наприклад за допомогою вебфреймворку Django або зберегти його у файл.

Python має обширний інструментарій для роботи з вебскрейпінгом, для підключення доступні наступні бібліотеки: Scrapy, Selenium, lxml, Pyppeteer, Requests та BeautifulSoup тощо. Перелічені інструменти зазвичай не використовуються окремо, а комбінуються, наприклад для отримання даних з електронного журналу у системі дистанційного навчання MOODLE необхідне створення сесії з даними користувача для авторизації, що можливо засобами бібліотеки для створення HTTP/HTTPS запитів Requests та обробити отриману відповідь у представленні HTML можливо BeautifulSoup.

Використовуючи згаданий вище інструментарій можливо отримати доступ до більшості журналів систем дистанційного навчання. Першим кроком для цього є використати бібліотеки Requests, що дозволить взаємодіяти з наявними API систем дистанційного навчання або отримати HTML код для подальшої обробки у разі відсутності API. Requests найбільш розповсюдженою бібліотекою Python для виконання HTTP-запитів з підтримкою створення сесій для реалізації процесу авторизації та обробкою JSON, що може бути використаний для завантаження даних [8, с. 547]. Виконання авторизації, як вже згадувалось вище, можливе за допомогою створення екземпляру об'єкту requests.Session, який реалізує механізм зберігання інформації про користувача та дозволяє виконувати запити без повторної авторизації у системи дистанційного навчання.

Подальша взаємодія з системою дистанційного навчання може здійснюватися також засобами Requests за наявності API або при використанні спеціалізованих засобів обробки коду HTML, наприклад BeautifulSoup [6, с. 25]. Ці засоби дозволяють обробляти вхідний код використовуючи механізми пошуку та розпізнавання тегів, атрибутів, класів та даних в середині коду розмітки HTML.

При обробці електронних журналів систем дистанційного навчання BeautifulSoup дозволяє обробити інформацію, що знаходиться в середині тегів <tr>, що є представленням рядку в середині таблиці (журналу успішності) з оцінками здобувача освіти. Для цього варто використати метод findAll: BeautifulSoup.findAll('tr', class_='userrow'), де першим аргументом виступає тег для пошуку, а другим клас до якого належить цей елемент. Результатом виконання наведеного коду буде список рядків з даними здобувачів, що може бути містити в собі інші елементами, наприклад посилання на профіль здобувача, загальну оцінку та оцінки по окремими роботам. Обробити результат виконання BeautifulSoup.findAll( ) можливо шляхом використання для пошуку вкладених тегів BeautifulSoup.find( ) та вилучення списку даних BeautifulSoup.find( ).contents.

З отриманої таким чином інформації можливо сформувати набір даних для аналізу. Мова програмування Python підтримує різний інструментарій для обробки отриманого набору даних: Pandas, Numpy, Matplotlib тощо [9, с. 116]. Перелічені бібліотеки дозволяють створити та обробити спеціалізовані об'єкти наборів даних. Прикладом класу такого об'єкту є DataFrame, що дозволяє зберігати числові дані та опис їх окремих ознак.

У контексті визначення навчальних втрат проведення первинного статистичного аналізу дозволяє виявити різницю між у спішністю здобувачів на різних дисциплінах. Враховуючи, що у ЗВО дисципліни взаємопов'язані та базуються на попередніх курсах проводячи статистичний ана-

ліз успішності певної дисципліни можливо виявити освітні втрати здобувачів у дисциплінах на яких вони базуються. Наприклад, за освітньо-професійною програмою 2019 року вступу кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили дисципліна: «Інформаційні технології OLTP OLAP і Datamining на серверній платформі» (IT OLTP OLAP і DM) базується на дисциплінах «Інтелектуальний аналіз даних» та «Організація баз даних» (рис. 1).

Набір даних поточної успішності здобувачів завантажений у об'єкт DataFrame можливо опрацювати методом describe(). Згаданий метод призначений для реалізації первинного статистичного аналізу та виконує розрахунок наступних показників: мінімальне (min), максимальне(max) та середнє значення (mean), кількість ненульових елементів (count), перший (75%), другий (50%) та третій (75%) квартилі.

Отже провівши статистичний аналіз дисципліни «Інформаційні технології OLTP OLAP і Datamining на серверній платформі» можна визначити середній бал здобувачів (рис. 2). Отримані результати відображатють середній бал здобувачів 73.77, що за національною шкалою задовільно і вказує на наявність освітніх втрат більшості здобувачів.

Точніше визначити дисципліну в якій здобувачі мають освітні втрати можливо провівши статистичний аналіз дисциплін на яких базується поточна. Для дисципліни «Інформаційні технології OLTP OLAP і Datamining на серверній платформі» базовими є: «Інтелектуальний аналіз

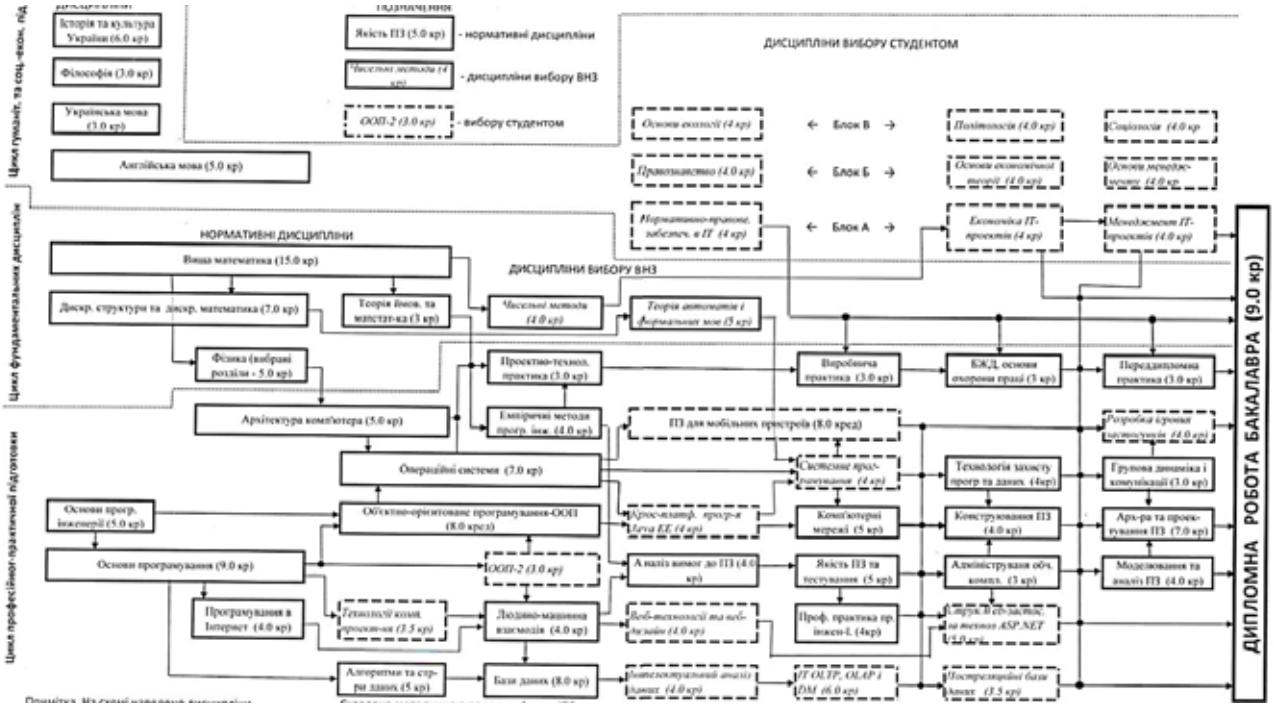


Рис. 1. Структурно-логічна схема навчального плану спеціальності 121 інженерія програмного забезпечення

```
Інформаційні технології OLTP OLAP і Datamining на серверній платформі
--------------------
count     26.000000
mean      73.769231
std       10.187473
min       60.000000
25%       67.250000
50%       72.500000
75%       77.500000
max      100.000000
Name: Інформаційні технології OLTP OLAP і Datamining на серверній платформі, dtype: float64
```

Рис. 2. Відображення результатів первинного статистичного аналізу оцінок здобувачів засобами Pandas

даних» та «Організація баз даних». Отже для кожної з дисциплін необхідно провести статистичний аналіз (рис. 3).

Отриманий результат статистичного аналізу (рис. 3) демонструє, що на при вивченні дисципліни «Організація баз даних» середній бал був 80, а при вивченні «Інтелектуального аналізу даних» цей показник впав до 74, що вказує на наявність певних втрат в цій дисципліні.

Проведення статистичного аналізу кожної дисципліни та порівняння отриманих результатів трудоємкий процес. Зручною заміною може стати графічне зображення отриманих результатів за допомогою гістограм. Гістограма представляє собою відображення розподілу числових ознак певних характеристик, у контексті визначення освітніх втрат характеристиками виступають оцінки здобувачів.

Використовуючи мову загального призначення Python відображення гістограм реалізується додатковими засобами. Matplotlib є однією з найрозповсюдженіших бібліотек Python для візуалізації даних. Вона дозволяє створювати широкий спектр графіків, від простих лінійних до складних тривимірних. Matplotlib широко використовується у різних галузях наприклад, у наукових дослідженнях.

Завдяки об'єкту subplot інструментарій Matplotlib дозволяє одночасне відображення кількох гістрогам, що забезпечує можливість порівняння отриманих результатів (рис. 4).

Переглядаючи отриманий розподіл можна зробити висновок, що освітні втрати на дисципліні «Інтелектуальний аналіз даних» вплинули на подальшу успішність здобувачів в дисциплінах «Інформаційні технології OLTP OLAP і Datamining на серверній платформі» та «Постреляційні бази даних». Аналізуючи отриманий результат викладачі пов'язаних дисциплін можуть скорегувати навчальний план та компенсувати деякі отримані освітні втрати.

Окремо для подальшої реалізації інструментарію аналізу успішності та визначення освітніх втрат необхідно підключити Seaborn. Seaborn

```
Організація баз даних
--------------------
count     26.000000
mean      80.115385
std       12.850920
min       60.000000
25%       67.750000
50%       84.000000
75%       90.000000
max      100.000000
Name: Організація баз даних, dtype: float64
```

```
Інтелектуальний аналіз даних
----------------------------
count     26.000000
mean      74.153846
std       14.750437
min       61.000000
25%       62.000000
50%       66.500000
75%       84.750000
max      100.000000
Name: Інтелектуальний аналіз даних, dtype: float64
```

Рис. 3. Реалізація первинного статистичного аналізу оцінок здобувачів в дисциплінах «Організація баз даних» та «Інтелектуальний аналіз даних»

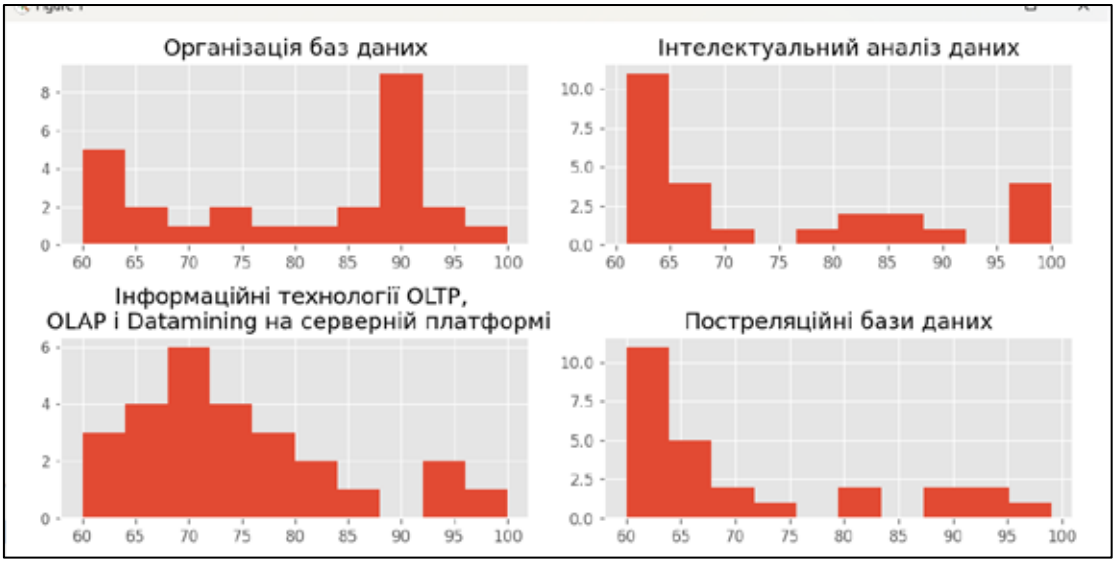


Рис. 4. Відображення гістограм розподілу балів здобувачів у різних дисциплінах засобами Matplotlib

містить набір шаблонів, що необхідний для побудови діаграм розсіювання та кореляції, які, в свою чергу, допоможуть визначити неявний взаємозв'язок освітніх втрат та успішності здобувачів на певних дисциплінах. Встановити та налаштувати згаданий інструментарій роботи з графіками можливо засобами вбудованого менеджера керування пакунками – pip.

Не менш важливим у первинному аналізі є успішності здобувачів є виявлення залежностей між оцінками у різних дисциплінах. За допомогою інструментарію Seaborn маємо змогу побудувати матрицю кореляції між усіма дисципліна навчального плану та отриманими на час аналізу оцінками. Матриця кореляції являє собою матрицю, що відображає кореляційні коефіцієнти між множинами змінних. Вона використовується для визначення ступеня зв'язку між змінними в наборі даних. Розрахунок цієї матриці здійснюється засобами Pandas, методом corr().

Використовуючи інструментарій Seaborn можливо відобразити взаємозв'язок успішності здобувачів дисциплін за допомогою методу heatmap(). Використовуючи графік розсіювання можна визначити залежність між успішністю між різними дисциплінами (рис. 5).

Метод heatmap( ) дозволяє відобразити кореляційну матрицю у вигляді теплової карти. Теплова карта являє собою спосіб графічного представлення даних, в якому окремі значення позначаються кольорами. Це один із способів візуалізації великих обсягів інформації, що дозволяє швидко зрозуміти залежності чи аномалії у даних. Інтенсивність кольору відповідає величині відображеного значення.

Відображена на рисунку 5 кореляційна матриця демонструє взаємозв'язок успішності здобувачів з дисциплін «Теорія автоматів і формальних мов» та «Постреляційні бази даних». Це зв'язок можливо більш детально дослідити використавши діаграму розсіювання. Діаграма розсіювання (scatter plot) – це графік, що використовується для відображення залежності між двома змінними. Інструментарій Matplotlib та Seaborn дозволяють виконувати побудову різних варіацій діаграм розсіювання. Наприклад, метод jointplot( ) дозволяє малювати комбінований графік гістограм та діаграм розсіювання.

Згідно з наведеною структурно-логічною схемою навчального плану, прямого зв'язку між дисциплінами «Теорія автоматів і формальних мов» та «Постреляційні бази даних» немає. Проте, використавши діаграму розсіювання (рис. 6), можна побачити, що більшість здобувачів, які отримали оцінку «задовільно» з дисципліни «Теорія автоматів і формальних мов», також отримали «задовільно» з дисципліни «Постреляційні бази даних».

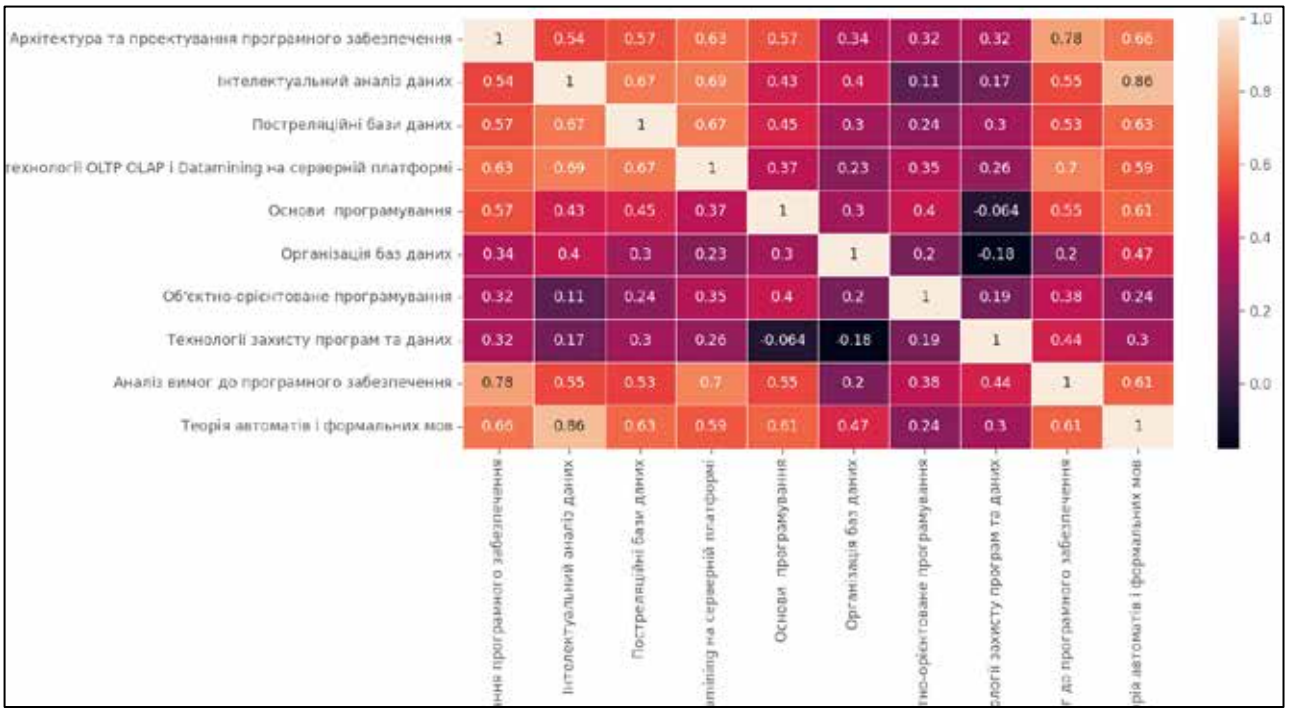


Рис. 5. Відображення частини кореляційної матриці оцінок навчальних дисциплін

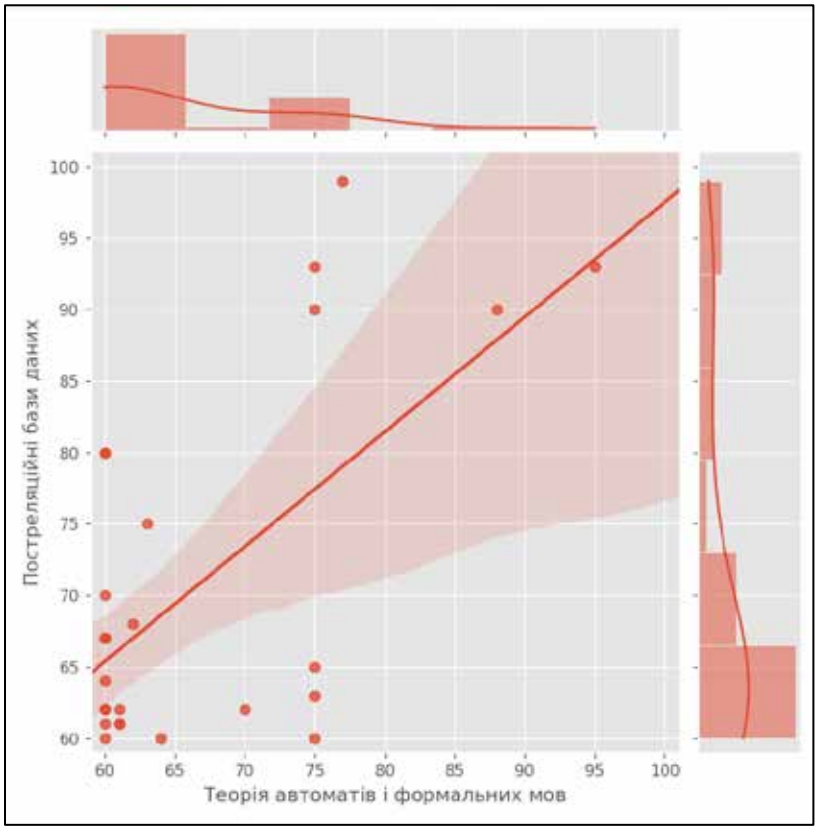


Рис. 6. Відображення діаграми розсіювання

Інтеграція розробленого програмного забезпечення на основі Python може бути виконана з різними системами дистанційного навчання за допомогою BeautifulSoup та Requests. Використовуючи зазначений інструментарій можливо завантажити та проаналізувати поточні журнали успішності здобувачів. Такий підхід дозволити вчасно виявляти освітні втрати та корегувати поточний навчальний матеріал для їх компенсації.

В подальшому розроблене програмне забезпечення може бути доповнене інструментарієм штучного інтелекту, для вдосконалення пошуку освітніх втрат. Інтеграція засобів штучного інтелекту дозволить збільшити точність поточного аналізу, прогнозувати успішність здобувачів та виявляти потенційні помилки [9, с. 240].

Інтеграція засобів штучного інтелекту до застосунків розроблених мовою програмування Python є одним з найбільш розповсюджених підходів в сучасній індустрії інформаційних технологій. Наявності різних спеціалізованих бібліотек, фреймворків та інструментів значно спрощує цей процес. В наукових дослідженнях часто застосовується бібліотека TensorFlow, що легко інтегрується з мовою Python [10, с. 244].

Висновки.

1) Проведено аналіз засобів оцінювання здобувачів у сучасних система дистанційного навчання. Розглянуто можливість застосування вебскрейпінгу для обробки успішності здобувачів засобами мови програмування загального призначення Python. Запропоновано інструментарій необхідний для реалізації зазначеного підходу.

2) Досліджено набір засобів для реалізації аналізу даних успішності здобувачів, що дозволить проведення графічного та первинного статистичного аналізу. Наведено представлення матриці кореляції успішності здобувачів засобами Seaborn, що забезпечує визначення взаємозв'язку успішності здобувачів у різних начальних дисциплін і точніше виявлення освітніх втрат.

3) Розроблено програмне забезпечення для аналізу успішності здобувачів на основі засобів Pandas, Matplotlib та Seaborn. Що робить можливим проведення аналізу даних з систем дистанційного навчання на основі інструментарію Requests та BeautifulSoup.

Список літератури:

1. Марчук А. В., Якість вищої освіти в надзвичайних умовах: освітні втрати й дисфункції цифровізації вищої освіти та дистанційного навчання. Socio-economic relations in the digital society. Том. 1, № 47. С. 80–89.
2. Топузов О. М., Головко М. В., Локшина О. І. Освітні втрати в період воєнного стану: проблеми діагностики та компенсації. Український педагогічний журнал. Том. 1, 2023. С. 5–13.
3. Donnelly R., Patrinos H. A. Learning loss during Covid-19: An early systematic review. Prospects. Vol. 51, Issue 4. P. 601–609.
4. Трубачева С., Прохоренко О., Калиш Л. Особливості діагностики та компенсації втрат у навчанні учнів засобами технології самостійного набуття знань з використанням електронних освітніх додатків. Problems of the modern textbook. 2024. № 31. С. 271–279.
5. Putri S. E., Hamuddin B., Nursafira M. S. Discourse analysis in e-learning-based course using Moodle platform: An experimental design. REiLA: Journal of Research and Innovation in Language. Vol. 2, Issue 1. 2020. P. 19–26.
6. Kumar S., Roy U. B. A technique of data collection: web scraping with python. Statistical Modeling in Machine Learning. Elsevier, 2023. P. 23–36.
7. Jose U. Python programming for data analysis. Springer, 2021. 263 p. Jalolov T. S. Leveraging apis in python: a comprehensive guide. World of science. Vol. 7, Issue 5. P. 544–552.
8. Bantilan N. Pandera: Statistical data validation of pandas dataframes. Proceedings of the Python in Science Conference (SciPy.(2020.. P. 116–124.
9. Ілійчук Л. Штучний інтелект і якість освіти: можливості, виклики та загрози. Науково-педагогічні студії. Том 8. 2024 С. 232–248.
10. Ashraf M., Ahmad S. M., Ganai N. A. Prediction of cardiovascular disease through cutting-edge deep learning technologies: an empirical study based on TENSORFLOW, PYTORCH and KERAS. *International Conference on Innovative Computing and Communications: Proceedings of ICICC 2020, Volume 1*(2021.. P. 239–255.

Borovlova S.Yu., Honcharov D.S., Horban H.V., Kandyba I.O. IDENTIFYING LEARNING LOSSES OF HIGHER EDUCATION STUDENTS USING THE PYTHON PROGRAMMING LANGUAGE

The article presents a study of the tools for analysing the performance of higher education students in order to determine educational losses. The publications on the quality of higher education in emergency conditions and the impact of martial law on the growth of educational losses are studied. In addition, an analysis of modern distance education systems is carried out to determine the possibility of using additional tools for their analysis. The possibility of using built-in application programming interfaces (API) and web scraping tools to process students' progress logs is considered. The use of the Python programming language for analysing students' grade logs and their further processing is proposed. The features of access to the gradebook in the Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment (MOODLE) system, which is one of the most widespread learning platforms in the world, are investigated. A description of the peculiarities of implementing grade processing in this platform using web scraping and exporting the obtained data on students' progress is given. The method of forming a dataset based on the obtained information on academic performance for further processing by specialised tools is presented. The possibility of using the Pandas, Numpy, Matplotlib tools for conducting primary statistical analysis of students' academic performance and identifying a decrease in this performance, which may indicate the presence of educational losses, is investigated. An example of building correlation matrices of students' academic performance in different disciplines using Pandas and Seaborn is presented in order to search for educational losses in interrelated disciplines. The method of displaying the correlation matrix by means of Seaborn is described. The use of the Matplotlib toolkit for a more detailed study of the relationship between the success of students in different disciplines is proposed. The possibility of supplementing the proposed software with artificial intelligence tools is considered, which will allow predicting possible educational losses based on the analysis of current academic performance.

Key words: *learning loss, statistical analysis, Python, Pandas, Matplotlib, Seaborn.*

УДК 004.75
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/05

Вакалюк Т.А.
Державний університет «Житомирська політехніка»

Лобанчикова Н.М.
Державний університет «Житомирська політехніка»

Янчук В.М.
Державний університет «Житомирська політехніка»

Фаррахов О.В.
Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України

Жиляєв Є.В.
Державний університет «Житомирська політехніка»

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ ПРОТОТИПУ ДОДАТКУ ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ ШЛЯХОМ ВІДСТЕЖЕННЯ ПОДІЙ У РОЗПОДІЛЕНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ

В статті представлено теоретичне обґрунтування та розробку прототипу додатку для виявлення аномалій у розподілених комп'ютерних системах шляхом відстеження подій. Досліджено сучасні підходи до моніторингу та аналізу аномалій у складних розподілених системах, зокрема з використанням технологій Spring Cloud Sleuth, Apache Kafka та Apache Spark. Розроблено архітектуру прототипу, що базується на модульному підході та забезпечує гнучкість і масштабованість рішення. Визначено та систематизовано ключові метрики для моніторингу, які включають ідентифікаційні метрики (Span ID, Trace ID, назва сервісу), метрики швидкодії (час відгуку, завантаження ЦПУ та пам'яті) та метрики помилок (http-статус, теги помилок). Особливу увагу приділено вибору та обґрунтуванню алгоритмів виявлення аномалій. На основі аналізу існуючих підходів обрано алгоритми на базі кластеризації, зокрема KMeans, що забезпечують високу швидкодію та ефективне використання пам'яті при обробці даних у режимі реального часу. Визначено та охарактеризовано три основні типи аномалій для моніторингу: помилки та винятки, порушення визначених порогових значень та збільшення часу відгуку запитів. Запропоновано інноваційний підхід до аналізу першопричин аномалій з урахуванням архітектурного контексту, що дозволяє не лише виявляти аномалії, але й визначати їх джерело в складній розподіленій системі. Розроблено механізм обробки даних у режимі реального часу з використанням Apache Spark, що забезпечує швидку та ефективну обробку великих обсягів даних від різних сервісів. Особливістю запропонованого рішення є можливість паралельного використання різних алгоритмів виявлення аномалій та їх легкої заміни або модифікації завдяки модульній архітектурі. Теоретичні засади створюють підґрунтя для практичної реалізації ефективної системи виявлення аномалій у розподілених комп'ютерних системах. Запропоноване рішення може бути використане для підвищення надійності та ефективності роботи складних розподілених систем.

Ключові слова: *розподілені комп'ютерні системи, виявлення аномалій, відстеження подій, Spring Cloud Sleuth, Apache Kafka, Apache Spark, кластеризація, KMeans, аналіз першопричин, моніторинг у реальному часі.*

Постановка проблеми. Сучасні розподілені комп'ютерні системи стають все більш складними та масштабними, що ускладнює процес моніторингу їх стану та виявлення потенційних проблем. Особливо гостро постає питання швидкого виявлення аномалій у роботі таких систем, оскільки навіть незначні збої можуть призвести до суттєвих втрат як з технічної, так і з бізнес точки зору. Традиційні методи моніторингу часто виявляються неефективними через велику кількість даних, які потрібно аналізувати в режимі реального часу, та складність взаємозв'язків між різними компонентами системи. Особливо це стосується мікросервісної архітектури, де кожен сервіс може мати

власні особливості роботи та патерни поведінки. Крім того, існуючі рішення часто не враховують контекст архітектури системи при виявленні аномалій, що може призводити до неправильної інтерпретації проблем та ускладнювати процес їх усунення. Тому розробка ефективного підходу до виявлення аномалій шляхом відстеження подій у розподілених комп'ютерних системах з урахуванням архітектурного контексту є актуальною науково-практичною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням виявлення аномалій у розподілених комп'ютерних системах присвячено значну кількість наукових праць. Зокрема, Бовензі (Bovenzi) та ін. [1] запропонували статистичний алгоритм для виявлення аномалій в режимі онлайн для критично важливих програмних систем, який враховує динамічну природу таких систем. Пітакрат (Pitakrat) та ін. [2] розробили підхід до ієрархічного прогнозування відмов з урахуванням архітектури, що дозволяє більш точно визначати причини аномалій у складних системах.

Важливий внесок у дослідження методів виявлення аномалій з використанням сучасних технологій зробили Солаймані (Solaimani) та ін. [3], які запропонували статистичний метод онлайн-виявлення аномалій з використанням Apache Spark для обробки гетерогенних даних від різних джерел. Їхня робота демонструє ефективність використання технологій розподіленої обробки даних для задач моніторингу.

Значний прогрес у розробці інфраструктури для відстеження подій у розподілених системах представлено в роботі Сіджелман (Sigelman) та ін. [5], де описано систему Dapper, яка стала основою для багатьох сучасних рішень, включаючи Spring Cloud Sleuth [4]. (Захарія) Zaharia [10] у своєму дисертаційному дослідженні представив архітектуру для швидкої та загальної обробки даних у великих кластерах, що лягла в основу Apache Spark [6]. Подальший розвиток цієї технології, включаючи MLlib [7] та Spark Streaming [8], створив потужну екосистему для обробки даних у режимі реального часу та машинного навчання.

Аналіз досліджень показує, що незважаючи на значний прогрес у розробці методів та інструментів для виявлення аномалій, залишається актуальною проблема створення комплексного рішення, яке б поєднувало ефективні алгоритми виявлення аномалій з урахуванням архітектурного контексту системи та можливістю роботи в режимі реального часу.

Постановка завдання. Метою даної роботи є опис теоретичних засад розробки прототипу додатку для виявлення аномалій шляхом відстеження подій у розподілених комп'ютерних системах з урахуванням архітектурного контексту, що забезпечує моніторинг та аналіз у режимі реального часу.

Виклад основного матеріалу. Мета полягає у виявлені аномалій на основі даних від системи відстеження подій. Більше того, виявлені аномалії мають розглядатись в контексті архітектури, щоб визначити, які з аномалій надходять від сервісу, що їх викликав, а які є лише наслідком поширення помилки від іншого сервісу. На першому етапі дані отримуються за допомогою системи відстеження подій, після чого дані готуються відповідно до потреб алгоритмів виявлення аномалій. Ці алгоритми виявлять аномалії серед вхідних даних, як тільки вони стають доступними, тобто обробляються дані передаються та обробляються в режимі онлайн. Згодом, виявлені аномалії додатково опрацьовуються за допомогою з точки зору аналізу першопричини, щоб пріоритезувати ті аномалії, що найімовірніше є першопричиною.

Рішення-прототип має охоплювати усі ці етапи. Однак, в даній імплементації фокус буде зосереджений на підготовці даних для обробки, виявлені аномалій та їх аналізу в контексті залежностей сервісу задля визначення першопричини аномалії. Саме вилучення даних із сервісу та візуалізація результатів будуть реалізовані на мінімально-базовому рівні.

Також, по своїй суті прототип має передбачатися як основа для подальших досліджень та/або покращень, а тому має враховувати можливості для подальших змін з мінімальними зусиллями. Для цього рішення має бути реалізовано через модульний підхід.

Перш за все, моделі та алгоритми для виявлення аномалій мають бути взаємозамінними. Навіть використання різних алгоритмів паралельно з прийнятними результатами має бути можливим. Для досягнення цього, інфраструктурою, яка буде зв'язувати різні частини рішення буде реалізовано за допомогою асинхронною системи повідомлень. Якщо при паралельній роботі алгоритмів, вони відмітять один і той самий запит як аномальний, аналіз першопричини має бути здатним виявляти та об'єднувати такі дублюючи результати. Також, сам процес обробки має бути окремим модулем, для того щоб вибір різного інструментарії в якості системи відстеження подій, або ж вибір іншого підходу для збору інформації про залежності для

аналізу першопричину не впливало на роботу інших частин рішення. Єдиним має бути лише формат повідомлення у якому частини прототипу будуть комунікувати між собою, самій ж модулі можна буде заміняти.

Інструментарій рішення для відстеження подій створено на основі Spring Cloud Sleuth. Базові налаштування буде розширено за допомогою додаткового коду, щоб отримати до додаткової інформації, що може бути корисна для виявлення аномалій.

Дані від системи відстеження подій будуть записуватися у відповідний розділ системи Kafka у форматі JSON. Звідти їх буде отримавати модель для виявлення аномалій, реалізований на основі Apache Spark. Після отримання даних із Kafka дані будуть аналізуватися за допомогою декількох різних алгоритмів для виявлення аномалій, кожен з яких є незалежним від інших.

Алгоритм може мати, а може і не мати тренувальну фазу, під час якої буде мати доступ до усіх історичних даних у Kafka. Кожен алгоритм має фазу виявлення, коли він аналізує точку даних та оцінює чи є вона аномальною чи ні. Після виявлення аномалій, кожен з алгоритмів записує дані про них в загальний для всіх алгоритмів розділ Kafka, внаслідок чого може виникнути дубльовані дані.

Другий модуль, також реалізований на основі Apache Spark, відповідає за аналіз першопричини. Він зчитує дані про аномальні точки даних із Kafka та після їх аналізу має надати першопричину для певного набору аномалій. Це робиться через аналіз аномалії у контексті залежностей сервісу де вона виникла.

Нарешті, прототип також матиме просту візуалізацію для демонстрації результатів в зрозумілий для людини спосіб. Візуазізація буде реалізована у базовому вигляді.

Spring Cloud Sleuth [4] є фреймворком для реалізації відстеження подій у розподілених системах в контексті Spring Cloud Applications. Однією з «гарантій» цього проєкту є отмання даних про події без жодної постобробки та якомога швидше, а тому це є хорошим вибором для реалізації в якій одна з цілей є виявлення аномалій в режимі онлайн.

Spring Cloud Sleuth використовує ту саму термінологію, що і робота по системі Dapper [5]. Використовуються такі терміни як «трейс (trace = слід)» та «спен (span = діапазон)». Єдиною складністю тут є те що частина інформації про спен події записується на одному сервісі, а інша частина на іншому. Рішенням цієї проблеми є те, що усі сервіси будуть збирати інформацію про події за певний проміжок часу, а потім надсилати їх до системи обміну повідомленнями в форматі JSON. Такий об'єкт буде містити інформацію як про сервіс, що його надіслав, так і про спен подій за сторони саме цього сервісу. Однак, іншим викликом є те, що оскільки інформація про події буде посилатися як з сервісу що надсилає запит, так і з сервісу, що обробляє запит, необхідно буде об'єднати ці об'єкти.

Apache Spark [6] – це об'єднана структура для обробки даних у розподілених комп'ютерних

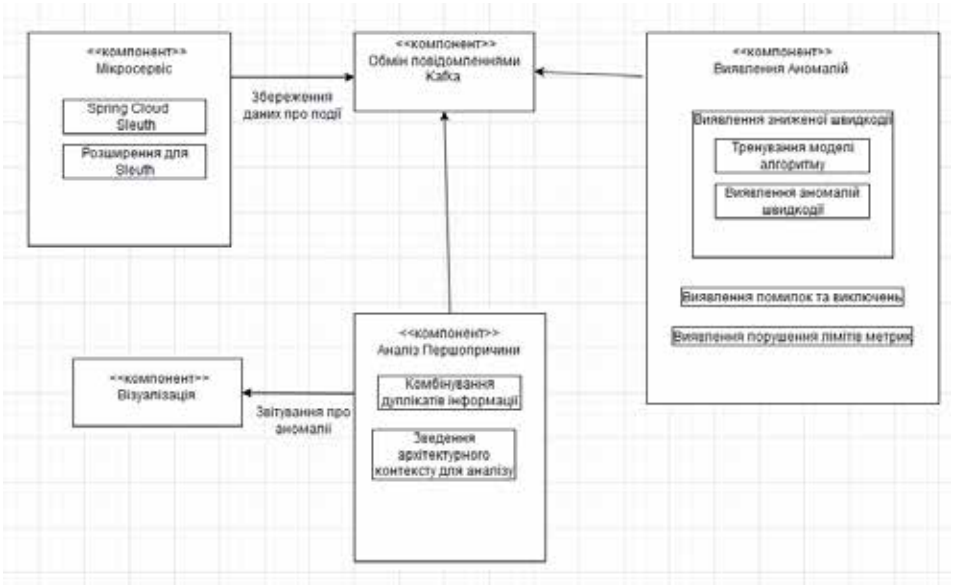


Рис. 1. Загальний огляд архітектури

системах. Проект розпочався у 2009 році в Каліфорнійському університеті в Берклі. Відтоді він став найбільш активним проектом з відкритим кодом, нараховуючи понад 1000 учасників та використовується у більше ніж 1000 компаніях. Також, він використовується в багатьох поточних академічних дослідницьких проектах які досліджують потоки даних та виявлення аномалій, наприклад [3].

Apache Spark підтримує кілька мов програмування, таких як Java, Scala та Python. Головною абстракцією даних у цьому фреймворку є RDD (Resilient Distributed Datasets = Стійкі Набори Даних у розподіленій системі). Це колекції об'єктів, які можуть бути розподілені між кількома кластерами даних для швидкої паралельної обробки завдань. Основні операції для обробки даних що підтримуються є map, filter та group by.

Для розширення базового функціоналу Apache Spark, яка в основному націлена на обробку великих наборів даних, різні додаткові бібліотеки мають бути включені до проекту. Spark SQL дозволяє користувачеві використовувати SQL-запити відносно RDD, як один із методів структурування даних. Spark MLlib [7] містить алгоритми машинного навчання, які використовують фреймморк Spark для швидкої обробки та можуть бути легко інтегровані в програми на основі Spark. Останньою бібліотекою для розширення можливостей фрейморку є Spark Streaming [8]. Вона забезпечує розподілену обробку та маніпуляцію потоків даних.

Не зважаючи на те що Apache Spark за своїм дизайном більше розрахований для роботи з великими об'ємами даних, він також може надавати швидкодію у нішевих сферах, таких як використання потоків та машинне навчання. Захарія (Zaharia) [10] порівняв Apache Spark з Apache Storm [9], іншим проектом з відкритим кодом, що спеціалізується на роботі з потоками. Згідно його результатів, Apache Spark показав щонайменше вдвічі більшу швидкодію при обробці завдань.

Отже, з готовою основою для роботи з потоками даних да імплементованими алгоритмами машинного навчання, Apache Spark має в своєму розпорядженні увесь інструментарій необхідний для цієї практичної роботи, а саме для виявлення аномалій у вхідному потоці даних. Також, важливо відзначити, що цей фреймворк має у своєму розпорядженні навіть більше додаткових інструментів, в тому числі для роботи з Big Data, що дозволить легше адаптувати рішення до можливих нових викликів та вимог у майбутньому.

Основною причиною вибору Apache Kafka [11] є обмеження, що випливають із вибору Apache Spark та Spring Cloud Sleuth. Spring Cloud Sleuth підтримує вивід даних до Apache Kafka або RabbitMQ [13]. З іншого боку Spark Streaming надає вбудовану підтримку зчитування даних з Apache Kafka [12], в той час як підтримка RabbitMQ наявна лише через сторонні бібліотеки. Крім того, Apache Kafka пропонує можливість зберігати дані на додаток до функціоналу в якості серві для обміну повідомленнями. Навіть у блозі компанії Pivotal, автору фреймворку Spring та команда підтримки RabbitMQ, Apache Kafka згадується як хороший вибір для сценаріїв де потребується «потік від сервісу A до B без складної маршрутизації та з максимальною пропускною здатністю», що є як раз сценарієм для рішення в рамках цієї роботи. Саме ці фактори роблять Apache Kafka підходящим вибором для асинхронної системи обміну повідомленнями.

Як було описано в архітектурі, в рішенні-прототипі для збору метрики планується використовувати Spring Cloud Sleuth. Єдина метрика, яка збирається за замовчення, це час відгуку, а точніше, тривалість запиту.

За допомогою додаткового налаштування фреймворку можна також отримати середнє значення Завантаження ЦП та Завантаження пам'яті у JVM (віртуальна машина для Java). Ця метрика збирається за замовченням у JVM- платформі і потрібно лише передати їх до Sleuth. Такі налаштування базуються на можливостях моніторингу зсередини JVM і від розробника вимагається лише додати кілька рядків коду в конфігурації мікросервісу. Нижчу показано все, що потрібно зробити для кожного сервісу в класі конфігурації. Після ін'єкції BeanFactory та Spring Cloud Sleuth Tracer потрібно додатково зареєструвати три додаткові компоненти. Ці компоненти імпортуються в якості додаткових залежностей.

На додаток до того, що згадується у літературі, Spring Cloud Sleuth також надає додаткові можливості, які варто розглянути, адже серед них є метрики які можуть допомогти прослідити конкретний виклик методу на конкретному сервісі. До них входить інформація про URI (unique resource identifier = унікальний ідентифікатор ресурсу) запиту, назва сервісу, IP-адреса та порт.

Щодо http-запитів Spring Cloud Sleuth надає моржливість відслідковувати http-метод та http-статус. Більш того, у випадку помилки, до метрик додається тег помилки. Ну і нарешті, надаються ідентифікаційні номера, які дозволяють прослід-

ковувати конкретний виклик і те як він проходить через різні сервіси, вони називаються Span ID(span = діапазон) та Trace ID(trace = слід).

Отже, в залежності від алгоритмів та потреб, планується отримати наступні метрики, що наведені у таблиці 1.

Прототип за своїм дизайном має виявляти наступні три типи аномалій: помилки та винятки; порушення визначених порогових значень (наприклад, використання ресурсів ЦП або ресурсів пам'яті системи); збільшення часу відгуку запитів порівняно з визначеним «нормальним» рівнем.

Помилка – це відхилення стану сервісу від очікуваного. Зазвичай це призводить до виключення або повідомлення з кодом помилки. В ідеальному світі, програма має бути протестована, усі можливі причини помилок виявлені і усунуті.

Визначені порогові значення особливо корисні для моніторингу метрик, які вимірюється у відсотках. З уже визначених метрик, виведених у таблиці 1, такими є завантаження ресурсів ЦП та завантаження ресурсів пам'яті.

Третій тип аномалій це збільшений час відгуку, порівняно з «нормальним» очікуваним рівнем. Це є важливим показником, адже збільшений час відгуку може негативно вплинути на успіх бізнесу, що підтримує веб- додаток. Тому необхідно встановити базове очікуване значення для часу відгуку. Аномаліями будуть вважатись усі запити, відповідь на які буде потребувати більше часу, ніж задане порогове значення.

З виявленням таких типів аномалій, можна виявити наступні сценарії збоїв системи: сервіс аварійно завершує роботу через помилку під час виконання; сервіс не повертає відповідь на відгук вчасно; сервіс має збільшений час відгуку порівняно з очікуваним, що означає недостатню швидкодію сервісу.

Перший сценарій спричинює помилку, або ж виняток, тобто одну із визначених вище аномалій. Виявляючи їх, цей сценарій вирішується.

В системі під спостереженням, запит, який потребує занадто багато часу, призведе до помилки в зв'язку з таймаутом. Отже, цей сцена-

```
@Configuration
public class MvcConfig extends WebMvcConfigurerAdapter {

    Tracer tracer;

    @Autowired
    BeanFactory beanFactory;

    Tracer tracer() {
        if (this.tracer == null) {
            this.tracer = this.beanFactory.getBean(Tracer.class);
        }
        return this.tracer;
    }

    @Bean
    public DemoTraceHandlerInterceptor demoTraceHandlerInterceptor(BeanFactory beanFactory) {
        return new DemoTraceHandlerInterceptor(beanFactory, tracer());
    }

    @Bean
    public SpanAdjuster demoSpanAdjuster() {
        return new demoSpanAdjuster();
    }

    @Bean
    DemoFilter demoFilter() {
        return new DemoFilter(tracer());
    }
}
```

Рис. 2. Код, необхідний сервісу для більшої якості метрик

Таблиця 1

Метрики для використання у прототипі

Ідентифікаційні метрики	Метрики швидкодії	Метрики помилок
Span ID Trace ID Назва сервісу URL запиту IP-адреса Порт http-метод	Час відгуку Завантаження ЦПУ Завантаження пам'яті	http-статус Тег помилки

рій збою системи також охоплюється виявленням конкретним помилок. Якщо ж інша система знає як справитись з таймаутом, повертаючи запит із дуже довгою тривалістю, це охоплюється виявленням збільшення часу відгуку системи. Єдиний випадок, який не може виявлятися системою, це коли нічого не повідомляється. Якщо немає звітованого спену, система не зможе нічого виявити.

Щоб проілюструвати корисність спостереження за визначеними пороговими значенням, буде використаний сценарій витоку пам'яті. У цьому сценарії завантаження ЦПУ збільшується, коли використання ресурсів пам'яті JVM перевищує певний поріг. Це пов'язано з більшою активністю системи garbage collector (збирача сміття), яка звільнює пам'ять від об'єктів, що не використовуються. Системний адміністратор може встановити порогове значення і бути проінформованим, як тільки показник увійде у критичну відмітку для певного сервісу.

Моніторинг мікросервісу для виявлення аномалій створює необхідність визначення певних вимог. По-перше, завдання моніторингу мікросервісу в режимі онлайн потребує здійснення цього процесу в реальному часі [1]. Більш того, має бути враховано, що якщо система піднімає занадто багато помилкових тривог, то вона, ймовірно, буде ігноруватися, або вимкнена оператором. А тому, надійний алгоритм виявлення, який також враховує можливість моніторингу у реальному часі є базовою вимогою.

Також, у програмному середовищі, яке часто змінюється, як мікросервісна програма, що знаходиться у стадії активної розробки, необхідно щоб і модель виявлення аномалій могла часто адаптуватися до нових вимог [2]. Коли стан системи під час роботи починає сильно відхилятися від стану систему, на якому була натренована модель виявлення аномалій, точність виявлення аномалій неодмінно знижується [1]. Тому, додатковою важливою вимогою є застосування алгоритмів які здатні справлятися зі змінним середовищем.

Відстеження помилок і таймаутів не потребує алгоритмів пов'язаних з машинним навчанням чи статистикою, принаймні у наведеному прикладі використання. Коли виникає помилка, Spring Cloud Sleuth додає тег помилки до поточного спену. Крім того, спени http-запитів отримують тег з http-статусом, що повертається. Таким чином, фільтрація спенів http-запитів з тегами помилки або ж спени запитів з http-статусом 500 (Внутрішня помилка серверу) в результаті надасть потік спенів, де запити або в результатів отримали таймаут, або ж викликали виключення, яке ніяк не обробляється, в програмі. Це можна порівняти з підходом на основі закономірностей, однак ніякого тренування алгоритму не відбувається. Буде виявлятися лише закономірність, що буде визначена як аномальна.

При спостереженні аномалій швидкодії є три метрики, такі як завантаження ресурсів пам'яті JVM, завантаження ресурсів ЦПУ та тривалість запиту. Щоб якнайкраще використати доступну інформацію, ці показники можна обробляти різними по-різному.

Завантаження ресурсів пам'яті JVM це є метрика, що може використовуватися як ранній індикатор того, що щось може піти не так. Оскільки процес прибирання зайвих об'єктів проходить все частіше, ресурсів пам'яті залишається все менше, може бути корисно налаштувати порогове значення використання ресурсів пам'яті та пов'язане з цим повідомлення.

Оскільки завантаження ЦПУ вимірюється у відсотках, найлегший спосіб виявляти аномалії через визначення порогового значення, вихід за яке розцінюється як аномалія.

Порівняно з завантаженням ресурсів пам'яті та ресурсів ЦПУ, порогове значення для тривалості відгуку сервісу визначити набагато складніше. Оскільки очікувана тривалість відгуку може сильно відрізнятись, залежно від конкретного використання та функції, визначення порогового значення завчасно не є варіантом. Необхідно вивести деяке базове значення, та прийнятне порогове значення виходячи із того, що є очікуваним сценарієм роботи сервісу.

Оскільки система прототипу спрямована на виявлення аномалій в режимі онлайн, надзвичайно важливо, щоб алгоритми були здатні дуже швидко обробляти вхідні дані, щоб своєчасно надавати результати та мати можливість обробляти велику кількість таких даних. Крім того, слід враховувати, що кожна точка даних поводиться по-різному. Тому цілком ймовірно, що для виявлення аномалій може знадобитися зберігати натреновану модель алгоритму для кожного сервісу окремо. Це вимагає, щоб алгоритм зберігав інформацію, необхідну для кожного сервісу якомога компактніше.

Система розробляється таким чином, що декілька різних алгоритмів можуть виконуватись паралельно. Це означає, що нові алгоритми можуть бути розміщені паралельно із початково реалізованими алгоритмами або ж повністю замінити їх. Оскільки система розроблена задля

подальшого розвитку, обрані алгоритми не мають бути досконалими, але мають бути здатні ефективно виконувати завдання з виявлення збільшення часу відгуку сервісу. Крім того, алгоритм має бути здатним виявляти аутлаєрів. Оскільки аналіз першопричини базується на припущенні, що аномалії передбачені на рівні спену. Таким чином, неможливо використовувати алгоритми, які виявляються аномальні часові ряди, оскільки тоді буде втрачена інформації на рівні спену, яка необхідна для аналізу першопричини.

В контексті інструментарію для реалізації рішення прототипу, який буде описаний в більших деталях у наступному розділі, важливо щоб обраний алгоритм мав підтримку бібліотеки Spark MLlib. Алгоритми на основі щільності можуть бути викреслені, оскільки вони не мають достатньої швидкодії при прогнозуванні аномалій. Те саме можна сказати про алгоритмі на основі дистанції між точками даних.

Всі ці вимоги залишають вибір між алгоритмами на основі моделювання часових проміжків та алгоритмами на основі кластеризації. Перша категорія не має підтримки бібліотеки Spark MLlib. Однак, щодо другої категорії, MLlib містить реалізацію алгоритму KMeans, який має додаткові сильні сторони, такі як висока швидкодія виявлення аномалій, та малий розмір даних, що мають зберігатися на сервісах. А тому, саме алгоритми на основі кластеризації будуть обрані для прототипу рішення.

Висновки. У роботі представлено теоретичні аспекти розробки прототипу додатку для виявлення аномалій у розподілених комп'ютерних системах. В результаті проведеного дослідження розроблено архітектуру прототипу, що базується на модульному підході з використанням сучасних технологій (Spring Cloud Sleuth, Apache Kafka, Apache Spark), що забезпечує гнучкість та масштабованість рішення. Визначено ключові метрики для моніторингу, які включають ідентифікаційні метрики (Span ID, Trace ID, назва сервісу тощо), метрики швидкодії (час відгуку, завантаження ЦПУ та пам'яті) та метрики помилок (http-статус, теги помилок). Обґрунтовано вибір алгоритмів на основі кластеризації, зокрема KMeans, для виявлення аномалій, що забезпечує високу швидкодію та ефективне використання пам'яті при обробці даних у режимі реального часу. Визначено три основні типи аномалій для моніторингу: помилки та винятки, порушення визначених порогових значень та збільшення часу відгуку запитів, що дозволяє комплексно оцінювати стан системи. Запропоновано підхід до аналізу першопричин аномалій з урахуванням архітектурного контексту, що дозволяє визначати джерело проблеми в складній розподіленій системі.

Розроблені теоретичні засади забезпечують можливість подальшого розвитку та вдосконалення системи, зокрема через додавання нових алгоритмів виявлення аномалій та розширення функціональності аналізу першопричин. Отримані результати створюють теоретичне підґрунтя для практичної реалізації системи виявлення аномалій, що може бути використана для підвищення надійності та ефективності роботи розподілених комп'ютерних систем.

Список літератури:

1. Bovenzi A., Brancati F., Russo S., Bondavalli A. A Statistical Anomaly-Based Algorithm for On-line Fault Detection in Complex Software Critical Systems. *Computer safety, reliability, and security: SAFECOMP 2011.* Berlin: Springer, 2011. P. 128-142.

2. Pitakrat T., Okanovic D., van Hoorn A., Grunske L. An Architecture-Aware Approach to Hierarchical Online Failure Prediction. *12th International ACM SIGSOFT Conference on Quality of Software Architectures.* Venice, Italy, 2016. P. 211-220.

3. Solaimani M., Iftekhar M., Khan L., Thuraisingham B. Statistical technique for online anomaly detection using Spark over heterogeneous data from multi-source VMware performance data. *IEEE International Conference on Big Data.* Washington, DC, USA, 2014. P. 1086-1094.

4. Spring Cloud Sleuth GitHub Repository. URL: https://github.com/spring-cloud/spring-cloud-sleuth (дата звернення: 02.01.2025).

5. Sigelman B. H., Barroso L. A., Burrows M. et al. Dapper, a Large-Scale Distributed Systems Tracing Infrastructure: Google Technical Report. 2010. URL: https://static.googleusercontent.com/media/research.google.com/de//pubs/archive/36356.pdf (дата звернення: 02.01.2025).

6. Apache Spark – Lightning-Fast Cluster Computing. Apache Foundation. URL: https://spark.apache.org/ (дата звернення: 02.01.2025).

7. MLlib: Main Guide – Spark Documentation. Apache Foundation. URL: http://spark.apache.org/docs/latest/ml-guide.html (дата звернення: 02.01.2025).

8. Spark Streaming Documentation. Apache Foundation. URL: http://spark.apache.org/streaming/ (дата звернення: 02.01.2025).

9. Apache Storm Documentation. Apache Foundation. URL: http://storm.apache.org/ (дата звернення: 02.01.2025).

10. Zaharia M. An Architecture for Fast and General Data Processing on Large Clusters: дис. … PhD: Electrical Engineering and Computer Sciences. University of California. Berkeley, 2014. 198 p.

11. Apache Kafka Documentation. Apache Foundation. URL: https://kafka.apache.org/ (дата звернення: 02.01.2025).

12. Spark Streaming + Kafka Integration Guide. Apache Foundation. URL: http://spark.apache.org/docs/latest/streaming-kafka-0-10-integration.html (дата звернення: 02.01.2025).

13. RabbitMQ – Messaging that just works. Pivotal. URL: https://www.rabbitmq.com/ (дата звернення: 02.01.2025).

14. Laptev N., Amizadeh S., Flint I. Generic and Scalable Framework for Automated Time-series Anomaly Detection. *Proceedings of the 21st ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining.* Sydney, Australia, 2015. P. 1159-1168.

Vakaliuk T.A., Lobanchykova N.M., Yanchuk V.M., Farrakhov O.V., Zhyliaev Ye.V. THEORETICAL ASPECTS OF PROTOTYPE APPLICATION DEVELOPMENT FOR ANOMALY DETECTION BY EVENT TRACKING IN DISTRIBUTED COMPUTER SYSTEMS

The article presents the theoretical justification and development of a prototype application for detecting anomalies in distributed computer systems by tracking events. Modern approaches to monitoring and analysing anomalies in complex distributed systems are investigated, mainly using Spring Cloud Sleuth, Apache Kafka and Apache Spark technologies. A prototype architecture based on a modular approach has been developed to ensure the flexibility and scalability of the solution. The key metrics for monitoring are identified and systematised, including identification metrics (Span ID, Trace ID, service name), performance metrics (response time, CPU and memory utilisation), and error metrics (HTTP status, error tags). Special attention is paid to the selection and justification of anomaly detection algorithms. Based on the analysis of existing approaches, clustering-based algorithms, particularly KMeans, have been selected to provide high performance and efficient memory usage in real-time data processing. Three main types of anomalies for monitoring are identified and characterised: errors and exceptions, violation of certain thresholds, and increased query response time. An innovative approach to analysing the root causes of anomalies, taking into account the architectural context, is proposed, which allows not only the detection of anomalies but also the determination of their source in a complex distributed system. A mechanism for real-time data processing using Apache Spark has been developed, which ensures fast and efficient processing of large amounts of data from various services. A unique feature of the proposed solution is the possibility of parallel use of different anomaly detection algorithms and their easy replacement or modification due to the modular architecture. The theoretical foundations create the basis for the practical implementation of an effective anomaly detection system in distributed computer systems. The proposed solution can improve the reliability and efficiency of complex distributed systems and serve as a basis for further research and improvements in anomaly monitoring and analysis.

Key words: *distributed computer systems, anomaly detection, event tracking, Spring Cloud Sleuth, Apache Kafka, Apache Spark, clustering, KMeans, root cause analysis, real-time monitoring.*

УДК 004.75
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/06

Воєводін Є.В.
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького

Стабецька Т.А.
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького

Розломій І.О.
Черкаський державний технологічний університет

ВПЛИВ ТОПОЛОГІЇ КЛАСТЕРУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗПОДІЛЕННЯ РЕСУРСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ САМООРГАНІЗАЦІЙНИХ КАРТ КОХОНЕНА В СИСТЕМАХ ОРКЕСТРУВАННЯ ВІРТУАЛЬНИХ КОНТЕЙНЕРІВ

У статті розглянуто вплив топології кластеру на ефективність розподілення ресурсів у системах оркестрування віртуальних контейнерів. На прикладах, що базуються на самоорганізаційній карті Кохонена, продемонстровано, наскільки різне розташування вузлів може впливати на рівень заповненості кластеру та інші показники ефективності процесу розподілення.

Розглядаються різні аспекти налаштування самоорганізаційної карти Кохонена: розмірність простору (одновимірна, двовимірна тощо), функції пошуку відстані, а також способи визначення вагових коефіцієнтів. Детально описується процес навчання карти, що відіграє ключову роль, адже саме під час нього формуються вагові коефіцієнти нейронів карти. Ці коефіцієнти безпосередньо впливають на те, які вузли обираються для розміщення контейнерів. Залежно від топології кластеру, контейнер може потрапити до вузла з недостатніми ресурсами, що підвищує ризик швидкого вичерпання ресурсів або негативно впливає на інші показники, такі як кількість відмов на запити балансування.

Проведений аналіз показує, що за однакових налаштувань самоорганізаційної карти та ідентичних послідовностей запитів на балансування контейнерів одні топології можуть забезпечувати більш ніж на 10% ефективніше використання ресурсів порівняно з іншими.

Для підвищення точності оцінки було розширено попередньо запропонований метод тестування, додавши можливість досліджувати й порівнювати велику кількість варіантів розташування вузлів за довільними критеріями, такими як рівнем заповненості кластеру, кількістю відхилених запитів балансування, відмовостійкістю системи тощо. Також розглянуто варіант паралельного та розподіленого виконання експерименту, що дозволяє скоротити час обчислень та оперативніше отримати множину найбільш підходящих топологій кластеру.

Описана методика і результати експериментів становлять інтерес для дослідників, які прагнуть покращити ефективність розподілення ресурсів, у системах оркестрування віртуальних контейнерів.

Ключові слова: *системи оркестрування віртуальних контейнерів, віртуалізація, розподілені системи, нейронні мережі, самоорганізаційні карти Кохонена.*

Постановка проблеми. Системи оркестрування віртуальних контейнерів (СОВК) відіграють важливу роль у сучасних розподілених системах та хмарних сервісах. Вони відповідають за розподіл віртуальних контейнерів (що репрезентують сервіси, процеси, додатки) на фізичних кластерах, а також за організацію взаємодії між цими контейнерами. Одним із основних елементів СОВК є стратегія розподілення ресурсів (СРР), яка визначає, на якому фізичному вузлі розміщуватиметься контейнер. Існують різні реалізації СРР, серед стандартних: Binpack (розподілення заповненням) та Spread (розподілення поширенням). Ефективність СРР зазвичай оцінюють за кількома показниками: рівнем дефрагментації, успішністю запитів розподілення, відмовостійкістю системи тощо. Як свідчать дослідження, стандартні стратегії не завжди є достатньо ефективними, що спонукає до розроблення й впровадження спеціалізованіших СРР. Однією з них є стратегія на основі самоорганізаційних карт Кохонена (СКК). СКК – це вид штучної нейронної мережі, що належить до нерегламентованого навчання (навчання без учителя). У такій мережі кожен вхідний век-

тор (наприклад, набір характеристик контейнера) проектується на n-вимірну карту, утворюючи кластери подібних векторів без попередньо заданих класів.

СРР, що базується на самоорганізаційних картах Кохонена, дає змогу обирати фізичну локацію вузла в кластері, використовуючи подібність конфігурацій контейнерів. Показником подібності слугує набір властивостей, якими описується контейнер, наприклад: кількість оперативної пам'яті (ОП), кількість ядер центрального процесора (ЦП) чи то обсяг фізичної пам'яті на диску. Крім цього, СКК задається набором функціональних параметрів (як-от метод навчання, початкова ініціалізація вагових коефіцієнтів, функція пошуку відстані між вектором параметрів контейнера та нейронами карти, функція обмеження топологічної околиці нейронів, функція швидкості навчання СКК тощо), що впливає на те, як карта навчається й далі групує компоненти.

Процес пошуку вузла з використанням СРР на базі СКК можна описати так (Рис. 1):

– створюється СКК із кількістю нейронів, що дорівнює кількості вузлів у кластері;

– здійснюється навчання СКК згідно із заданими функціональними параметрами;

– для кожного нового запиту на розподілення ресурсів визначається вектор параметрів контейнера, який адаптується за тим самим алгоритмом, що й під час навчання;

– виконується ранжування всіх вузлів на основі відстані до нейронів карти;

– обирається той вузол (згідно з функцією відстані), що найбільше відповідає конфігурації контейнера і має достатньо ресурсів для його розміщення.

Важливо зазначити, що в цьому алгоритмі основну роль у виборі вузла відіграють: параметри налаштування СКК, характеристики самого контейнера, фактична наявність фізичних ресурсів безпосередньо на вузлі. Топологія кластеру (наприклад, порядок розміщення вузлів) у такій базовій реалізації не враховується.

Розгляньмо приклад двох різних топологій кластеру із двома вузлами (максимальна місткість – 5 ГБ та 3 ГБ ОП відповідно), які відрізняються порядком розміщення цих вузлів. Припустімо, що спочатку розміщуємо контейнер із вимогою 3 ГБ ОП і СРР обирає перший вузол для його розміщення, тоді маємо наступний стан кластеру (Рис. 2).

Якщо наступним контейнером в динамічній послідовності буде контейнер з вимогами 5 ГБ,

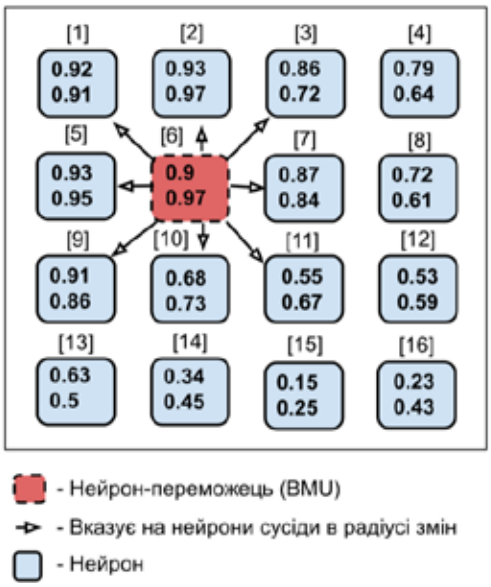


Рис. 1. Приклад структури СКК з топологією квадратної матриці для вектору вхідних даних з двох параметрів

то у випадку першої топології, такий контейнер можна буде розмістити на другому вузлі, тоді як у випадку другої топології, в кластері недостатньо місця для його розміщення. Якщо ж повна динамічна послідовність сформована з наступних вимог: 3 ГБ, 5 ГБ, 3 ГБ, 2 ГБ, то у випадку першої топології загальна кількість розміщених контейнерів буде 2 (3 ГБ та 5 ГБ), тоді коли у випадку другої топології загальна кількість розміщених контейнерів буде 3 (3 ГБ, 3 ГБ, 2 ГБ).

Оскільки СОВК можуть застосовуватися для найрізноманітніших завдань та мають різні цілі, кожен із наведених варіантів може виявитися бажаним в окремій ситуації. Водночас можна припустити, що ефективність СРР для конкретної ситуації можна підвищити, якщо стратегія розподілення буде брати до уваги топологію кластеру.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для проведення дослідження варто звернути увагу на метод запропонований Воєводіним Є. В. та Розломій І. О. [1], який детально описує алгоритм тестування СРР із врахуванням різноманітних цільових параметрів. Приміром, цей метод описує компонент (генератор топологій), який дає змогу експериментувати з різними топологіями кластеру порівнюючи ефективність результатів розподілення. Хоча даний метод є лімітованим з точки зору кількості топологій, для яких можна провести есперимент, оскільки результат для кожної з топологій зберігається для подальшого представлення. Автори наголошують, що тестування

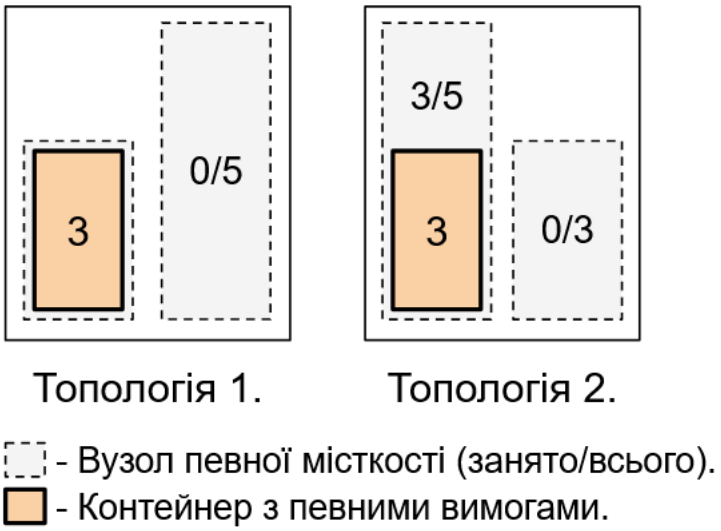


Рис. 2. Приклад розміщення послідовності контейнерів у кластерах з однаковою місткістю вузлів, але з різним порядком

стратегій розподілення є нетривіальним завданням, оскільки потребує врахування можливої варіативності поведінки стратегій та систем які використовують СОВК.

В іншій своїй роботі Воєводін Є. В. та Авраменко В. С. досліджують вплив топологій СКК на ефективність процесу розподілення [2]. Вони демонструють, що вибір топології карти по-різному позначається на ефективності розподілення за різних умов. Наприклад, одновимірна топологія краще працює для кластерів із невеликою кількістю вузлів, тоді як для більших кластерів ефективнішою є топологія квадратної матриці.

Огляд можливостей СОВК у сучасних системах (зокрема Kubernetes, Docker Swarm, Apache Mesos) подано у роботі Е. Труєна та ін. [3]. Автори висвітлюють різноманітні функціональні можливості цих систем, а також визначають спільні елементи, серед яких: наявність кластеру представленому у вигляді набору вузлів з певними вимогами; компонент, що відповідає за балансування ресурсів (тобто СРР). Аналогічне порівняння СОВК Р. Файос-Джордан та ін. і в проводять в своєму досліджені [4], але з акцентом на кластери з маломісткими вузлами.

Актуальність напрямку дослідження також підтверджують публікації, присвячені створенню СРР з використанням машинного навчання [5], застосуванню мурашиного алгоритму [6] для підвищення ефективності розподілення ресурсів, а також упровадженню методів багатоцільової оптимізації [7].

Постановка завдання. Продемонструвати, як топологія кластеру впливає на ефективність розподілення ресурсів на прикладі стратегії із використанням СКК. Запропонувати розширений метод для порівняння ефективності СРР із урахуванням ранжування результатів залежно від топології.

Виклад основного матеріалу. Для проведення експериментів буде використовуватись наступна конфігурація самоорганізаційної карти (якщо окремі модифікації не зазначені).

Евклідова відстань як функція пошуку відстані:

$$d(\vec{x},\vec{w}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_i - w_i)^2},$$

де $\vec{x}$ – вектор вхідних даних, $\vec{w}$ – вектор вагових коефіцієнтів нейрона, N – кількість параметрів якими описується карта (кількість елементів вектору).

Функція Гауса для обмеження топологічної околиці навчання:

$$h_{bj}(t) = \mathrm{e}^{-\frac{d^2}{2\left(\sigma e^{-\frac{t}{T}}\right)^2}},$$

де h_{bj} – описує на скільки змінюється нейрон за індексом j в залежності від того як далеко він знаходиться від нейрона переможця за індексом с (найближчого нейрона відповідно до функції відстані), d – відстань між нейронами за індексами b та j, t – ітерація навчання, T – загальна кіль-

кість ітерацій, σ – початкова ширина топологічної околиці.

Функцію експоненціального розпаду, для контролю швидкості навчання, з дещо іншими параметрами відмінно від використаної у функції обмеження топологічної околиці:

$$\alpha(t) = a_0 e^{-\frac{t}{k}},$$

де a_0 – початкове значення швидкості навчання, k – стале значення, яке контролює як швидко змінюється значення функції відповідно до ітерації t.

Корегування вагових коефіцієнтів кожного з нейронів карти здійснюється за наступною формулою:

$$\vec{w}_j(t+1) = \vec{w}_j(t) + \alpha(t) h_{bj}(t)\left[\vec{x}(t) - \vec{w}_j(t)\right],$$

де j – індекс нейрона в карті, t – ітерація навчання, b – індекс нейрона переможця на даній ітерації відповідно до вхідного вектору даних $\vec{x}$, та решта попередньо визначені функції. Навчання карти здійснюється на послідовності векторів на основі параметрів початково заданої послідовності, повтореної 1000 разів, тобто $T = 1000$.

Для оцінки якості розподілення ресурсів у кластері як цільову метрику пропонується використовувати коефіцієнт заповненості (що коливається в межах від 0 до 1 і фактично відображає відсоток використання ресурсів у кластері). Чим вищий цей коефіцієнт, тим кращим є результат розподілення, адже при високому рівні заповненості зменшується зовнішня дефрагментація ресурсів.

Проведемо перший експеримент. Спочатку оберемо одновимірну топологію СКК та кластер, що складається з чотирьох вузлів: два з них мають обсяг 6 ГБ, інші ж 2 – 10 ГБ. Використовуючи СРР на основі описаної СКК, виконаємо розподіл послідовності контейнерів із вимогами 5 ГБ, 3 ГБ, 5 ГБ, 3 ГБ, повторюючи її доти, доки в кластері не залишиться достатньо ресурсів для розміщення контейнера з мінімальною конфігурацією – 3 ГБ. Після цього перевіримо рівень дефрагментації для різних топологій кластеру: 10 ГБ, 6 ГБ, 6 ГБ, 10 ГБ та 10 ГБ, 10 ГБ, 6 ГБ, 6 ГБ, 10 ГБ (Рис. 3). Вагові коефіцієнти нейронів карти залишаються однаковими для обох топологій.

У підсумку бачимо, що в першій топології вдалося розмістити 8 контейнерів, використавши при цьому всі доступні ресурси кластеру. Відповідно, зовнішня дефрагментація становить 0%. Натомість у другій топології вдалося розмістити 7 контейнерів, причому кластер заповнений на 91%, тобто 9% ресурсів залишаються невикористаними до зупинки якогось із контейнерів.

Для визначення найбільш придатної топології під конкретну стратегію можна створити генератор топологій, який (відповідно до описаного механізму проведення експерименту [1, с. 62]) генерує унікальні перестановки вузлів у кластері. Зокрема, для цієї мети можна скористатися алгоритмом Джонсона – Троттера [8, с. 215], що дає змогу ефективно отримати всі можливі унікальні перестановки.

Проведемо другий експеримент для СРР на базі СКК, застосовуючи топологію квадратної матриці та збільшуючи кількість вузлів до 9, серед яких 3 мають обсяг 10 ГБ, а 6 – 6 ГБ. Використовуючи описаний процес генерації, перевіримо всі унікальні топології кластеру, орієнтуючись на коефіцієнт заповненості (Рис. 4).

З отриманих результатів видно, що у більшості згенерованих топологій заповненість кластеру

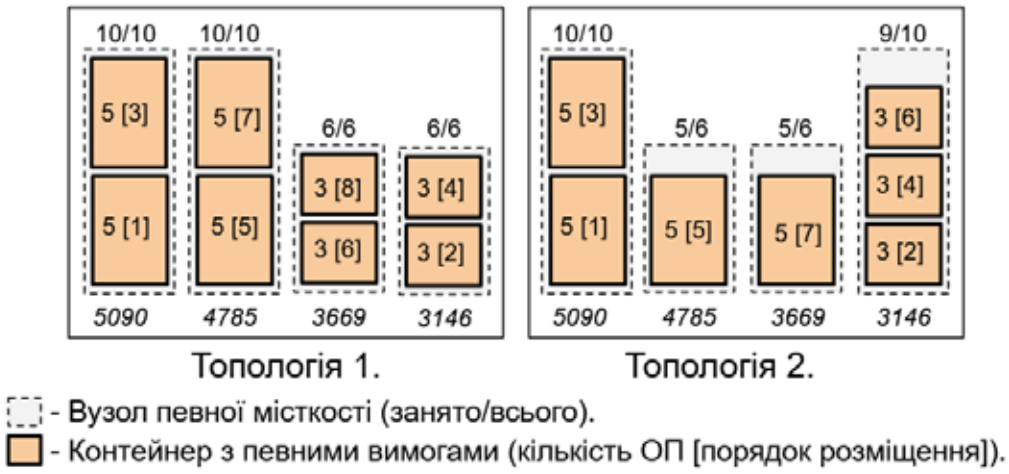


Рис. 3. Заповненість кластерів в результаті проведення першого експерименту

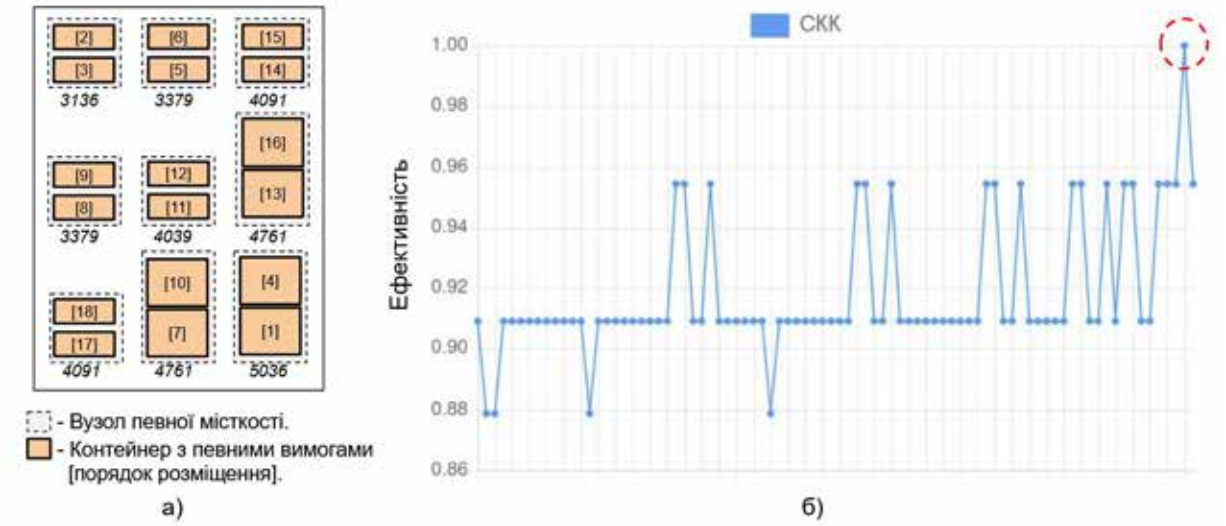


Рис. 4. а) Результат розподілення для найбільш оптимальної топології; б) Ефективність заповнення для кожної згенерованої топології

перебуває близько 90%, тоді як лише в одному випадку кластер було заповнено на 100%, найгіршим результатом є 88%. Окрім того, маючи змогу згенерувати всі унікальні топології можна знайти найбільш підходящу. Саме це й підтверджує проведений експеримент: серед усіх можливих варіантів знаходиться така топологія, що забезпечує 100% заповнення кластеру, і, відповідно, найвищу ефективність розподілення ресурсів.

Оскільки метою експерименту є відшукати таку топологію, що дає змогу досягти максимальної ефективності, доцільно модифікувати попередньо запропонований алгоритм і додати спеціальний компонент для порівняння та відсівання результатів із гіршими показниками (Рис. 5). Завдяки цьому можна буде знайти найбільш оптимальні топології навіть серед сотень можливих варіантів. Особливо це актуально тоді, коли контейнери та вузли описуються кількома параметрами, що збільшує загальну кількість унікальних топологій (адже вузол із 10 ГБ ОП та 6 ЦП відрізняється від вузла з 10 ГБ ОП та 8 ЦП). Такий компонент може керуватися різними критеріями ефективності, а також поєднувати їх, наприклад, орієнтуватися на мінімальний рівень зовнішньої дефрагментації та при однаковому його значенні порівнювати кількість відхилених запитів на розподіл ресурсів, – менша кількість відхилень засвідчує вищу ефективність. Крім того, можна взяти до уваги й відмовостійкість системи, порівнюючи різні топології за цим параметром.

Також варто зазначити, що цей алгоритм можна покращити, виконавши експеримент паралельно – як на одному обчислювальному пристрої, так і в межах розподіленої системи. Наприклад, якщо є два вузли, можна розподілити набір усіх топологій навпіл: першу частину згенерувати та перевірити на першому вузлі, а решту – на другому. Згодом результати з обох вузлів об'єднують, керуючись тим самим принципом, що описаний в алгоритмі. Скажімо, якщо потрібно знайти 10 найефективніших топологій, то можна обрати по 10 найкращих із за результатами роботи кожного з вузлів.

Висновки. У цій статті продемонстровано, що топологія кластеру здатна істотно впливати на ефективність розподілення ресурсів у СОВК. На прикладі стратегії, побудованої на СКК, показано, що навіть при однакових налаштуваннях СКК різний порядок розташування вузлів може призвести до істотних відмінностей у рівні зовнішньої дефрагментації. Отримані результати показують, що в межах одного експерименту така різниця може досягати 10% і більше.

В статті також було запропоновано метод для поліпшення оцінки ефективності різних стратегій розподілення:

– розширити метод тестування за допомогою підтримки генерації всіх унікальних перестановок вузлів у кластері;

– додати компонент порівняння та відсіювання менш ефективних результатів, що дає змогу швидше знайти найбільш оптимальні топології серед великої кількості варіантів, не зберігаючи та не аналізуючи проміжні результати;

– використовувати багатокритеріальні показники для оцінювання, зокрема одночасно врахову-

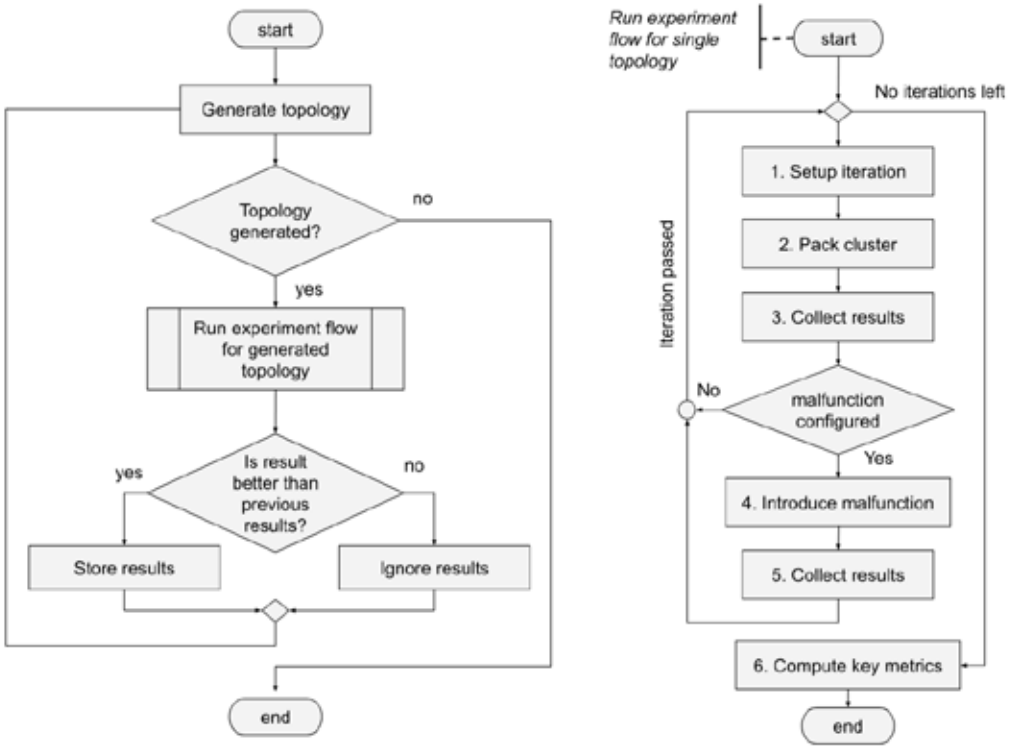


Рис. 5. Модифікований алгоритм проведення експериментів для пошуку оптимальних топологій кластеру

вати рівень зовнішньої дефрагментації, кількість відхилених запитів, відмовостійкість системи та інші показники ефективності;

– оптимізувати процес експерименту через паралельне чи розподілене виконання, що прискорює перебір великої кількості конфігурацій.

Отримані результати підтверджують важливість урахування топології кластеру для підвищення загальної ефективності СОВК.

Список літератури:

1. Voievodin Y., Rozlomii I. Advanced software framework for comparing balancing strategies in container orchestration systems. *Empowering the Edge: Research advances from doors 2024*. 2024. Vol. 3666. P. 60–69.

2. Воєводін Є., Авраменко В. Порівняння ефективності топологій самоорганізаційних карт Кохонена в системах оркестрування віртуальних контейнерів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені ВІ Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. № 29. С. 99–105.

3. A Comprehensive Feature Comparison Study of Open-Source Container Orchestration Frameworks / E. Truyen et al. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, no. 5. P. 931. URL: https://doi.org/10.3390/app9050931 (date of access: 28.01.2025).

4. Performance comparison of container orchestration platforms with low cost devices in the fog, assisting Internet of Things applications / R. Fayos-Jordan et al. *Journal of Network and Computer Applications*. 2020. Vol. 169. P. 102788. URL: https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102788 (date of access: 28.01.2025).

5. Machine Learning-based Orchestration of Containers: A Taxonomy and Future Directions / Z. Zhong et al. *ACM Computing Surveys (CSUR)*. Vol. 54, no. 10. P. 1–35.

6. Kaewkasi C., Chuenmuneewong K. Improvement of container scheduling for Docker using Ant Colony Optimization. *2017 9th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST)*. 2017. P. 254–259.

7. A new container scheduling algorithm based on multi-objective optimization / B. Liu et al. *Soft Comput*. 2018. Vol. 22. P. 7741–7752.

8. Bird R. Pearls of Functional Algorithm Design. Cambridge University Press, 2010.

Voievodin Ye.V., Stabetska T.A., Rozlomii I.O. **THE IMPACT OF CLUSTER TOPOLOGY ON THE EFFICIENCY OF RESOURCE DISTRIBUTION USING KOHONEN SELF-ORGANIZING MAPS IN CONTAINER ORCHESTRATION SYSTEMS**

This paper examines the impact of cluster topology on the efficiency of resources distribution in container orchestration systems. Using examples based on the balancing strategy that utilizes Kohonen self-organizing map, it demonstrates how different node arrangements can influence usage of cluster resources and impact other key efficiency metrics.

Various aspects of configuring the self-organizing map are discussed, including the dimensionality of the map (one-dimensional, two-dimensional, etc.), distance functions, and methods for determining weight coefficients. The training process of the map is explained in detail, emphasizing how neuron weigh coefficients are established during this stage. These coefficients directly affect which nodes are chosen for container placement. Depending on the topology of the cluster, a container may be assigned to a node that lacks sufficient resources, which increases the risk of resource depletion or impacts other metrics, such as the number of failed balancing requests.

The analysis shows that with identical self-organizing map configurtation and the same balance requests sequence, certain topologies can achieve more than a 10% increase in resource usage efficiency compared to others. To enhance the accuracy of evaluation, the previously introduced testing method has been extended to examine and compare a large number of node arrangement variants according to various criteria, including the efficient use of cluster resources, the number of rejected balancing requests, and system fault tolerance. The paper also considers parallel and distributed approaches to running experiments, which helps reduce computation time and enables a more rapid identification of the most suitable cluster topologies.

*The methodology and experimental findings described here are of interest to researchers who seek to improve resource allocation efficiency in container orchestration systems***.**

Key words: *container orchestration systems, virtualization, distributed systems, neural networks, Kohonen self-organizing maps***.**

УДК 001.89:004.31
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/07

Глухова Н.В.
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

РОЗРОБКА МЕТОДОЛОГІЇ АВТОМАТИЗОВАНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ У ВИГЛЯДІ ЗОБРАЖЕНЬ, ОТРИМАНИХ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ

У статті виконаний огляд сучасних підходів щодо обробки і аналізу зображень, які реєструються та підлягають опрацюванню в ході вимірювальної процедури. Виділено основні етапи обробки і аналізу зображень, які можуть включати процедури попередньої обробки зображень, визначення їх значущих характеристик.

Широкий спектр існуючих методів обробки зображень обумовлює необхідність формування певної методології для аналізу зображень з урахуванням мети досліджень таким чином, щоб це вирішувало завдання раціонального вибору набору методів, які у підсумку забезпечують виділення кількісних ознак зображень і виступають характеристиками об'єкта досліджень, що корелюють з поставленою метою.

Оскільки інформаційно-вимірювальна технологія, складовою частиною якої виступає автоматизована комп'ютерна обробки зображень, повинна забезпечувати розв'язок завдання виділення інформативних ознак з візуальних даних у відповідності до поставленої мети, то обрані методи обробки зображень повинні охоплювати різні стадії реєстрації і аналізу зображень таким чином, щоб забезпечувалась можливість вибору параметрів реєструючої апаратури для отримання належної якості зображень.

У роботі запропоновано основні етапи та відповідні методи обробки зображень при застосуванні методу газорозрядного випромінювання для дослідження властивостей води та водних розчинів. Метод газорозрядного випромінювання базується на активному впливі зовнішнього імпульсного електромагнітного поля на зразок досліджуваної рідини, тому вибір параметрів реєструючої апаратури при формуванні електромагнітного поля впливає на геометричні та фотометричні характеристики зображень. Метод обробки зображень на базі побудови гістограм забезпечує виділення фотометричних характеристик зображення і може застосовуватись при кількісному аналізі інтенсивності газорозрядного випромінювання, яка варіюється у залежності від встановлених параметрів імпульсного електромагнітного поля.

У роботі запропонований метод кількісного аналізу параметрів гістограм зображень газорозрядного випромінювання, який забезпечує вибір оптимальних параметрів реєструючої апаратури.

Ключові слова: *обробка зображень, інформаційно-вимірювальна технологія, методологія наукових досліджень, газорозрядне випромінювання.*

Постановка проблеми. Методи вимірювань та експериментальних досліджень, які засновані на реєстрації та обробці зображень, на сьогоднішній день є дуже розповсюдженими у різних галузях науки і техніки та мають суттєві перспективи подальшого розвитку, оскільки здатні забезпечити отримання вимірювальної інформації як у якісній, так і у кількісній формі, а також сприяють можливостям всебічного інтегрального вивчення властивостей багатьох об'єктів досліджень.

У галузі автоматизації та інформаційно-вимірювальних технологій на практиці переважно застосовуються методи вимірювань, які забезпечують отримання результатів вимірювань у вигляді кількісних оцінок окремих параметрів, які характеризують певний об'єкт, процес або явище. Широке практичне впровадження методів вимірювань, які передбачають реєстрацію і аналіз зображень, довгий час гальмувалось обмеженими можливостями інформаційно-вимірювальних технологій, пов'язаних з необхідністю реєстрації, зберігання, передачі та обробки великих обсягів даних у вигляді візуальної інформації. Методи вимірювань з реєстрацією зображень, як правило, застосовувались лише у вузьких специфічних галузях, наприклад, технічна діагностика або медична діагностика на базі отримання зображень на рентгенівській плівці.

В останні роки проблеми зберігання, передачі та обробки великих обсягів вимірювальної інформації у вигляді зображень фактично зникли за рахунок усунення відповідних технічних обмежень. Тому актуальним виявляється наукове завдання систематизації існуючих розробок у сфері удосконалення методології автоматизованої обробки результатів експериментальних досліджень, зареєстрованих у вигляді зображень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день відомий широкий спектр методів обробки і аналізу зображень, але завдання обгрунтованого вибору певної методології для розв'язку конкретного питання наукових досліджень виявляється нетривіальним завданням, оскільки залежить не тільки від особливостей експериментальних даних у вигляді зображень, але й визначається метою досліджень.

На сучасному етапі розвитку інформаційно-вимірювальних технологій методи вимірювань та контролю стану об'єктів впроваджуються у різних сферах наукової діяльності, виробництва, екології та медицини. Це пов'язано не тільки з постійно зростаючими технічними можливостями, але й одночасно з розвитком математичних методів, засобів штучного інтелекту в галузі обробки зображень.

При цьому, на підставі вивчення літературних джерел, можна виділити різні напрямки теоретичних досліджень щодо удосконалення методів реєстрації, обробки і аналізу зображень. Зокрема, доцільно звернути увагу на відмінність тлумачення понять «обробка зображень» і «аналіз зображень».

Під процедурою обробки зображень розуміють метод або сукупність методів, які призначені для перетворення первинних зареєстрованих зображень і передбачають обробку для реалізації конкретної мети модифікації зареєстрованого зображення [1]. Під процедурою аналізу зображень розуміється «витяг значущої інформації з зображень» [2]. При цьому, з метою здійснення аналізу зображень можуть застосовуватись різні методи обробки зображень або їх сполучення.

Таким чином, аналізуючи значущі для практичного впровадження відмінності між цими термінами, можна відзначити, що процедура аналізу зображень є більш складною, оскільки вимагає не тільки застосування методів обробки зображень, наприклад бінаризації або видалення шумів, але й чіткого формулювання мети аналізу зображень, визначення які саме дані, що містяться у зображенні є значущими з точки зору реалізації конкретної процедури вимірювань або контролю характеристик об'єкту досліджень. Останнє як раз підкреслює нетривіальність розв'язку завдання аналізу зображень з наукової точки зору, що для складних об'єктів досліджень може передбачати багатоетапну процедуру щодо достовірного визначення значущих параметрів зображень для даної мети досліджень.

Якщо проаналізувати існуючі теоретичні та прикладні дослідження в галузях обробки і аналізу зображень, то стає зрозумілим, що визначення певних універсальних підходів щодо аналізу зображень є складним питанням з огляду на дуже широкий спектр завдань і різноманітну специфіку цілей аналізу зображень в різних галузях. Одночасно з тим, особливості об'єктів досліджень та специфіка цілей аналізу зображень обумовлює різноманіття методів обробки зображень.

З іншого боку, слід відзначити, що є і певні загальні методи обробки зображень, які використовуються при вирішенні типових завдань у різних галузях. Насамперед це стосується так званого «первинного» етапу обробки зображень, коли загальне завдання на цьому етапі формулюється як покращення зображень (наприклад, видалення шумів, пов'язаних з недосконалістю технічних засобів для реєстрації зображень тощо). На цьому першому етапі часто застосовується підхід, заснований на використанні гістограми зображення [3-6]. У залежності від мети досліджень застосовуються також інші підходи, наприклад текстурний аналіз [7-8], методи штучного інтелекту [9-12] тощо.

Постановка завдання. На підставі вивчення існуючих наукових результатів щодо обробки і аналізу зображень сформульовано завдання формування основних напрямків щодо визначення методології автоматизованої обробки експериментальних даних у вигляді зображень, отриманих при дослідженні властивостей води та водних розчинів.

Виклад основного матеріалу. При виділенні значущих параметрів зображень необхідний детальний аналіз об'єкту досліджень (наприклад, його фізико-хімічних властивостей); вивчення умов проведення процедури реєстрації зображень (наприклад, дослідження можливого впливу на характеристики зображення умов проведення вимірювального експерименту з фіксацією зображення); врахування додаткових факторів, які могли виникнути під час передачі, зберігання, перетворення зображень і які потенційно можуть впливати на його характеристики.

Конкретний перелік методів обробки зображень, які доцільно включити до методології аналізу зображень, залежать також від рівня розв'язку завдання, а саме від етапів реалізації процедури вимірювань. Якщо аналізу підлягають зареєстровані зображення, то процедура, як правило включає основні два етапи: 1) покращення зображень; 2) вилучення з зображень значень певних параметрів у кількісній формі на підставі застосування одного або декількох методів обробки зображень.

Якщо у ході вимірювального експерименту є можливість втручатись у саму процедуру реєстрації зображень, тоді загальна методологія повинна включати також способи покращення зображень не тільки при їх обробці, але і при реєстрації, тобто на апаратному рівні. Відомим прикладом може бути вибір відповідного типу та параметрів освітлення. Але у залежності від способу реєстрації зображень можуть бути і більш складні випадки, коли на якість зображень впливає складна процедура їх реєстрації, що передбачає вибір методів регулювання параметрів реєструючої апаратури в ході вимірювального експерименту.

При дослідженні властивостей води та водних розчинів використовувався прилад для реєстрації газорозрядного світіння [13, 14]. Метод дослідження передбачає оптичну реєстрацію зображення, яке являє собою картину формування газових розрядів навколо зразка рідини, що з'являються в результаті проведення активного вимірювального експерименту при впливі імпульсного електромагнітного поля. В результаті проведених досліджень було встановлено, що на якість та інформативність отриманих у такий спосіб зображень впливає вибір параметрів реєструючої апаратури.

При застосуванні аналогової форми реєстрації зображень на рентгенівській плівці з метою визначення параметрів пристрою для отримання зображень газорозрядного випромінювання використовувалась побудова однієї гістограми для півтонового зображення на рентгенівській плівці. Вибір параметрів пристрою реєстрації здійснювався на підставі аналізу ширини гістограми півтонового зображення [14].

При використанні цифрової реєстрації зображень результатом є кольорове зображення, для якого будується три гістограми відповідно для трьох кольорів: червоний, зелений, синій (рис. 1-3).

Як видно з аналізу рис. 1-3, побудованих для різних рівнів інтенсивності газорозрядного випромінювання, підставою для визначення оптимальної інтенсивності газорозрядного випромінювання,

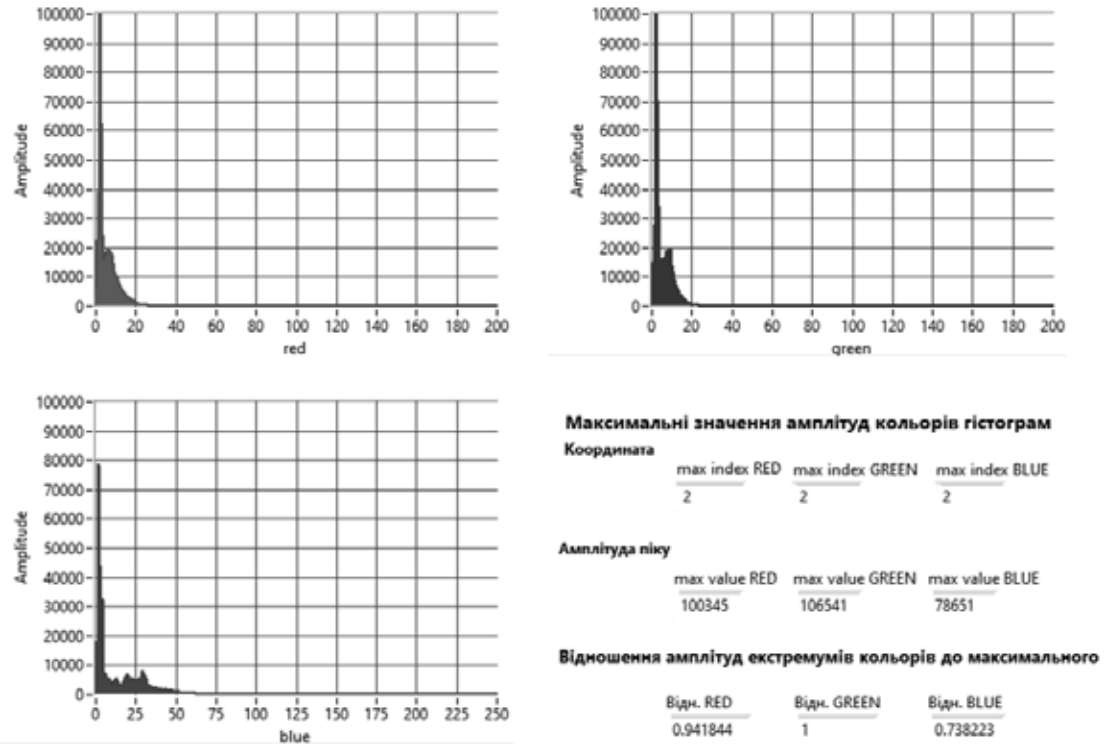


Рис. 1. Гістограми та їх параметри для зображення формування газових розрядів навколо зразка рідини з низькою інтенсивністю газорозрядного випромінювання

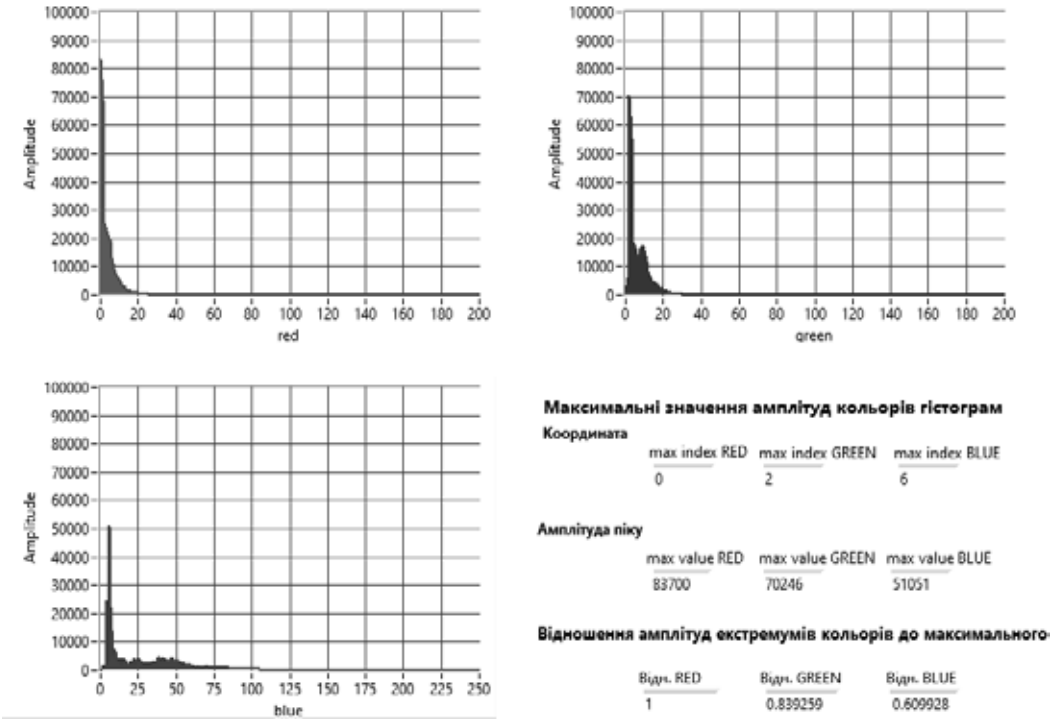


Рис. 2. Гістограми та їх параметри для зображення формування газових розрядів навколо зразка рідини з середньою інтенсивністю газорозрядного випромінювання

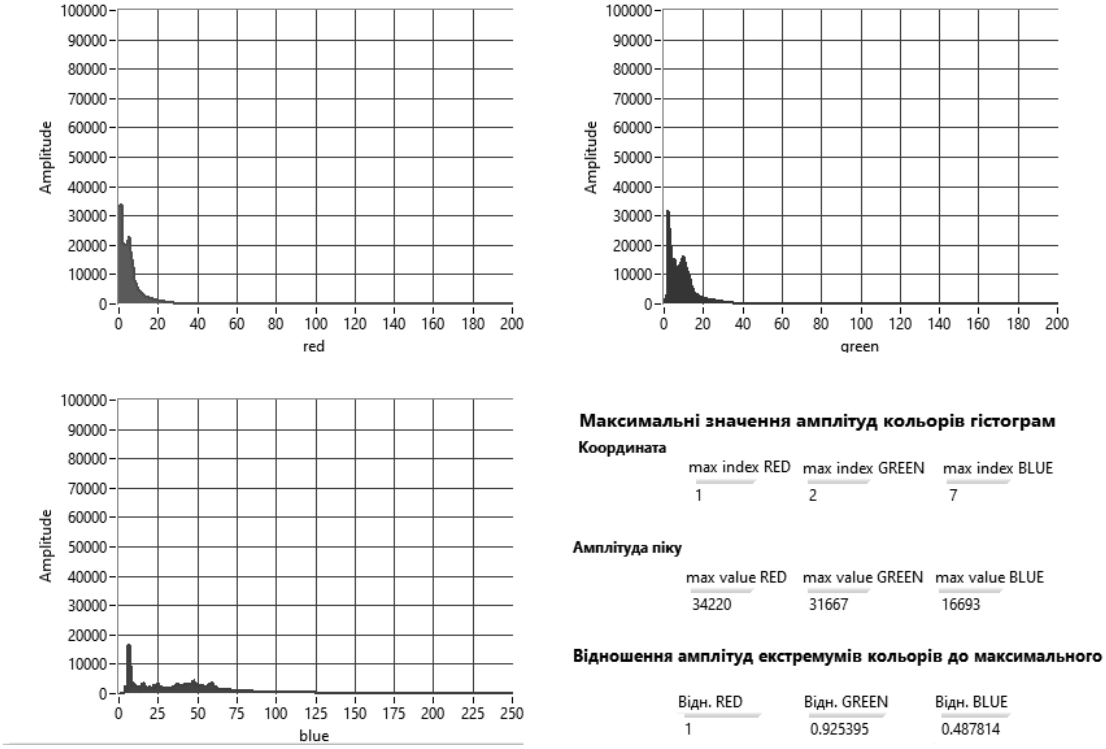


Рис. 3. Гістограми та їх параметри для зображення формування газових розрядів навколо зразка рідини з високою інтенсивністю газорозрядного випромінювання

може слугувати не тільки ширина гістограми, але й амплітуди піків для кольорів розкладання: при збільшенні інтенсивності газорозрядного випромінювання відбувається зменшення амплітуд екстремумів огинаючих гістограм.

На підставі експериментальних досліджень різних зразків розчинів рідини було сформовано рекомендації щодо вибору оптимальних режимів пристрою для реєстрації цифрових зображень газорозрядного випромінювання на підставі визначення кількісних характеристик для екстремумів гістограм. При реалізації експериментальних досліджень рекомендовано обирати параметри реєструючої апаратури, які забезпечують формування зображень з середньою або високою інтенсивністю газорозрядного випромінювання, оскільки низький рівень газорозрядного випромінювання не дозволяє виконувати подальший аналіз зображень з виділенням значущих параметрів, які характеризують фізико-хімічні та біологічні властивості водного розчину. Необхідність раціонального вибору параметрів реєструючої апаратури обумовлена особливостями формування газових розрядів [15].

Таким чином, методологія автоматизованого опрацювання експериментальних даних у вигляді зображень, отриманих при дослідженні властивостей водних розчинів, обов'язково повинна включати етап вибору параметрів реєструючої апаратури.

Подальші складові методології опрацювання експериментальних даних у вигляді зображень залежать від конкретизованої мети досліджень. При цьому слід мати на увазі, що метод газорозрядного випромінювання має порівняльний характер і вимагає залучення в ході експериментальних досліджень зразків рідини з відомими параметрами, наприклад, дистильованої води.

Подальші кроки аналізу зображень можуть включати кількісну оцінку окремих параметрів газорозрядних зображень водних розчинів, процедуру класифікації зображень тощо. Наприклад, для класифікації зображень газорозрядного випромінювання може застосовувати метод класифікації, заснований на побудові гістограм [16].

Висновки. В роботі представлено результати розробки методології автоматизованого опрацювання експериментальних даних у вигляді зображень, отриманих при дослідженні властивостей води та водних розчинів. З метою виконання досліджень властивостей водних розчинів застосовується метод газорозрядного випромінювання, який відноситься до групи методів активного вимірювального експерименту. Вимірювальна процедура з отриманням зображень реалізується за допомогою аналогових або цифрових реєструючих пристроїв.

Експериментальні дослідження як аналогової, так і цифрової форм реєстрації зображень свідчать про суттєвий вплив встановлених параметрів апаратури на якість отриманих зображень, оскільки картина формування газових розрядів навколо досліджуваного зразка рідини безпосередньо залежить від параметрів імпульсного електромагнітного поля, яке виконує активний вплив на досліджуваний зразок.

Для можливості вибору раціональних параметрів цифрової реєструючої апаратури було запропоновано включити до основних етапів обробки зображень процедуру визначення інтенсивності газорозрядного випромінювання на базі побудови гістограм зображень та обчислення кількісних значень амплітуд її екстремумів. Оскільки з метрологічної точки зору метод газорозрядного випромінювання має порівняльний характер, то необхідно зберігати встановлені параметри реєструючої апаратури незмінними в ході проведення вимірювальної процедури при реєстрації серії зображень, які на наступних етапах передбачають порівняльний аналіз і класифікацію.

Список літератури:

1. Huang Y. Overview of research progress of digital image processing technology. *In Journal of Physics: Conference Series*. 2022. December. Vol. 2386. N. 1, P. 012034. IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/2386/1/012034.

2. Solomon, C.J., Breckon, T.P. Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach with Examples in Matlab. Wiley-Blackwell. 2010. doi:10.1002/9780470689776.

3. Kaur S., Kumar P. Study on various techniques of image enhancement. *International Journal of Computer Applications*. 2017. Vol. 158. N. 10, pp. 11-13. https://www.ijcaonline.org/archives/volume158/number10/kaur-2017-ijca-912819.pdf.

4. Li Chong-Yi, et al. Underwater image enhancement by dehazing with minimum information loss and histogram distribution prior. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2016. 25 (12). pp. 5664-5677.

5. Wei, W., Xu, X., Hu, G., Shao, Y., & Wang, Q. Deep Learning and Histogram-Based Grain Size Analysis of Images. *Sensors*. 2024. 24(15), 4923. https://doi.org/10.3390/s24154923.

6. Burger Wilhelm, Burge Mark J. Histograms and image statistics. In: Digital image processing: An algorithmic introduction. *Cham: Springer International Publishing*. 2022. p. 29-48.

7. Dhabliya Dharmesh, et al. A Comparative Analysis of Texture Analysis Methods for Image Retrieval. In: *2024 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*. IEEE. 2024, p. 1-5.

8. Vilmun B. M., Napolitano G., Lauritzen A., Lynge E., Lillholm M., Nielsen M. B., Vejborg I. Clinical Significance of Combined Density and Deep-Learning-Based Texture Analysis for Stratifying the Risk of Short-Term and Long-Term Breast Cancer in Screening. *Diagnostics*. 2024. 14(16), 1823.

9. Nain V., Shyam H. S., Kumar N., Tripathi P., Rai M. A study on object detection using artificial intelligence and image processing–based methods. *Mathematical Models Using Artificial Intelligence for Surveillance Systems*. 2024, pp.121-148.

10. Rudnicka Z., Szczepanski J., Pregowska A. Artificial Intelligence-Based Algorithms in Medical Image Scan Segmentation and Intelligent Visual Content Generation–A Concise Overview. *Electronics*. 2024. N. 13(4), 746.

11. Vitali C., Peters R. J., Janssen H. G., Undas A. K., Munniks S., Ruggeri F. S., Nielen M. W. Quantitative image analysis of microplastics in bottled water using artificial intelligence. *Talanta*, 2024. N. 266, 124965. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.124965.

12. Albano Domenico, et al. Artificial intelligence for radiographic imaging detection of caries lesions: a systematic review. *BMC Oral Health*. 2024. 24(1). 274.

13. Пісоцька Л.А., Чурилов В.В., Мінцер О.П., Глухова Н.В., Гулевська Г.І. Апаратно-програмний комплекс дослідження якості рідиннофазних об'єктів. Пат. на корисну модель № 151195 Україна. Заявлено 28/12/2021; опубл. 15/06/2022, Бюл. № 24, 4 с.

14. Пісоцька Л.А., Чурилов В.В., Глухова Н.В., Гулевська Г.І., Ігнатов І.І. Пристрій для реєстрації газорозрядного світіння різноманітних об'єктів «РГС-1». Пат. на корисну модель № 153884 Україна. Заявлено 18/01/2023; опубл. 13/09/2023, Бюл. № 37, 5 с.

15. Глухова Н.В. Комп'ютерно-інтегрована технологія дослідження процесів емісії носіїв заряду з поверхні рідиннофазного об'єкту // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – Том 34 (73). – № 5. – 2023. – С. 122-127. DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/20

16. Glukhova N., Pesotskaya L., Krachunov H. Development of a methodology for processing experimental studies of liquid-phase objects. *Grundlagen der modernen wissenschaftlichen Forschung: der Sammlungwissenschaftlicher Arbeiten «ΛΌΓΟΣ» zu den Materialien der VI Internationalen wissenschaftlich-praktischen Konferenz*, Zürich, 24. Mai, 2024. Zürich-Vinnytsia: BOLESWA Publishers & UKRLOGOS Group LLC. P.156-158.

Glukhova N.V. DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR AUTOMATED PROCESSING OF EXPERIMENTAL DATA IN THE FORM OF IMAGES OBTAINED DURING THE STUDY OF THE PROPERTIES OF AQUEOUS SOLUTIONS

The article reviews modern approaches to the processing and analysis of images that are registered and subject to processing during the measurement procedure. The main stages of image processing and analysis are highlighted, which may include procedures for pre-processing images, determining their significant characteristics.

A wide range of existing image processing methods necessitates the formation of a certain methodology for image analysis taking into account the purpose of the research in such a way that it solves the problem of rational selection of a set of methods that ultimately provide for the selection of quantitative features of images and act as characteristics of the object of research that correlate with the set goal.

Since information and measurement technology, an integral part of which is automated computer image processing, must provide a solution to the problem of selecting informative features from visual data in accordance with the set goal, the selected image processing methods must cover different stages of image registration and analysis in such a way that it is possible to choose the parameters of the recording equipment to obtain proper image quality.

The paper proposes the main stages and corresponding methods of image processing when using the gas-discharge radiation method to study the properties of water and aqueous solutions. The gas-discharge radiation method is based on the active influence of an external pulsed electromagnetic field on a sample of the liquid under study, therefore, the choice of recording equipment parameters when forming the electromagnetic field affects the geometric and photometric characteristics of images. The image processing method based on histogram construction provides the selection of photometric characteristics of the image and can be used

in the quantitative analysis of the intensity of gas-discharge radiation, which varies depending on the set parameters of the pulsed electromagnetic field.

The paper proposes a method for quantitative analysis of the parameters of histograms of gas-discharge radiation images, which provides the selection of optimal parameters of the recording equipment.

Key words: *image processing, information and measuring technology, scientific research methodology, gas-discharge radiation.*

УДК 004.42
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/08

Голубєв Л.П.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ківа І.Л.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ДАНИХ, ОТРИМАНИХ ВІД ВИДАЛЕНИХ ДЖЕРЕЛ, ЗА ДОПОМОГОЮ СЕРВІСУ DWEET.IO

У статті розглянуто процес візуалізації даних, що надходять від віддалених джерел (датчиків), використовуючи інтернет-сервіс Dweet.io.

Проведено аналіз існуючих інструментів візуалізації даних та розглянуто їх особливості, але вони переважно орієнтовані на візуалізацію даних, які вже збережені в наборах даних. Однак, на практиці дуже часто виникає необхідність виконати візуалізацію даних, що надходять від віддалених джерел в реальному часі. Для вирішення цього завдання авторами запропоновано використати інтернет-сервіс Dweet.io.

Dweet.io – це хмарний сервіс, розроблений для спрощення роботи з даними, що отримуються від різних пристроїв та сенсорів у реальному часі. Він заснований на концепції «dweet» – простого способу відправлення даних з пристроїв у хмару, де вони можуть бути легко доступними та візуалізованими.

Візуалізацію даних розглянуто на прикладі отримання даних про температуру та вологість від віддалених датчиків за допомогою каналів Wi-Fi, запис їх на сервери сервісу Dweet.io. та побудови графіка зміни даних у реальному часі.

Система спроектована на базі мікроконтролера ESP-32, розробленого компанією Espressif Systems, і забезпечує високу продуктивність та необхідні мережеві інтерфейси. Як віддалений датчик температури та вологості було використано датчик DHT-22, який має підвищену точність вимірювань і не велике енергоспоживання. Імітацію роботи системи було виконано за допомогою інтернет-сервісу WokWi.

Система передає дані про температуру та вологість з датчика DHT-22 по мережі інтернет на сервер платформи Dweet.io у вигляді «dweet» за допомогою простого HTTP-запиту. Інтернет-сервіс Dweet.io зберігає отримані дані та відображає їх у вигляді графіка.

На відміну від існуючих систем візуалізації даних (thingspeak, open remote та ін.) Dweet.io дозволяє дуже просто (навіть без реєстрації користувача) та безкоштовно працювати з віддаленими даними.

Ключові слова: *візуалізація даних, сервіс Dweet.io, мікроконтролер ESP-32, датчик DHT-22.*

Постановка проблеми. У світі, насиченому даними, візуалізація стає ключовим інструментом для аналізу та інтерпретації інформації. Вона дозволяє перетворити складні набори даних у наочні графіки та діаграми, що робить інформацію більш доступною та зрозумілою.

Візуалізація даних – це процес представлення даних у графічній чи візуальній формі. Це може бути зроблено за допомогою різних методів, таких як графіки, діаграми, карти та інфографіки. Основна мета візуалізації – полегшити розуміння великих обсягів інформації та виявлення закономірностей, трендів та аномалій.

Існує багато інструментів для візуалізації та аналізу даних, таких як:

• Tableau: потужний інструмент для бізнес-аналізу, який дозволяє створювати інтерактивні графіки та дашборди;

• Power BI: програмне забезпечення від Microsoft, яке надає можливості для аналізу та візуалізації даних.

• Google Data Studio: безкоштовний інструмент для створення звітів та дашбордів на основі різних джерел даних.

Також існують інші спеціалізовані інструменти візуалізації даних, одержуваних від пристроїв IoT, типу thingspeak, open remote, adafruit та ін. Проте, їх особливістю є те, що вони надають сервіс на основі свого протоколу і своїх процедур, що вимагає від користувача часу та зусиль щодо їх вивчення, а також необхідність реєстрації на сервісах і, як правило, відсутність безкоштовного режиму роботи. Тому автори запропонували використовувати для візуалізації віддалених даних підхід, що ґрунтується на використанні простого та інтуїтивно зрозумілого

інструменту візуалізації, заснованого на використанні сервісу Dweet.io.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Візуалізація даних дозволяє перетворити складні набори даних на наочні графіки та діаграми, що робить інформацію більш доступною та зрозумілою. Питанням візуалізації останнім часом приділяється велика увага.

Однак більшість публікацій присвячено методам візуалізації даних, створенню різного типу діаграм та їх дизайну [1, 3, 6, 7].

Питанням аналізу даних та їхньої візуалізації за допомогою MS-Excel присвячені роботи наступних авторів [5, 9, 11, 12].

У роботі [2] автором розглянуто так звану ефективну візуалізацію – найкращий спосіб передачі інформації з великих і складних наборів даних у природничих та соціальних науках. Але зі зростанням потужності програмного забезпечення для візуалізації сьогодні вченим, інженерам та бізнес-аналітикам часто складно орієнтуватися у величезному масиві варіантів та опцій візуалізації.

Джонатан Швабіш у книзі [4] докладно описує основні стратегії для створення більш ефективних візуалізацій даних та розглядає етапи створення кращих графіків та того, як вийти за рамки простих лінійних, стовпчастих та кругових діаграм. На більш ніж п'ятистах прикладах він демонструє принципи візуального сприйняття і як приймати суб'єктивні рішення про стиль дизайну діаграми.

У роботі [8] автор здійснює візуалізацію даних за допомогою Microsoft Power BI, використовуючи як класичні візуальні елементи, так і надійні розширені візуальні ефекти (включаючи водоспад, маркер, Ганта, торнадо, лійку та ін.).

Для створення власних проектів інтерактивної візуалізації даних в Інтернеті доцільно скористатися роботою [10], яка побудована на використанні основних концепцій та методів D3 – найпотужнішої бібліотеки JavaScript для візуального представлення даних у веб-браузері.

Однак проблема візуалізації даних, які отримують від віддалених пристроїв IoT, на наш погляд, розглянута недостатньо повно.

Постановка завдання. Метою статті є розробка методу візуалізації даних, які отримують від віддалених джерел за допомогою інтернет-сервісу Dweet.io. А також розробка системи передачі даних про температуру та вологість, отриманих від датчика DHT-22 по каналах Wi-Fi та візуалізації їх за допомогою сервісу Dweet.io.

Виклад основного матеріалу. Одним із цікавих інтернет-сервісів для візуалізації даних є Dweet.io.

Dweet.io – це хмарний сервіс, розроблений для спрощення роботи з даними, що отримуються від різних пристроїв та сенсорів у реальному часі. Він заснований на концепції «dweet» – простого способу відправлення даних з пристроїв у хмару, де вони можуть бути легко доступними та візуалізованими. Dweet.io ідеально підходить для проектів в галузі Інтернету речей (IoT), де потрібна швидка та проста інтеграція даних.

Сервіс Dweet.io використовує RESTful API, що робить його доступним для розробників та користувачів з різним рівнем підготовки. Основні етапи роботи з Dweet.io включають:

1. Надсилання даних: Пристрої або програми можуть надсилати дані у вигляді «dweet» за допомогою простого HTTP-запиту. Наприклад, ви можете надіслати дані про температуру, вологість або будь-який інший параметр.

2. Зберігання даних: Усі надіслані "dweets" зберігаються на серверах Dweet.io і можуть бути доступні за унікальним ідентифікатором пристрою.

3. Отримання даних: Користувачі можуть запитувати дані, які надіслані їх пристроєм, використовуючи API. Це дозволяє легко інтегрувати дані до інших програм або візуалізувати їх.

4. Візуалізація даних: Dweet.io надає можливість інтеграції з іншими інструментами візуалізації, такими як Grafana або D3.js, що дозволяє створювати інтерактивні графіки та діаграми.

Dweet дозволяє пристроям надсилати та отримувати дані через хмару, використовуючи унікальні ідентифікатори (dweets). Це робить його ідеальним рішенням для проектів Інтернету речей (IoT), де необхідно відстежувати стан пристроїв та отримувати актуальні дані.

Для роботи з сервісом Dweet.io можна використовувати команди, отримані після натискання кнопки "Play" у браузері.

Для отримання даних за допомогою сервісу Dweet.io необхідно визначити:

1. Унікальний ідентифікатор пристрою

Кожен пристрій або об'єкт, що надсилає дані через Dweet.io має унікальний ідентифікатор. Цей ідентифікатор використовується для отримання даних, надісланих конкретним пристроєм. Наприклад, якщо пристрій має ідентифікатор my_device, ви будете використовувати його в запитах.

2. Формат запиту отримання даних

Щоб отримати останні дані, надіслані вашим пристроєм, потрібно зробити GET-запит до Dweet.io. Ось приклад запиту:

```
GET https://dweet.io/get/dweets/for/my_device
```

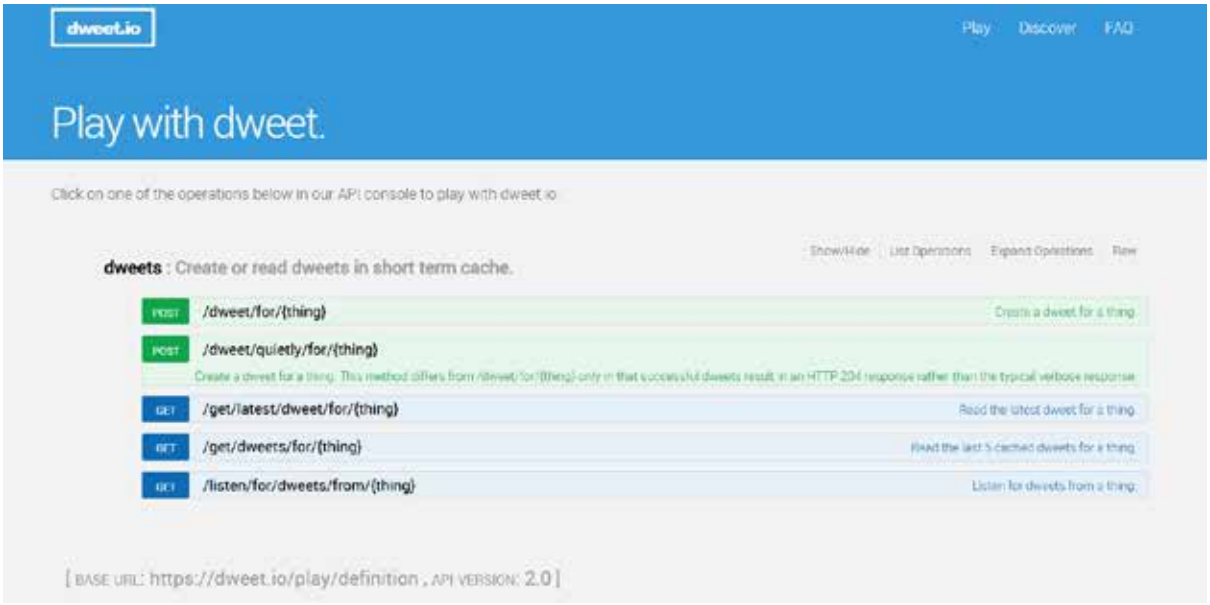


Рис. 1. Список команд для роботи із сервісом Dweet.io

Тут my_device є унікальним ідентифікатором вашого пристрою.

Можна використовувати будь-який HTTP-клієнт або інструменти, такі як curl, Postman або навіть браузер для цього запиту. Наприклад, за допомогою curl це буде виглядати так:

```
curl -X GET https://dweet.io/get/dweets/for/
my_device
```

Коли ви запитаєте, Dweet.io поверне відповідь у форматі JSON. Приклад відповіді може виглядати так:

```
{
    "this": "dweet.io",
    "by": "my_device",
    "content": {
        "temperature": 37.50,
        "humidity": 86.50
    },
    "created": "2024-10-01T12:00:00Z",
    "thing": "my_device"
}
```

У цій відповіді:

• this: вказує на джерело даних (у даному випадку Dweet.io).

• by: унікальний ідентифікатор пристрою.

• content: містить дані, надіслані пристроєм (наприклад, температура та вологість).

• created: тимчасова мітка, коли отримано дані.

• thing: повторює унікальний ідентифікатор пристрою.

Застосування отриманих даних

Отримані дані можна використовувати для різних цілей:

• Моніторинг: відстеження стану навколишнього середовища або обладнання.

• Аналіз: аналіз зібраних даних для виявлення тенденцій та патернів.

• Автоматизація: використання даних для автоматизації процесів (наприклад, увімкнення/вимкнення пристроїв на основі температури або вологості).

• Візуалізація: на основі отриманих даних можна побудувати графік зміни значень у реальному часі (за допомогою вбудованих у сервісі засобів, або підключити зовнішні бібліотеки).

Для надсилання даних необхідно визначити:

1. Унікальний ідентифікатор пристрою

Перед тим, як надіслати дані, потрібно визначити унікальний ідентифікатор (або «thing») для вашого пристрою. Це може бути будь-яке ім’я, наприклад, my_device.

2. Формат запиту для надсилання даних

Для надсилання даних на Dweet.io використовується запит HTTP методом POST. Запит повинен містити дані у форматі JSON. Приклад URL для надсилання даних виглядає так:

```
POST https://dweet.io/dweet/for/my_device
```

Тут my_device є унікальним ідентифікатором вашого пристрою.

Ось приклад того, як надіслати дані за допомогою curl:

```
curl -X POST https://dweet.io/dweet/for/my_
device -d '{"temperature": 24, "humidity": 40}'
```

У цьому запиті ми надсилаємо дані про температуру та вологість повітря.

Для реалізації запропонованого методу візуалізації було розроблено систему спостереження та передачі даних від віддалених джерел. Система передачі показників температури і вологості на сервер Dweet.io побудована на базі мікроконтролера ESP-32, який передає інформацію по мережі Wi-Fi.

Схема підключення датчика температури та вологості наведена на рис. 2.

Під час написання програми були використані бібліотеки WiFi.h – для роботи з мережею WiFi та DHTesp.h – для роботи з датчиком DHT22. Для отримання інформації з серверу Dweet.io було використано запит:

```
client.print(String("GET /dweet/for/my_device?
temperature=") + String(data.temperature, 2)+
"&humidity="+String(data.humidity, 1)+"\r\n"+
"HTTP/1.1\r\n"+"Host: "+host+"\r\n"+"Connection:
close\r\n\r\n");
```

Моделювання роботи системи було здійснено в інтернет-сервісі wokwi.

На рис. 3 відображаються показання температури та вологості повітря на віддаленому об’єкті в реальному часі за допомогою сервісу Dweet.io.

Сервіс Dweet.io підтримує різні типи даних, що дозволяє використовувати його для багатьох проектів у різних галузях.

Можливість інтеграції з популярними бібліотеками та платформами для візуалізації даних розширює функціональність Dweet.io.

Висновки. У цьому дослідженні розглянуто візуалізацію даних, що надходять із віддалених джерел за допомогою інтернет-сервісу Dweet.io. До основних переваг візуалізації даних з використанням сервісу Dweet.io належать:

• можливість безкоштовної роботи з сервером Dweet.io без реєстрації та вказівки login та password.

• простота використання: Dweet.io пропонує простий інтерфейс та API, що робить його доступним навіть для новачків у галузі програмування.

• реальний час: Dweet.io дозволяє працювати з даними в реальному часі, що є особливо важливим для проектів, пов’язаних з моніторингом та управлінням.

При цьому необхідно враховувати, що дані можуть бути доступні для будь-якого користувача, що має відповідний “dweet”.

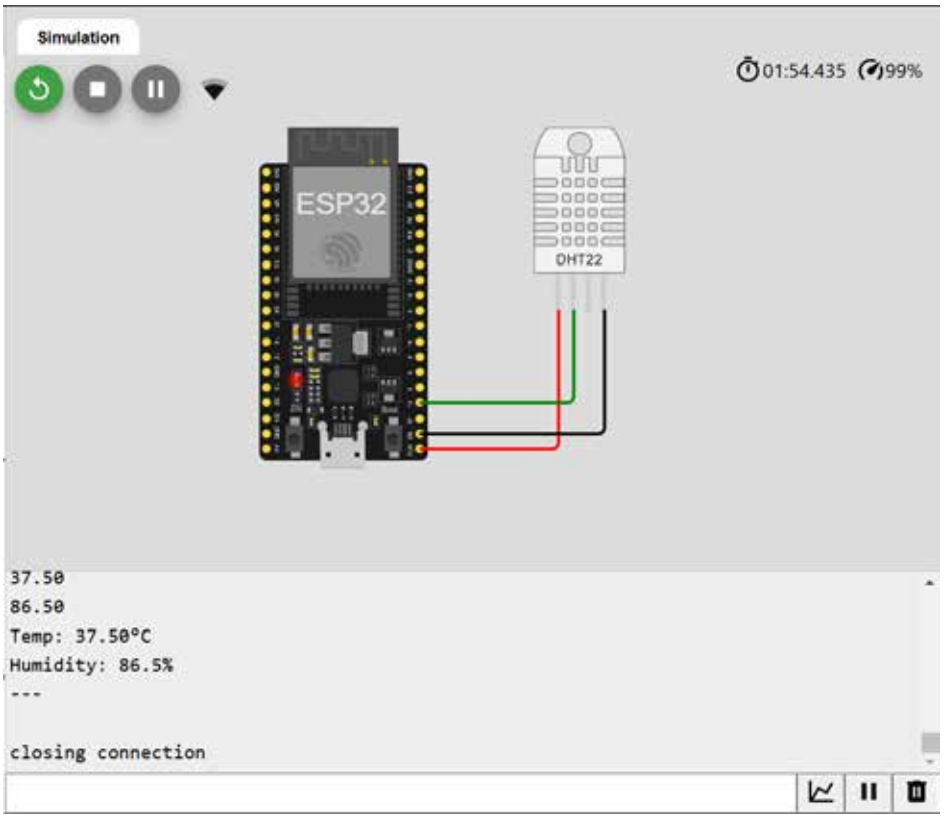


Рис. 2. Схема підключення датчика DHT-22 до мікроконтролера ESP-32

Рис. 3. Візуалізація даних про температуру та вологість, отримані від віддаленого датчика DHT22

Список літератури:

1. Rodrigo Juan Hernández Building IoT Visualizations using Grafana: Power up your IoT projects and monitor with Prometheus, LibreNMS, and Elasticsearch, Packt Publishing – ebooks Account, 2022. 360 p.

2. Claus O. Wilke Fundamentals of Data Visualization: A Primer on Making Informative and Compelling Figures, O'Reilly Media, 2019. 387 p.

3. Andy Kirk Data Visualisation: A Handbook for Data Driven Design, SAGE Publications Ltd, 2019. 328 p.

4. Jonathan Schwabish Better Data Visualizations: A Guide for Scholars, Researchers, and Wonks, Columbia University Press, 2021. 464 p.

5. Stephanie Evergreen Effective Data Visualization: The Right Chart for the Right Data 2nd Edition, SAGE Publications, Inc, 2019. 352 p.

6. Steve Wexler, Jeffrey Shaffer, Andy Cotgreave The Big Book of Dashboards: Visualizing Your Data Using Real-World Business Scenarios, Wiley, 2017. 448 p.

7. Jeffrey Camm, James Cochran, Michael Fry, Jeffrey Ohlmann Data Visualization: Exploring and Explaining with Data (MindTap Course List), Cengage Learning, 2021. 448 p.

8. Alex Kolokolov, Maxim Zelensky Data Visualization with Microsoft Power BI: How to Design Savvy Dashboards, O'Reilly Media, 2024. 413 p.

9. Dick Kusleika Data Visualization with Excel Dashboards and Reports 1st Edition, Wiley, 2021. 352 p.

10. Scott Murray Interactive Data Visualization for the Web: An Introduction to Designing with D3, O'Reilly Media, 2017. 472 p.

11. Marco Cremonini Data Visualization in R and Python 1st Edition, Wiley, 2024. 576 p.

12. Sam Lau, Joseph Gonzalez, Deborah Nolan Learning Data Science: Data Wrangling, Exploration, Visualization, and Modeling with Python, O'Reilly Media, 2023. 594 p.

Holubiev L.P., Kiva I.L. VISUALIZING DATA FROM REMOTE SOURCES WITH DWEET.IO SERVICE

The article considers the process of visualizing data coming from remote sources (sensors) using the Dweet.io Internet service.

An analysis of existing data visualization tools and their features are considered, but they are mainly focused on visualizing data that is already stored in data sets. However, in practice, it is very often necessary to visualize data coming from remote sources in real time. To solve this problem, the authors propose to use the Dweet.io Internet service.

Dweet.io is a cloud service designed to simplify working with data received from various devices and sensors in real time. It is based on the concept of «dweet» – a simple way to send data from devices to the cloud, where they can be easily accessible and visualized.

Data visualization is considered on the example of receiving temperature and humidity data from remote sensors using Wi-Fi channels, recording them on the Dweet.io service servers. and building a graph of data changes in real time.

The system is designed on the basis of the ESP-32 microcontroller developed by Espressif Systems, and provides high performance and the necessary network interfaces. The DHT-22 sensor was used as a remote temperature and humidity sensor, which has increased measurement accuracy and low power consumption. The system operation was simulated using the WokWi Internet service.

The system transmits temperature and humidity data from the DHT-22 sensor over the Internet to the Dweet.io platform server in the form of «dweet» using a simple HTTP request. The Dweet.io Internet service stores the received data and displays it in the form of a graph.

Unlike existing data visualization systems (thingspeak, open remote, etc.), Dweet.io allows you to work with remote data very simply (even without user registration) and for free.

Key words: *data visualization, Dweet.io service, ESP-32 microcontroller, DHT-22 sensor.*

УДК 62-97; 519.876.5
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/09

Григорчук Г.В.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Григорчук Л.І.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ЗАСТОСУВАННЯ ПАТЕРНІВ ПРОЕКТУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОГРАМНОГО КОДУ

У статті розглядається застосування патернів проектування для підвищення ефективності програмного коду. Патерни проектування, або шаблони проектування, є перевіреними рішеннями типових проблем, що виникають у процесі розробки програмного забезпечення. Вони сприяють підвищенню якості коду, зменшенню його складності та полегшенню його підтримки й розвитку. У роботі аналізуються основні типи патернів проектування, такі як породжуючі, структурні та поведінкові патерни, з акцентом на їх практичне застосування в різних аспектах програмування. Патерн проектування іменує, абстрагує і ідентифікує ключові аспекти структури, які дозволяють застосувати його для створення проектних рішень, що передбачають повторне використання.

Досліджено особливості застосування патернів проектування. Доведено, що їх використання допомагає структурувати код так, щоб пізніше в ньому можна було застосувати новий функціонал або здійснити зміни існуючого коду. Описано категорії патернів – породжуючі, структурні та поведінкові. Описано шляхи та особливості використання кожного з них. Детально розглянуто три основні види патернів, їх практичну реалізацію засобами об'єктно-орієнтованого програмування. Зокрема, показано, як впровадження цих патернів сприяє підвищенню гнучкості та масштабованості програмних систем. Дослідження включає приклади використання конкретних патернів у реальних проектах, демонструючи, як їхнє впровадження може знизити витрати на розробку, покращити продуктивність коду і сприяти більшій гнучкості програмних рішень. У висновках відзначено, що використання патернів проектування є важливим аспектом професійного програмування, що сприяє створенню надійних та масштабованих програмних продуктів.

Результати дослідження показують, що інтеграція патернів проектування в процес розробки значно підвищує ефективність програмного коду, роблячи його більш структурованим, читабельним та легким у підтримці.

Ключові слова: *патерни проектування, програмна архітектура, обєктно-орієнтоване програмування, шаблони проектування, якість коду.*

Постановка проблеми. Розробка програмного забезпечення є складним процесом, що вимагає високої якості коду, який повинен бути ефективним, легким у підтримці та масштабованим. Зі зростанням складності програмних систем виникає потреба у використанні перевірених рішень для типових проблем, що виникають під час розробки. Патерни проектування є такими рішеннями, однак їх правильне застосування потребує глибокого розуміння та досвіду. Постає питання, як ефективно інтегрувати патерни проектування у процес розробки, щоб досягти оптимальної продуктивності та якості коду.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Концепцію патернів вперше описав Крістофер Александер у книзі «Мова шаблонів. Міста. Будівлі. Будівництво». У книзі описано «мову» для проектування навколишнього середовища, одиниці якого – шаблони (або *патерни*, що ближче до оригінального терміна *patterns*) – відповідають на архітектурні запитання: якої висоти потрібно зробити вікна, скільки поверхів має бути в будівлі, яку площу в мікрорайоні відвести для дерев та газонів. Ідея видалася привабливою четвірці авторів: Еріху Гаммі, Річарду Хелму, Ральфу Джонсону, Джону Вліссідесу. У 1994 році вони написали книгу «Патерни проектування: повторно використовувані елементи архітектури об'єктно-орієнтованого програмного забезпечення», до якої увійшли 23 патерни, що вирішують різні проблеми об'єктно-орієнтованого дизайну». З того часу було знайдено десятки інших об'єктних патернів. «Патерновий» підхід став популярним і в інших галузях програмування, тому зараз

можна зустріти різноманітні патерни також за межами об'єктного проектування [1].

Постановка завдання. Метою дослідження є вивчення впливу патернів проектування на ефективність програмного коду та їх практичне застосування у розробці програмних систем засобами об'єктно-орієнтованого програмування. Дослідження спрямоване на аналіз переваг використання різних патернів, визначення кращих практик їх впровадження, а також оцінку їхнього впливу на продуктивність, читабельність та підтримку коду. Шаблони програмування, це свого роду, методики, які можуть допомогти розробнику розв'язати певні проблеми у певних ситуаціях. Іншими словами, вони можуть значно полегшити щоденну рутину то зробити проектування більш оптимальним процесом.

Виклад основного матеріалу. Патерн проектування представляє собою типовий метод розв'язання конкретної проблеми, яка часто виникає під час розробки програмної архітектури. Він не є частиною мови програмування, як бібліотеки чи функції, а тому не може бути прямо використаний в коді програми. Він скоріше є набором порад щодо того, як структурувати код таким чином, щоб потім у нього було легко додавати новий функціонал чи змінювати існуючий.

Патерни проектування розділяють на три категорії: породжуючі, структурні та поведінкові.

Породжуючі патерни описують гнучкий механізм створення об'єктів. До цієї категорії відносяться такі патерни як: Фабричний метод, Абстрактна фабрика, Будівельник, Прототип та Одинак. Структурні патирни вказують на те, як варто будувати зв'язки між об'єктами. До них відносяться: Адаптер, Міст, Компонувальник, Декоратор, Фасад, Легковаговик, Замісник.

Поведінкові патерни показують, якою повинна бути комунікація між об'єктами. До цієї категорії відносяться такі патерни як: Ланцюжок обов'язків, Команда, Ітератор, Посередник, Знімок, Спостерігач, Стан, Стратегія, Шаблонний метод та Відвідувач.

Щоб показати ефективність програмного коду, роблячи його більш структурованим, читабельним та легким у підтримці розглянемо наступні патерни [2].

Будівельник – це породжуючий патерн що полегшує створення складних об'єктів. Під складними об'єктами розуміють об'єкти, які мають багато полів.

Уявімо, що ми проектуємо робота. Робот, що схожий на людину, може мати руки, ноги, голову і тіло. Але в деяких випадках нам може бути не потрібна голова або, якщо потрібно, щоб робот літав, то ми можем додати крила і забрати ноги. Щоб створити такий об'єкт робота, можна використати конструктор, який приймає всі можливі параметри робота, але тоді такий конструктор буде дуже довгим і не завжди його доцільно використовувати, адже не завжди нам потрібно вказувати всі параметри.

```
new Robot(head, body, hands, legs, wings)
new Robot(null, body, hands, legs, null) //
робот без голови і крил
new Robot(null, body, hands, null, null) //
робот, який має тільки тіло
```

Іншим варіантом може бути використання конструктору без параметрів і встановлення потрібних полів пізніше [3]. Але такий підхід теж має свої недоліки, тому що дозволяє створити об'єкт, в якого всі поля null, що немає жодного сенсу.

```
Robot robot = new Robot()
robot.setHead(head)
robot.setBody(body)
```

Патерн Будівельник доручає створення об'єкту робота іншим об'єктам, які називаються будівельниками.

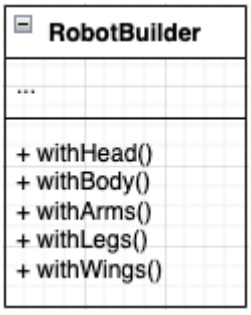


Рис. 1. Застосування патерну Будівельник

Приклад на мові Java

```
public class Robot {
  private String head;
  private String body;
  private String[] hands;
  private String[] legs;
  private String[] wings;
  private Robot(String head, String body,
String[] hands, String[] legs, String[] wings)
{
    this.head = head;
```

```
    this.body = body;
    this.hands = hands;
    this.legs = legs;
    this.wings = wings;}
  public String getHead() {
    return head;}
  public String getBody() {
    return body;}
  public String[] getHands() {
    return hands;}
  public String[] getLegs() {
    return legs;}
  public String[] getWings() {
    return wings;}
  public static RobotBuilder builder(String
body) {
    return new RobotBuilder(body);}
  public static class RobotBuilder {
    private String head;
    private String body;
    private String[] hands;
    private String[] legs;
    private String[] wings;
    public RobotBuilder(String body) {
      this.body = body;}
    public RobotBuilder withHead(String head)
{
      this.head = head;
      return this;}
     public RobotBuilder withHands(String[]
hands) {
      this.hands = hands;
      return this;}
    public RobotBuilder withLegs(String[] legs)
{
      this.legs = legs;
      return this;}
     public RobotBuilder withWings(String[]
wings) {
      this.wings = wings;
      return this;}
    public Robot build() {
      return new Robot(head, body, hands,
legs, wings);}}}
```

Отже, у нас є клас Robot з приватним конструктором, що унеможливлює створення об'єкту через конструктор. Також клас містить метод builder, який повертає об'єкт будівельника. Метод builder має вхідний параметр body, що робить його необхідним параметром, і гарантує нам те, що робот завжди буде мати тіло. Своєю чергою, будівельник RobotBuilder має набір методів, що дозволять вказати частини робота та метод build що повертає об'єкт класу Robot.

Приклад застосування

```
Robot robot = Robot.builder("green body").
build();
Robot robot = Robot.builder("green body").
withHead("big head").build();
```

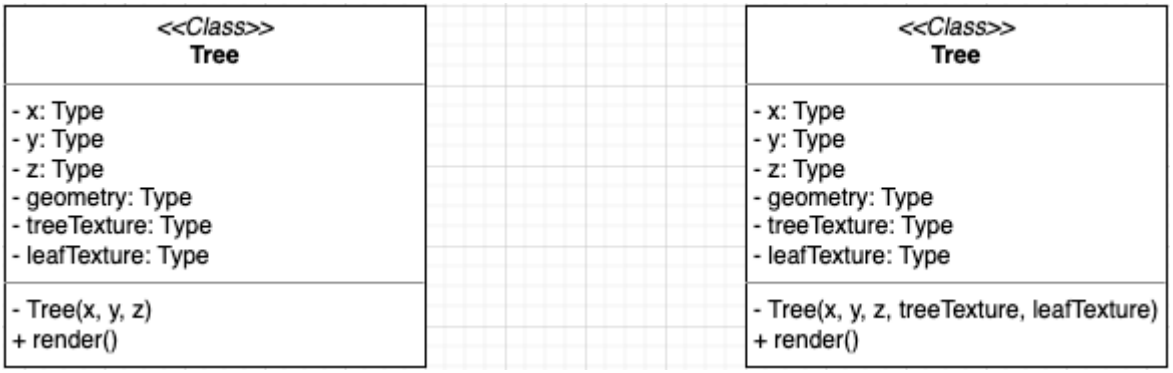
У першому випадку ми створюємо робота що має тільки тіло, у другому – тіло і голову. Використання патерну Будівельник дозволяє нам позбутись використання громістких конструкторів з великою кількістю параметрів з яких, у більшості випадків, нам потрібно тільки декілька. Також надає зручний спосіб конструювання складних об'єктів який може містити в собі додаткову логіку що забезпечує нам створення коректних екземплярів об'єктів [3; 4].

Легковаговик – це структурний патерн, що дозволяє зменшити обсяг потрібної пам'яті для зберігання об'єктів за рахунок винесення спільних ресурсів за межі об'єктів.

До прикладу, розробнику комп'ютерних ігор потрібно зробити рівень у грі, на якому буде ліс з великою кількістю дерев. Кожне дерево – це об'єкт, що містить геометрію дерева, його координати у віртуальному світі та матеріали (текстури дерева та листя). Для простоти розрахунків приймемо, що текстура дерева і листя займають по 2 мегабайти кожна і геометрія дерева – 1 мегабайт. В цілому, один об'єкт дерева буде займати близько 5 мегабайтів. Отже, якщо ми додаємо в гру хоча б 20 таких дерев, то це вже буде 100 мегабайт, а для нормального лісу будуть потрібні сотні мегабайт.

У такому випадку розробник може обмежитись декількома деревами або використати текстури, що мають гіршу якість і займають менше пам'яті, але все це вплине на якість нашої гри, що для розробника неприпустимо. В такому випадку доцільно застосувати патерн Легковаговик до створення дерева (Рис. 2).

Зліва (Рис. 2) показано початковий варіант класу, де текстури дерева і листя визначалися всередині класу і, як результат, кожен об'єкт дерева мав у собі об'єкти текстур. У варіанті справа (Рис. 2) текстури є параметрами конструктору і більше не створюються всередині об'єкта дерево, що дозволяє на використовувати ті ж текстури дерева і листя для всіх дерев. Це дозволить суттєво зекономити пам'ять, потрібну для зберігання створених об'єктів, і тепер для 20 дерев розробнику потрібно лише 24 мегабайти.



а) б)

Рис. 2. структура програмного коду до (а) та після (б) застосування патерну

Шаблонний метод – це поведінковий патерн, що визначає загальний алгоритм виконання, перекладаючи відповідальність за реалізацію його кроків на підкласи.

Як приклад використаємо випадок, коли потрібно написати програму для апарату, що варить каву. Алгоритм варіння кави досить простий: потрібно підігріти воду, додати каву, додати цукор, додати вершки або молоко і вилити отриманий результат у ємність. Але, наприклад, для експресо потрібно менше води, для капучино – додати молоко і т.д. Можна створити для кожного напою окремий клас, який буде описувати, як готувати той чи інший напій. Але це призведе до дублювання коду. Тому в цьому випадку добре буде скористатися патерном шаблонний метод.

```
public abstract class CoffeeMaker {
  //шаблонний метод що визнащає загальний
алгоритм варіння
  public void make() {
    addWater();
    heatWater();
    addCoffee();
    addSugar();
    addMilk();
    pourInCup();}
  protected abstract void addWater();
  protected void heatWater() {
    System.out.println("Heat water to 90
degree");}
  protected void addCoffee() {
    System.out.println("Add 20 grams of
coffee");}
  protected abstract void addSugar();
  protected abstract void addMilk();
  protected void pourInCup() {
    System.out.println("Pouring into cup");}}
```

CoffeMaker – це клас, який визначає загальний алгоритм варіння кави, розбиваючи його на окремі кроки, які можуть бути змінені підкласами. Далі розглянемо конкретні класи, відповідальні за варіння різних напоїв.

```
public class AmericanoCoffeeMaker extends
CoffeeMaker {
  @Override
  protected void addWater() {
    System.out.println("Add 200 grams of
water");}
  @Override
  protected void addSugar() {
    System.out.println("Add 20 grams of
sugar");}
  @Override
  protected void addMilk() {
    System.out.println("Add 30 grams of
milk");}}
```

AmericanoCoffeeMaker – відповідальний за варіння американо. Він наслідує CoffeMaker і реалізує три методи, щоб додати певну кількість води(addWater), цукру(addSugar) та молока(addMilk). Зверніть увагу, що в класі немає методу make(), оскільки він наслідується з батьківського класу.

```
public class EspressoCoffeeMaker extends
Cpublic class EspressoCoffeeMaker extends
CoffeeMaker {
  @Override
  protected void addWater() {
    System.out.println("Add 100 grams of
water");}
  @Override
  protected void addSugar() {
```

```
    System.out.println("Add 10 grams of
sugar");}
  @Override
  protected void addMilk() {
    //реалізація відсутня оскільки молока не
потрібно}}
```

EspressoCoffeeMaker – відповідальний за варіння експресо. Він також наслідує CoffeMaker, щоб використовувати заздалегідь визначений алгоритм варіння, і реалізує два методи addWater і addSugar.

Observer (**спостерігач)** – це поведінковий патерн проектування, який створює механізм підписки, що дає змогу одним об'єктам стежити й реагувати на події, які відбуваються в інших об'єктах.

Розглянемо патерни в контексті сучасних парадигм. Асинхронне програмування стало важливою частиною сучасних систем, особливо в контексті веб-розробки та роботи з великими обсягами даних у реальному часі. Багато патернів проектування чудово адаптуються до цього підходу. Наприклад, у **JavaScript** та **Python** активно використовується асинхронність для побудови неблокуючого коду, що працює швидко і ефективно.

Observer – це один із патернів, який часто використовується для реалізації асинхронних систем. Його основна мета – реалізація реактивного підходу, коли один або кілька об'єктів «спостерігають» за станом іншого об'єкта та отримують повідомлення про зміни стану в режимі реального часу [4; 7; 8].

Асинхронність з використанням **Observer** дозволяє реагувати на події у системі негайно, без блокування головного потоку програми, що робить його ідеальним для реалізації таких систем, як інтерфейси реального часу, чати або обробка даних з датчиків.

Приклад використання патерну Observer в асинхронних системах. Ось приклад, як патерн **Observer** може бути реалізований в асинхронній системі на JavaScript з використанням **Promises** або **async/await** для роботи з подіями в режимі реального часу.

Приклад на мові javascript:

```
class Observable {
    constructor() {
        this.observers = [];}
    subscribe(observer) {
        this.observers.push(observer);}
    unsubscribe(observer) {
        this.observers = this.observers.
filter(subscriber => subscriber !==
observer);}
    notify(data) {
        this.observers.forEach(observer =>
observer.update(data)); }}
class Observer {
    constructor(name) {
        this.name = name;}
    async update(data) {
        console.log(`${this.name} отримав
повідомлення:`, data);
        // Імітація асинхронної операції,
наприклад, виклик API
        await new Promise(resolve =>
setTimeout(resolve, 1000));
        console.log(`${this.name} обробив
дані:`, data);}}
// Приклад використання
const observable = new Observable();
const observer1 = new Observer('Спостерігач 1');
const observer2 = new Observer('Спостерігач 2');
observable.subscribe(observer1);
observable.subscribe(observer2);
// Імітація події через 2 секунди
setTimeout(() => {
    observable.notify('Нові дані!');}, 2000);
```

Опис коду:

- Observable – клас, що представляє об'єкт, за яким можуть спостерігати інші об'єкти (спостерігачі).
- **Observer** – спостерігач, який підписується на події та реагує на зміни, обробляючи їх асинхронно.
- У методі update використовуються асинхронні операції для симуляції обробки події.

У прикладі, коли спостерігач отримує повідомлення від спостережуваного об'єкта, він асинхронно обробляє ці дані. Це імітує реальні умови, коли система повинна реагувати на зміни даних у реальному часі без блокування основного потоку.

Висновки. Результати дослідження показують, що інтеграція та удосконалення вище вказаних патернів в процес розробки значно підвищує ефективність програмного коду, роблячи його більш структурованим, читабельним та легким у підтримці [5].

Використання патернів проектування покращує організацію нашого коду що полегшує його підтримку і додавання нового функціоналу,

а у деяких випадках може покращити швидкодію програми чи ефективність роботи з ресурсами.

Observer чудово підходить для реалізації асинхронного реагування на події. Це зручний патерн для роботи з системами, де важливо обробляти події у фоновому режимі або в паралельних потоках, не зупиняючи головний потік виконання програми.

Працюючи з будь-яким ресурсом до створення безшовного зображення головний секрет успіху – однорідність отриманої картинки. Для цього згенерованим узором слід залити велику поверхню, якщо око не реагує на стики, сприймає орнамент єдиною цілісною площиною, отже, все пройшло добре. Якщо ж видно дірки, нерівномірне заповнення або деякі деталі випадають із загальної концепції, потрібно доопрацювати патерн.

Список літератури:

1. Будай А. Дизайн-патерни – простіше простого. Львів, 2012. 90 с.

2. Бандура В.В., Чесановський М.С., Шекета В.І., Піх В.Я. Архітектура та проєктування програмного забезпечення: навч. посібник. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2021. 359 с.

3. Cooper J.W. Introduction to Design Patterns in C#. IBM TJ Watson Research Center, 2002. 424 p.

4. Serevsen B.G. Design Patterns. BGS Consulting ApS, 2008. 224 p.

5. Юхнович П. Навіщо потрібні патерни проєктування в програмуванні та де їх вивчати. URL: https://aw.club/global/uk/blog/design-patterns-in-programming.

6. Баран С.В. Розробка програмного забезпечення з використанням патернів проєктування: навч. посібник. Кривий Ріг: Державний університет економіки і технологій, 2023. 203 с.

7. Венгловська Ю.В., Марчук Д.К. Використання патернів у ігрових проєктах. URL: https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/67-1.c.127-129.

8. Сікайло В.О., Марчук Г.В. Дослідження процесів використання патернів проєктування при розробці ігор. URL: https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/05/37-1.c.37-39.

Grygorchuk G.V., Grygorchuk L.I. APPLICATION OF DESIGN PATTERNS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF SOFTWARE CODE

The article examines the application of design patterns to enhance the efficiency of software code. Design patterns, or design templates, are proven solutions to common problems that arise during the software development process. They help improve code quality, reduce its complexity, and facilitate its maintenance and evolution. The paper analyzes the main types of design patterns, such as creational, structural, and behavioral patterns, with an emphasis on their practical application in various aspects of programming. The design pattern names, abstracts, and identifies key aspects of the structure, allowing it to be applied to create design solutions that enable reuse

The study investigates the features of applying design patterns. It is proven that their use helps structure the code in such a way that new functionality can be implemented or existing code can be modified more easily. The categories of patterns–creational, structural, and behavioral–are described. The ways and peculiarities of using each of them are outlined. The three main types of patterns and their practical implementation using object-oriented programming (OOP) are discussed in detail. Specifically, it shows how the implementation of these patterns contributes to increased flexibility and scalability of software systems. The study includes examples of specific patterns used in real projects, demonstrating how their implementation can reduce development costs, improve code performance, and promote greater flexibility in software solutions. The results of the study show that integrating design patterns into the development process significantly enhances the efficiency of software code, making it more structured, readable, and easier to maintain. The conclusions highlight that the use of design patterns is an important aspect of professional programming, contributing to the creation of reliable and scalable software products.

Key words: *design patterns, software architecture, object-oriented programming, design templates, code quality.*

УДК 621.382: 629.33
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/10

Далека В.Х.
Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова

Фуртат С.О.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ЦИФРОВОГО ПРОПОРЦІЙНО-ІНТЕГРАЛЬНО-ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА КОРЕКЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ І ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Стаття присвячена викладу методики синтезу цифрових регуляторів прецизійних електроприводів для системи орієнтації і стабілізації стеження за об'єктами сенсорів спрямованої дії мобільних роботів і транспортних засобів.

Актуальним є завдання розробки саме інженерної методики синтезу цифрових регуляторів прецизійних електроприводів для системи орієнтації і стабілізації сенсорів спрямованої дії мобільних роботів та технічних засобів електротранспорту. Використання запропонованих рекомендацій дозволить досягти поставлених цілей: поліпшити динамічні характеристики електроприводу при незначному збільшенні витрат енергії; підвищити надійність і зменшити масогабаритні показники електроприводу. Обмеження стаціонарності математичної моделі об'єкту управління можливо замінити на квазістаціонарну, якщо в загальний алгоритм обробки інформації і управління додати алгоритм оперативної ідентифікації параметрів об'єкту управління.

***Постановка проблеми:** зменшення часу перехідного процесу в каналі управління кутом повороту ротора електроприводу, синтезувати квазіінваріантну цифрову систему автоматичного управління (ЦСАУ) по відношенню до зовнішньої обурюючої дії.*

Методика рекомендує виділити два режими роботи електроприводу : орієнтації(переорієнтації) осі чутливості сенсора і її стабілізації. Структура закону управління для обох режимів залишається незмінною. Алгоритм регулювання складається з алгоритмів цифрового пропорційно-інтегрально-диферинціального регулювання, алгоритму корекції динамічних властивостей електроприводу і алгоритму відновлення(оцінювання) вектору стану (спостерігач Люенбергера або фільтр Кальмана). Інформація в спостерігач або фільтр поступає від цифрового амперметра.

Використання методики дозволить: поліпшити динамічні характеристики електроприводу при незначному збільшенні витрат енергії; підвищити надійність і зменшити вантажногабаритні показники електроприводу.

***Ключові слова** цифрове автоматичне управління електроприводом, електротранспорт, сенсори спрямованої дії, моделювання в просторі станів, мобільні роботи, корекція динамічних характеристик електроприводів.*

Постановка проблеми. Нині, цифрове управління електроприводами мехатронних пристроїв, які реально використовуються на практиці, здійснюється, у кращому разі, цифровими ПІД-регуляторами [10-11]. Ці ПІД – регулятори параметрично налаштовуються на детерміновані математичні моделі, які придатні тільки для налаштування в режимі орієнтації (переорієнтації). Потім, у кращому разі, виконується параметричне доналаштування (доведення) під час випробувань або регламентних робіт в процесі нормальної експлуатації. Алгоритмічна корекція динамічних характеристик електроприводу не виконується. Швидкість обертання ротора електроприводу і (чи) кута його повороту вимірюються спеціальними механічними сенсорами (датчики первинної інформації), які не мають досить високої надійності і при цьому, збільшують масу і енергоспоживання електроприводу [12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що розширення і впровадження інформаційних технологій признано пріоритетним напрямком економічного розвитку нашої держави. Розвиток мобільної робототехніки та без-

пілотних систем транспорту відбувається стрімкими темпами. Успішне рішення задачі локалізації мобільної основи робота і його робочого органу є необхідною умовою не лише ефективного застосування мобільного робота, а і в цілому визначає можливість його застосування [1-4]. Перспективні моделі мобільних роботів усіх сфер застосування в переважній більшості призначені для автономного режиму застосування, тобто з використанням власних ресурсів під час роботи. Таким чином, швидкодія, точність і енергетична ощадливість, дальність дії сенсорів навігаційної системи і робочого органу дозволяють збільшити час ефективного активного функціонування мобільного робота по його призначенню. Особливі вимоги до сенсорів мобільних роботів виникають у разі групового застосування роботів при виконанні деякого загального завдання в умовах наявності мобільних перешкод, що непередбачувано переміщаються [3-6].

Методи рішення такого роду завдань припускають наявність досить точної інформації про вектор стану, абсолютною і відносною швидкостях руху роботів і перешкод. Можливий шлях рішення задачі по забезпеченню навігаційних систем мобільних роботів первинною навігаційною інформацією – це застосування великої кількості різнорідних сенсорів всенаправленої дії. Проте, використання надмірної кількості всенаправлених сенсорів в умовах автономного функціонування погіршує техніко-економічні показники функціонування робота.

Аналогічні питання потребують подальшого вирішення і на транспорті, зокрема, на автомобільному та електротранспорті [6-10]. Застосування сенсорів спрямованої дії дозволяє вирішувати задачу отримання високоточної первинної інформації швидко і ефективно тільки за умови наявності спеціальної системи електроприводів орієнтації(переорієнтації) і стабілізації стеження за об'єктом [12].

Постановка завдання. Нині, цифрове управління електроприводами мехатронних пристроїв, які реально використовуються на практиці, здійснюється, у кращому разі, цифровими ПІД-регуляторами [10-11]. Ці ПІД – регулятори параметрично налаштовуються на детерміновані математичні моделі, які придатні тільки для налаштування в режимі орієнтації (переорієнтації). Потім, у кращому разі, виконується параметричне доналаштування (доведення) під час випробувань або регламентних робіт в процесі нормальної експлуатації. Алгоритмічна корекція динамічних характеристик електроприводу не виконується. Швидкість обертання ротора електроприводу і(чи) кута його повороту вимірюються спеціальними механічними сенсорами(датчики первинної інформації), які не мають досить високої надійності і при цьому, збільшують масу і енергоспоживання електроприводу [12].

Синтез цифрових регуляторів, які дозволяють зробити прецизійними електроприводи для системи орієнтації і стабілізації стеження за об'єктом сенсорів спрямованої дії мобільних роботів дозволять поліпшити технічні характеристики функціонування як окремих мобільних роботів, так і їх груп. Особливого значення цей факт набуває для групового застосування мобільних роботів у військових цілях. Методика синтезу цифрових регуляторів прецизійних електроприводів для системи орієнтації і стабілізації стеження за метою сенсорів спрямованої дії мобільних роботів розвиває інженерний методичний апарат синтезу цифрових регуляторів. Аналізуємо інженерні методики цифрового управління електроприводами орієнтації і стабілізації осі чутливості сенсорів спрямованої дії, які використовуються в мобільних роботах та на транспортних засобах [10].

Об'єктом дослідження є процес цифрового автоматичного управління електроприводом системи орієнтації сенсора спрямованої дії.

Предметом дослідження є алгоритми цифрового автоматичного управління електроприводом системи орієнтації сенсора спрямованої дії.

Хід роботи:

1. Пошук структури закону керування, яка є спільною для розв'язання завдань орієнтації та стабілізації стеження за об'єктом.

2. Вибір об'єкту керування(типу електроприводу) та побудова його математичної моделі.

3. Вибір структури закону керування.

4. Детермінована параметрична оптимізація закону керування орієнтацією.

5. Алгоритмічна корекція динамічних властивостей (характеристик) електроприводу (обчислення раціональних значень параметрів регулятора внутрішнього корегуючого контуру) при умові, що всі компоненти вектору стану електроприводу вимірюються абсолютно точно.

6. Параметрична оптимізація регулятора зовнішнього контуру при умові, що всі компоненти вектору стану електроприводу вимірюються абсолютно точно.

7. Синтез спостерігача Люенбергера та його підключення до зовнішнього та внутрішнього контурів ЦСАК електроприводом.

8. Обчислювальний експеримент стосовно оцінки якості функціонування ЦСАК із спостерігачем Люенбергера.

Виклад основного матеріал. полягає в тому, щоб завдяки алгоритмічній модернізації (удосконаленню алгоритму управління) цифрового електроприводу задовольнити дві суперечливі вимоги (критерії): швидка переорієнтація сенсора спрямованої дії і точність його стабілізації в заданому положенні [1,4].

У методиці, що викладається, наукове завдання декомпозується на дві підзадачі: перша підзадача полягає в модернізації алгоритму переорієнтації; друга підзадача полягає в модернізації алгоритму стабілізації. Рішення першої підзадачі пропонується виконувати в детермінованій постановці, а рішення другої підзадачі – в стохастичній. При цьому міняються тільки параметри алгоритмів управління, а їх структура залишається незмінною в результаті рішення обох підзадач. Таким чином, методика дозволяє синтезувати адаптивний до конкретного режиму роботи алгоритм цифрового автоматичного управління електроприводом системи орієнтації і стабілізації сенсора спрямованої дії.

Об'єктом керування є конкретний тип електроприводу, який за своїми технічними характеристиками найкращим чином узгоджується із загальною конструкцію системи орієнтації та стабілізації. Припустимо, що це двигун постійного струму (ДПС). Математичну модель ДПС уявно у багатовимірному просторі станів із двома входами та двома виходами. Один із входів – це вхід за яким подається керуюча напруга на якір ДПС, а інший – це збурення. Виходом вважаємо струм в якорі ДПС i (t), а іншим – кутову швидкість обертання його ротора w (t). Між входом та виходом існує лінійний стаціонарний зв'язок. Таким чином, математичну модель об'єкта керування можна класифікувати як багатовимірну лінійну стаціонарну модель (MIMO LTI – модель) [3-4].

Алгоритм цифрового регулятора цифрової системи автоматичного керування (ЦСАК) кутовою швидкістю ротора (якорі) ДПС складається із трьох алгоритмів: двох алгоритмів регуляторів та алгоритму спостерігача стану. Регулятори являють собою послідовну та паралельну одиниці що корегують динамічні властивості ДПС. У якості послідовної корегуючої одиниці обираємо цифровий пропорційно – інтегрально – диференціальний регулятор (ЦПІД-регулятор), який надає ЦСАК властивість квазіадаптивності. У якості паралельної корегуючої одиниці використовується лінійний зворотній зв'язок за вектором стану ДПС із матричним коефіцієнтом підсилення. Для обчислення цього матричного коефіцієнту підсилення використаємо в подальшому три методи регулювання стану: метод регулювання стану із бажаним (заданим) характеристичним рівнянням; метод модального регулювання стану; метод лінійного квадратичного регулювання стану. Для корекції динамічних властивостей об'єктів керування із MIMO LTI математичними моделями функціонування ці методи в інженерній практиці застосовуються найчастіше [5].

У методиці передбачено виконання імітаційного моделювання, за результатами якого пропонується обрати найкращий із обчислених за вказаними методами матричний коефіцієнт зворотного зв'язку. Коефіцієнт обирається в залежності від режиму (орієнтація або стабілізація стеження за об'єктом) за заданими для відповідних режимів роботи критеріями.

Критерії налаштування параметрів регуляторів та спостерігача стану залежать від режиму роботи ЦСАК.

Завдання переорієнтації вісі чуттєвості сенсора розглядається в детермінованій постановці. У цій задачі необхідно обрати параметри таким чином, щоб мінімізувати час тривалості перехідного процесу, перерегулювання, коливальність та додаткові витрати енергії на переорієнтацію (якщо сенсор має автономне джерело живлення).

Завдання стабілізації вісі чутливості сенсора в режимі стеження розглядається в стохастичній постановці. У цій задачі параметри обираються за умови мінімізації дисперсії помилки утримання вісі чутливості сенсора в заданому положенні та мінімізації додаткових витрат енергії автономним джерелом живленням сенсора [5,6,10].

Характерно, що методичні прийоми налаштування ЦСАК, є однаковими для обох режимів її роботи. Якщо відомі параметри математичних моделей ДПС та збурення, то налаштування параметрів регулятора та спостерігача стану можна виконати заздалегідь із використанням цих моделей, тобто перед початком застосування сенсора. Якщо таких відомостей немає, то зрозуміло, потрібно виконувати оперативну ідентифікацію параметрів математичних моделей та оперативне налаштування ЦСАК під конкретну ситуацію, тобто робити ЦСАК адаптивною (квазіадаптивною).

У детермінованій постановці спостерігач стану використовує алгоритм, який носить назву спо-

стерігач Люенбергера, а в стохастичній – фільтр Кальмана [5,10].

За результатом виконання методики отримуємо структуру математичної моделі ЦСАК у вигляді, що представлена на рисунку 1 [10].

Для імітаційного моделювання (алгоритмічного обчислення значень критеріїв оптимізації) та параметричного синтезу регуляторів, спостерігача Люенбергера, фільтру Кальмана використані неперервна та дискретна MIMO LTI математичні моделі ДПС.

Неперервна MIMO LTI математична модель ДПС (на рис. 1. модель представлена у вигляді блоку State Space та підсилювача Bn) має наступні значення параметртів: A=[- 25 -7.5;7.5 0]; B=[1 0;0 -1]; Bn=[5 0;0 -5]; C=[1 0;0 1]; D=[0 0;0 0]. Вхідними сигналами безперервної MIMO LTI математичній моделі ДПС (блок 6, рис. 1) являються: напруга підводиться до якоря ДПС (управління по ланцюгу якоря), яке подається з виходу ЦПИД-регулятора – перший вхід (блок 4.1, рис. 1), що керує, і гальмівний момент, що управляє, який подається з блоку 3, рис. 1 – другий вхід, що керує. Відмітимо, що по фізичному сенсу завдання управління електроприводом, по обох входах можуть діяти обурення (блок 1, рис. 1). Вихідними сигналами блоку 6, рис. 1 являються: струм якоря i (t) і кутова швидкість якоря (ротора) ДПС w (t).

Дискретна MIMO LTI математична модель ДПС була побудована для інтервалу дискретизації Te=0.06 із за допомогою функції c2d системи комп'ютерної математики MATLAB+Simulink:

$$x(n+1) = Ad \cdot x(n) + Bd \cdot u(n); \quad (1)$$

$$y(n) = Cd \cdot x(n) + Dd \cdot u(n), \quad (2)$$

де Ad = [0.1841 -0.2256; 0.2256 0.9359],

Bd = [0.1504 0.04274; 0.04274 -0.2928],

Cd =[1 0;0 1], Dd =[0 0; 0 0].

Звернемо увагу на те, що запис Cd =[1 0;0 1] означає вимір цифровими датчиками первинної інформації обох вихідних сигналів ДПС. У цій статті пропонується використати цифровий амперметр для виміру струму якоря ДПС і далі алгоритмічно за допомогою спостерігача Люенбергера або фільтру Кальмана (у зависимоти від режиму роботи електроприводу) обчислювати значення кутової швидкості ротора (якорі) ДПС. У такому разі Cd =[1 0].

Підключення спостерігача Люенбергера до алгоритму ЦПІД-регулятора ЦСАК електроприводом орієнтації осі чутливості сенсора спрямованої дії не впливає на якість перехідного процесу в ЦСАК і її реакцію на ступінчасте збурення. Тривалість перехідного процесу зберігається рівною приблизно 5 з для ЦСАК з корекцією динамічних характеристик ДПС будь-яким з трьох методів: методом регулювання стану із бажаним(заданим) характерним рівнянням; методом модального регулювання; методом лінійного квадратичного регулювання [11-12].

Позитивним є те, що алгоритмічний вимір кутової швидкості обертання ротора ДПС за допомогою спостерігача Люенбергера або філь-

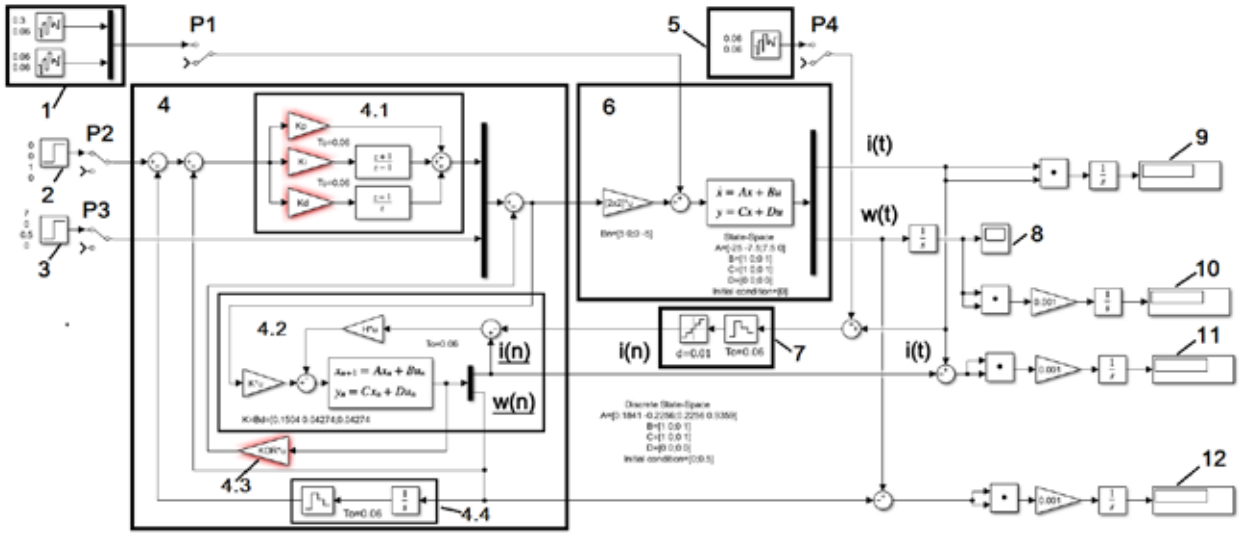


Рис. 1. Структура комп'ютерної математичної моделі ЦСАК прецизійним електроприводом для системи орієнтації і стабілізації стеження за метою сенсорів спрямованої дії мобільних роботів та транспортних засобів

тру Кальмана дозволяє зменшити вагу і габарити ЦСАК і підвищити її надійність. Поліпшення пояснюється відмовою від використання механічного тахогенератора і вимірника кута повороту в ланцюзі зворотного зв'язку ЦСАК. Для виміру струму в ланцюзі якоря ДПС пропонується використати малогабаритний цифровий сенсор.

Самим енергетично вигідним алгоритмом стеження за об'єктом є алгоритм ЦПІД регулювання без корекції динамічних характеристик електроприводу. Найточнішим алгоритмом стеження за метою є алгоритм ЦПІД – регулювання, використаний спільно з алгоритмом корекції динамічних характеристик електроприводу, який синтезований методом лінійного квадратичного регулювання [11-12].

Показано, що найкращим компромісним варіантом алгоритму стеження за об'єктом, який дозволяє зменшити дисперсію помилки стеження до 30% і всього в два рази збільшити споживання енергії, являється алгоритм ЦПІД регулювання, використаний спільно з алгоритмом корекції динамічних характеристик електроприводу, який синтезований методом регулювання стану із бажаним (заданим) характеристичним рівнянням.

Усі алгоритми в режимі стабілізації стеження за метою використовують інформацію про вектор стану електроприводу, яка подається з виходу фільтру Кальмана.

У ЦСАК з корекцією динамічних характеристик ДПС вдається до 40% зменшити час перехідного процесу і в десятки разів зменшити амплітуду сплеску вихідного сигналу при дії ступінчастого гальмівного збурення в порівнянні з ЦСАК – без корекції динамічних характеристик ДПС [12].

Висновки. Таким чином, актуальним є завдання розробки саме інженерної методики синтезу цифрових регуляторів прецизійних електроприводів для системи орієнтації і стабілізації стеження за метою сенсорів спрямованої дії мобільних роботів та транспортних засобів. Використання запропонованих рекомендацій дозволить досягти поставлених цілей : поліпшити динамічні характеристики електроприводу при незначному збільшенні витрат енергії; підвищити надійність і зменшити масогабаритні показники електроприводу. Обмеження стаціонарності математичної моделі об'єкту управління можливо замінити на квазістаціонарну, якщо в загальний алгоритм обробки інформації і управління додати алгоритм оперативної ідентифікації параметрів об'єкту управління. Також в подальшому є доцільним продовження досліджень та розробки відповідних наукових та технічних рішень для впровадження інформаційних технологій з використанням штучного інтелекту.

Список літератури:

1. Шворов С.А. Математичний апарат організації руху мобільних роботів з розпізнаванням перешкод. Наука і техніка ВПС України. том. 3, стор. 185-188.

2. Михайлов Є.П., Крис М.В. Локальна навігація мобільних роботів за допомогою засобів одометрії. Підйомно-транспортне обладнання. том. 4, 21-30 с.

3. Лисенко О.: стипендія HANDONG UNITWIN (Республіка Корея). Курс [S084-Україна]. Математичне програмування та дослідження операцій у телекомунікаціях.

4. Лисенко О., Тачініна О., Алексєєва І., Новіков В. Математичне моделювання руху цільового вузла Iron Bird датчиків системи керування даними безпеки. Матеріали семінару CEUR, том. 2711, 482–491 с.

5. Lin, L., Wu, P., He, B., Chen, Y., Zheng, J., Peng, X.: The sliding mode control approach design for nonholonomic mobile robots based on non-negative piecewise predefined-time control law. IET Control Theory & Applications. Vol. 15(9), pp. 1286–1296 с.

6. Мокін О.Б. Моделювання та оптимізація руху багатомасових електричних транспортних засобів поверхнями зі складним рельєфом: монографія О. Б. Мокін, Б. І. Мокін. – Вінниця, 2013. 192 с.

7. Кашканов А.А. Інформаційні комп'ютерні системи автомобільного транспорту А.А. Кашканов, В.П. Кужель, О.Г. Грисюк. – Вінниця, 2010. 230 с.

8. Ніконов О.Я. Безпілотні багатоцільові транспортні засоби: Сучасні технології О.Я. Ніконов, Л.Є. Кулакова, Т.О. Полосухіна, В.О. Чернишов Автомобіль і Електроніка. Сучасні Технології, 2017. 46-49 с.

9. Автомобільний інжиніринг: Сучасні технології О.Я. Ніконов, Л.Є. Кулакова,, М.В. Сіндєєв, Є.М. Шпінда Автомобіль і Електроніка. Сучасні Технології. 2017. 71-74 с.

10. Фуртат О.В., Фуртат С.О., Лисенко О.І. Методика синтезу цифрових регуляторів прецизійних електроприводів для системи орієнтації і стабілізації стеження за об'єктами сенсорів спрямованої дії мобільних роботів. Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи телекомунікацій», 2024, 209–211 с.

11. Uminsky, V.V.: Analysis of Control Systems for Mobile Robot Movement. Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine. Vol. 3-4, pp. 2013. 306-308 с.

12. Lysenko, O., Tachinina, O., Novikov, V., Guida, O., Kirchu, F., & Sushyn, I. 2023. Methodology of Synthesizing Digital Regulators in Precision Electric Drives for Orientation and Stabilization Target Tracking System of Mobile Robot's Directional Sensors. CEUR Workshop Proceedings 3513, 51–63 с.

Daleka V.H., Furtat S.O. FEATURES OF THE IMPLEMENTATION OF DIGITAL PROPORTIONAL-INTEGRAL-DIFFERENTIAL REGULATION AND CORRECTION OF DYNAMIC PROPERTIES OF THE ELECTRIC DRIVE OF MOBILE ROBOTS AND VEHICLES

The article *is devoted to the presentation of the methodology for the synthesis of digital controllers of precision electric drives for the orientation and stabilization system for tracking objects of directional sensors of mobile robots and vehicles.*

The tas*k of developing an engineering methodology for the synthesis of digital controllers of precision electric drives for the orientation and stabilization system of directional sensors of mobile robots and technical means of electric transport is relevant. The use of the proposed recommendations will allow achieving the set goals: to improve the dynamic characteristics of the electric drive with a slight increase in energy consumption; to increase reliability and reduce the weight and dimensions of the electric drive. The stationarity restriction of the mathematical model of the control object can be replaced by a quasi-stationary one if an algorithm for operational identification of the parameters of the control object is added to the general information processing and control algorithm.*

Goal: *to reduce the time of the transient process in the control channel of the angle of rotation of the rotor of the electric drive, to synthesize a quasi-invariant digital automatic control system (DACS) with respect to external disturbing action.*

Research results: *The methodology recommends distinguishing two modes of operation of the electric drive: orientation (reorientation) of the sensor sensitivity axis and its stabilization. The structure of the control law for both modes remains unchanged.*

The control algorithm consists of digital proportional-integral-differential control algorithms, an algorithm for correcting the dynamic properties of the electric drive, and an algorithm for restoring (estimating) the state vector (Lyuenberger observer or Kalman filter). Information to the observer or filter comes from a digital ammeter.

Conclusion: *the use of the methodology will allow: to improve the dynamic characteristics of the electric drive with a slight increase in energy consumption; to increase reliability and reduce the load-bearing capacity of the electric drive.*

Key words: *digital automatic control of electric drives, electric vehicles, directional sensors, state space modeling, mobile robots, correction of dynamic characteristics of electric drives.*

УДК 004.01/.08+796.07
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/11

Єфіменко А.Ю.
Сумський державний університет

Койбічук В.В.
Сумський державний університет

Миненко С.В.
Сумський державний університет

Кушнерьов О.С.
Сумський державний університет

Гриценко К.Г.
Сумський державний університет

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РОЗВИТКУ КІБЕРСПОРТИВНИХ ДИСЦИПЛІН: ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Кіберспорт – це феномен сучасного світу, який поєднує високі технології, інтерактивні розваги та глобальну аудиторію. Стрімкий розвиток індустрії значною мірою зумовлений прогресом у сфері апаратного і програмного забезпечення та мережевих технологій. Метою дослідження є визначення ключових технологічних аспектів розвитку кіберспортивних дисциплін, їх тенденцій та подальших перспектив інноваційних змін.

У статті розглянуто технології та їх вплив на розвиток кіберспортивних дисциплін як базових елементів кіберспортивної галузі із врахуванням сучасних викликів. Особливу увагу приділено впровадженню інноваційних рішень, таких як спеціалізовані алгоритми штучного інтелекту, віртуальна та доповнена реальність, високопродуктивні обчислювальні платформи, хмарні платформи (Xbox Cloud Gaming, NVIDIA GeForce Now, Riot Games), мережі нового покоління (мережі 10 Гбіт/с та мережі з низькою затримкою) тощо. Під час аналізу та порівняння технологій кіберспортивних дисциплін Dota 2, League of Legends та CS:GO, які входять у Топ-5, визначено їх технологічну досконалість через застосування передових графічних двигунів (Source Engine, Unreal Engine 3 тощо), спеціалізованих серверів для оптимізації мережевого коду під час синхронізації дії гравців, штучного інтелекту, інструментарію віртуальної та доповненої реальності, оптимізованих мережевих протоколів, античит-систем (Valve Anti-Cheat), модулів масштабування, серверної синхронізації, мережевих кодів, мереж доставки контенту, власних серверів та дата-центрів. Окреслено роль хмарних технологій та сучасних засобів передачі даних у формуванні конкурентного середовища для гравців та організації турнірів.

У результаті дослідження визначено основні технологічні напрямки, які потребують подальшого вдосконалення і розширення їх застосування у кіберспортивній галузі.

Ключові слова: *кіберспорт, кіберспортивні дисципліни, технології, програмне забезпечення, інновації, геймінг.*

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку кіберспорту помітним стало прогресуюче поширення технологій у розрізі появи нових платформ, графічних двигунів та інноваційних рішень у сфері геймінгу, що у комплексі формує нові можливості для гравців та організаторів турнірів.

Варто зазначити, що кіберспорт популяризується серед молоді, залучаючи аудиторію та безпосередньо учасників по всьому світу. Наприклад, турнір Pokémon UNITE Asia Champions League 2025 (Японія), який почався 16 листопада 2024 та триватиме до 23 лютого 2025 року, вже зібрав 476 658 годин перегляду та 43 години ефірного часу [1]. Під час проведення цього турніру охоплюються такі технологічні аспекти, як використання платформ Twitch, YouTube Live для його трансляції; доповнена реальність (AR) для створення інтерактивного досвіду для глядачів, що може включати зображення персонажів Pokémon

на арені та інтерактивні елементи в ігровому середовищі; елементи захисту даних та інформаційних систем від можливих загроз під час проведення турніру та інші технологічні компоненти.

На противагу зазначеному вище, Arena of Valor International Championship 2024 – восьмий щорічний міжнародний турнір з мобільної гри Arena of Valor, організований компанією Garena, який проходив з 5 по 29 грудня 2024 року у В'єтнамі, зібрав 25 730 157 годин перегляду та 142 години ефірного часу, призовий фонд становив 494 000 доларів США [3]. Серед технологічних аспектів організації турніру можна виділити наступні:

– використання технології онлайн-трансляцій, зокрема, турнір транслюється у форматі 4K HDR з низькою затримкою, що дозволяє глядачам спостерігати за кожним моментом змагань;

– мультиканальні трансляції – матчі доступні на багатьох платформах, а саме: YouTube, Facebook Gaming, TikTok Live та Twitch;

– використання хмарних серверів, що зменшує затримку під час матчів, забезпечуючи справедливі умови гри для команд із різних регіонів;

– впровадження античит-систем – інтегровані технології для моніторингу та запобігання шахрайству під час геймінгу;

– використання доповненої реальності (AR) у трансляціях для візуалізації статистики, складу команд і кращих моментів гри під час трансляцій;

– застосування голограм героїв і об'єктів гри, що додають динаміки під час аналізу та презентації [3].

Дослідження тенденцій кіберспорту у розрізі кіберспортивних дисциплін є каталізатором подальшого вивчення нових технологічних аспектів з урахуванням економічного потенціалу, інтердисциплінарності та перспективності даної галузі.

Відповідно, тема є актуальною для дослідження та аналізу, оскільки вона відображає сучасні виклики та можливості у кіберспорті, що безпосередньо пов'язані з технологічними досягненнями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кіберспорт є однією з найбільш динамічних та швидко зростаючих галузей сучасної цифрової індустрії. Останні іноземні та українські публікації свідчать про те, що кіберспортивна галузь має тенденцію до зростання завдяки технологічним інноваціям, глобальним інвестиціям та залученню нових аудиторій. Питання технологічного розвитку кіберспорту у розрізі кіберспортивних дисциплін займалися такі науковці О. Б. Шидловська, Т. І. Іщенко [4], І. О. Лазнева, Д. І. Цараненко [5], Є. В. Чайка [6], Ж. Буске, М. Ерц [7], К. Вердер [8] та інші.

Шидловська та Іщенко [4] розглядали кіберспортивні тенденції у розрізі готельної індустрії. Авторами не було враховано технологічний аспект розвитку індустрії. На противагу цьому, Лазнева та Цараненко [5] дослідили особливості функціонування кіберспорту у різних регіонах світу та визначили його вплив на структуру ринку комп'ютерних ігор.

Буске та Ерц [7] у своїй роботі представили історичний огляд кіберспортивної індустрії, окреслили його поточний стан з економічної та ринкової точок зору, проте технологічну складову зазначеної галузі не було розглянуто.

Незважаючи на зростаючий інтерес до вивчення кіберспортивної галузі, питання технологічних основ безпосередньо функціонування кіберспортивних дисциплін як ключових характеристик індустрії, їх тенденцій та перспектив потребує більш детального аналізу.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є визначення ключових технологічних аспектів розвитку кіберспортивних дисциплін, їх тенденцій та подальших перспектив інноваційних змін.

Виклад основного матеріалу. Кіберспорт почав активно розвиватися у різних країнах, зокрема у Сінгапурі, і з часом став популярним у всьому світі. Ключовими елементами проведення масштабних кіберспортивних турнірів (The International, CS:GO Major Championships, League of Legends World Championship тощо) є потужний технологічний потенціал – від найсучаснішого ігрового обладнання до складних систем для прямих трансляцій. У таблиці 1 представлені ключові інновації геймінгу.

Варто зазначити, що із розвитком штучного інтелекту, доповненої та віртуальної реальності і мереж нового покоління кіберспорт стає все більш захоплюючим і захопливим для потенційної аудиторії. Інновації створюють підґрунтя для захоплюючого майбутнього. Від високопродуктивного обладнання до новітньої аналітики на основі штучного інтелекту – технології є основою кіберспорту.

Технології кіберспорту значно відрізняються залежно від кіберспортивної дисципліни, оскільки різні жанри ігор вимагають унікального підходу до організації, обладнання, трансляцій та взаємодії. Станом на грудень 2024 року у Топ-5 кіберспортивних дисциплін входили Defence of the Ancients 2 (Dota 2), League of Legends (LoL), Counter Strike:

Таблиця 1

Інновації у кіберспортивній галузі

Технології / Інновації	Характеристика
Високопродуктивне ігрове обладнання	ігрові комп'ютери, відеокарти та монітори з високою частотою оновлення, ігрові миші з регульованими налаштуваннями DPI.
Використання хмарних технологій	**NVIDIA GeForce Now** – хмарна ігрова платформа, яка дозволяє запускати ігри з бібліотек Steam, Epic Games Store, Ubisoft Connect тощо. **Xbox Cloud Gaming** – частина підписки Xbox Game Pass Ultimate, що дозволяє грати в ігри з бібліотеки Xbox через хмару.
Віртуальна та доповнена реальність	У спеціальних VR-іграх, зокрема Echo Arena, Beat Saber, Pavlov VR чи VRChat Battle Royale, гравці повністю занурюються у віртуальне середовище, а їхні фізичні рухи відображаються у грі. Віртуальна реальність **(VR)** може симулювати дії суперника, дозволяючи гравцям підготуватися до реальних турнірів.
	Під час трансляцій турнірів доповнена реальність **(AR)** використовується для накладання ігрової статистики, карт чи 3D-моделей персонажів прямо на сцену або екран. Ігри, які використовують AR (наприклад, Pokémon GO або Hado), перетворюють фізичне середовище у частину ігрового процесу.
Використання мереж 10 Гбіт/с і мереж з низькою затримкою	Сприяють більш плавному ігровому процесу, швидкому часу відгуку.

Джерело: авторська розробка на основі [9]

Global Offensive (CS:GO), Fortnite: Battle Royale та PUBG [2]. На рисунку 1 представлено основні характеристики зазначених дисциплін.

Оскільки у Топ-5 кіберспортивних дисциплін входять Dota 2, LoL та CS:GO, за якими проводяться наймасштабніші турніри із значними призовими фондами, розглянемо технологічні аспекти їх розвитку у розрізі використаного програмного забезпечення для геймплею, апаратного забезпечення та мережевих технологій на різних етапах еволюції зазначених відеоігор. У таблиці 2 представлені технологічні особливості розвитку кіберспортивної дисципліни Dota 2.

Відповідно, Dota 2 – це кіберспортивна дисципліна, що використовує різноманітні технології у сфері програмного забезпечення, апаратного забезпечення та мережевих технологій для забезпечення високої якості гри, стабільності та багатокористувацької взаємодії.

У грі Dota 2 використовується графічний двигун Source Engine, що розроблений компанією Valve та дає змогу:

– підтримувати високу якість графіки та фізики у реальному часі;

– інтегрувати складні ефекти, анімації та текстури;

– оптимізувати продуктивність гри на різних апаратних платформах за рахунок модульності [10].

Для забезпечення стабільного мережевого з'єднання та мінімізації лагів, Valve використовує виділені сервери для матчів, що дозволяє уникнути використання p2p-сервісів, де один з гравців є хостом, і знижує ймовірність лагів та затримок.

Для управління одиничними юнітами (наприклад, крипами та героями) у грі використовуються спеціалізовані алгоритми штучного інтелекту для пошуку найкращого шляху (pathfinding). Наприклад, алгоритми, подібні до *A (A-star)**, дозволяють персонажам ефективно рухатись по карті, уникати перешкод і взаємодіяти з іншими елементами гри.

Також Dota 2 інтегрована з Steamworks SDK, що дозволяє використовувати Steam Cloud для збереження прогресу, онлайн-магазин для покупок і косметичних предметів, а також Steam Workshop для підтримки модів і спільнот.

Таким чином, у кіберспортивній дисципліні Dota 2 використовується потужне програмне забезпечення, апаратне забезпечення та мережеві технології для забезпечення стабільності, високої продуктивності та безперебійного досвіду гри. Від графічного двигуна Source до розподілених серверів та технологій для зменшення затримок, що дозволяє забезпечити якісний геймплей у найскладніших умовах багатокористувацької онлайн-гри.

Ще однією популярною та масштабною кіберспортивною дисципліною є League of Legends (LoL), що підтверджується загальною кількістю зареєстрованих гравців – понад 150 мільйонів, активних гравців щомісяця – понад 117 мільйонів, активних гравців щодня – від 10 до 11 мільйонів. Також турнір League of Legends World

Рис. 1. Ключові характеристики ТОП-5 кіберспортивних дисциплін

Джерело: створено автором на основі [2]

Championship (Worlds) є головним і найпрестижнішим змаганням, яке проходить щороку і визначає найкращу команду світу [12]. Відповідно, варто розглянути технологічні аспекти зазначеної відеогри. У таблиці 3 представлені ключові технологічні аспекти кіберспортивної дисципліни LoL.

Відповідно, у грі League of Legends використовуються передові технології на всіх рівнях: від програмного забезпечення до апаратного забезпечення та мережевих технологій. Використання Unreal Engine 3 для графіки, оптимізація багатоядерних процесорів, а також виділені сервери для забезпечення стабільного з'єднання роблять гру доступною для великої аудиторії по всьому світу та сприяють високій якості ігрового процесу.

Ще одним флагманом у кіберспортивній галузі є гра Counter Strike: Global Offensive (CS:GO), яка з'явилася на початку 2000-х років. Це серія тактичних шутерів від першої особи, що стала основою для розвитку кіберспортивної сфери. Станом на кінець 2024 року було проведено 8 236 турнірів із загальним призовим фондом 155 837 479 доларів США, що підтверджує популярність та поширеність зазначеної кіберспортивної дисципліни. У таблиці 4 представлені ключові технологічні аспекти CS:GO.

Таким чином, у кіберспортивній дисципліні CS:GO компанія Valve використовує передові технології для забезпечення високої якості гри та ефективної роботи серверів, зокрема, Source Engine забезпечує реалістичну графіку і фізику, що значно покращує ігровий процес; для стабільної роботи гри та мінімізації затримок використовуються UDP протоколи, 128-tick сервери та інші мережеві технології, а розвинена античит-система гарантує чесність ігрового процесу. У комплексі зазначені технології роблять CS:GO однією з найпопулярніших ігор у світі, що продовжує розвиватися, підтримуючи високу конкурентоспроможність та інновації.

Висновки. Під час виконання поставленої мети дослідження було проаналізовано тенденції у кіберспортивній галузі у розрізі кіберспортивних дисциплін. Стрімкий прогрес кіберспорту

Таблиця 2

Технологічні аспекти розвитку кіберспортивної дисципліни DOTA 2

Рік	Етап	Особливості розробки
2003	Розробка	**Dota Allstars** – модифікація для Warcraft III, створена Ейданом "Eul" (оригінальна версія Dota).
2005		Підтримка модифікації IceFrog за рахунок внесення нових героїв у Dota Allstars.
2011		Офіційний реліз на PAX 2011 – серія ігрових фестивалів, яка проводилася для геймерів, розробників і шанувальників відеоігор; запущено бета-версію, включаючи понад 50 героїв, покращена графіка та механіка.
2014		Запуск **Dota 2 Workshop**, який дозволяв гравцям створювати власний контент, який може бути доданий до гри.
2016		Запуск **Dota Plus** – сервіс з підпискою, що надає аналітику та інструменти для покращення гри.
2018		Запуск **Battle Pass** – сезонна система прогресії в Dota 2, яка пропонує гравцям широкий набір нагород, завдань, ігрових режимів та тематичних івентів.
2013	Впровадження	Офіційний реліз Dota 2 9 липня 2013 року; старт The International 2013 з призовим фондом у $1 мільйон.
2015		Введення **Compendium** (спеціальний додатковий контент) для підтримки The International; прибуток від продажів компенсує призовий фонд.
2017		Дебют The International 2017 з призовим фондом у $24 мільйони; використання нових механік, зокрема Aghanim's Scepter.
2019		Продовження розвитку Battle Pass; використання нових систем матчмейкінгу (Ranked Matchmaking, Normal (Unranked) Matchmaking, Role-Based Matchmaking тощо) для покращення ігрового досвіду.
2021		Повернення фізичних турнірів; The International відбувся у Швеції з призовим фондом у $40 мільйонів.
2023		Продовження активного розвитку контенту, збільшення онлайн-активності та популярності гри на Twitch.

Джерело: авторська розробка на основі [10]

Таблиця 3

Технологічні аспекти кіберспортивної дисципліни LoL

Технології / Інновації / Програмне забезпечення	Характеристика
Графічний двигун	**Unreal Engine 3** – обробка графіки, що дозволяє реалізувати ефекти, анімацію та текстури для великої кількості персонажів і об'єктів на карті. Особливостями графічного двигуна є динамічні освітлення та текстури, покращена ефективність на низьких налаштуваннях графіки для широкого спектра пристроїв та підтримка фізичних ефектів.
Штучний інтелект (AI)	Використання AI для створення ботів, з якими гравці можуть тренуватися або грати в одиночному режимі. Боти адаптуються до рівня гри гравця, використовуючи алгоритми для аналізу поведінки.
Модулі масштабування	Використовуються для покращення графіки на слабших системах без великої втрати якості зображення.
Виділені сервери Riot Games	Використовуються власні виділені сервери для кожного регіону, що дозволяє забезпечити високу якість з'єднання та знизити пінг для гравців. Інфраструктура Riot складається з глобальної мережі серверів, що дозволяє рівномірно розподіляти навантаження та покращувати доступність гри для користувачів.
Серверна синхронізація	Оптимізація мережевого коду для синхронізації дії гравців у реальному часі, що дозволяє зменшити затримки і забезпечити гладкий процес гри навіть при високому навантаженні на сервери.

Джерело: авторська розробка на основі [12]

зумовлений впровадженням інноваційних технологій, які забезпечують високу якість геймплею, стабільність та захопливий досвід для учасників.

Ключовими елементами кіберспорту є використання високопродуктивного ігрового обладнання, хмарних платформ (наприклад, Xbox Cloud

Таблиця 4

Технологічні аспекти кіберспортивної дисципліни CS:GO

Технології / Інновації / Програмне забезпечення	Характеристика
Графічний двигун	**Source Engine**, який характеризується покращеною фізикою об'єктів (рух гранат, фізика зброї), удосконаленими текстурами і освітленням та підтримкою нових ефектів і технологій, таких як HDR та антиаліасинг.
Мережевий код	**Tickrate** – кількість оновлень сервера на секунду. У CS:GO найбільші турніри використовують сервери з 128-tick для більш точного відображення подій на екрані гравців. Використовуються протоколи для зменшення пінгу та покращення синхронізації між гравцями.
Власні сервери та дата-центри	CS:GO використовує численні сервери, розташовані в різних регіонах світу, щоб забезпечити гравцям найкращу якість з'єднання.
Античит-система	VAC (Valve Anti-Cheat) – це система, яка постійно оновлюється для виявлення шахрайства у грі. VAC працює на сервері і дозволяє видаляти з гри гравців, які використовують чити або інші нелегітимні методи.
Мережа доставки контенту (Content Delivery Network (CDN))	CDN використовується для доставки контенту до гравців, таких як оновлення гри, скіни, кейси та інші косметичні елементи, що дозволяє зменшити час очікування при завантаженні контенту.

Джерело: авторська розробка на основі [11]

Gaming, NVIDIA GeForce Now, Riot Games), віртуальної та доповненої реальності, а також мереж нового покоління. Такі дисципліни, як Dota 2, League of Legends та CS:GO, демонструють технологічну досконаліть через застосування передових графічних двигунів (Source Engine, Unreal Engine 3 тощо), спеціалізованих серверів, штучного інтелекту, інструментарію віртуальної та доповненої реальності, оптимізованих мережевих протоколів, античит-систем для уникнення шахрайства.

Інновації у кіберспортивній галузі продовжують змінювати спосіб взаємодії між гравцями та глядачами, сприяючи зростанню популярності кіберспорту на глобальному рівні, а технології – створюють адаптивне майбутнє для цієї індустрії, що об'єднує розваги, конкуренцію та передові науково-технічні досягнення.

Список літератури:

1. Pokémon UNITE Asia Champions League 2025 – Japan / Statistics. *Esports Charts*. URL:https://surl.li/kjdsos (Access date 26 December 2024).

2. ТОП-5 кіберспортивних дисциплін. *Esports Ukraine*. URL: https://esports.ua/esports/article/1-top-5-kibersportivnich-disciplin (Дата звернення 28.12.2024).

3. Arena of Valor International Championship 2024 / Statistics. *Esports Charts*. URL: https://escharts.com/tournaments/aov/arena-valor-international-championship-2024 (Access date 26 December 2024).

4. Шидловська О.Б., Іщенко Т.І. Кіберспорт – новітній напрям в готельній індустрії. *Географафія та туризм.* 2019. № 45. URL:https://surl.li/jyqhkf

5. Лазнева І. О., Цараненко Д. І. Кіберспорт та його вплив на зміну структури світового ринку комп'ютерних ігор. *Науковий вісник Ужгородського національного університету.* 2018. № 22. С. 63-67. URL:https://surl.li/ixzwmf

6. Чайка Є. В. Стан та динаміка росту ринку кіберспорту. *Економічний вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».* 2018. № 15. DOI: 10.20535/2307-5651.15.2018.143144.

7. Bousquet J., Ertz M. eSports: Historical Review, Current State, and Future Challenges. *Handbook of Research on Pathways and Opportunities Into the Business of Esports.* Publisher: IGI Global. 2021. P. 1-24. DOI: 10.4018/978-1-7998-7300-6.ch001.

8. Werder K. Esport. *Business & Information Systems Engineering*. 2022. 64(3). P. 393-399. DOI: https://doi.org/10.1007/s12599-022-00748-w.

9. Technology in Esports: Innovations Driving the Industry. *MyRepublic.* 2024. URL: https://surl.li/jhxdzf (Access date 30 December 2024).

10. Оновлення. *DOTA2.* URL: https://www.dota2.com/news/updates (Дата звернення 02.01.2025).

11. Updates. *CS.* URL: https://www.counter-strike.net/news/updates (Access date 3 January 2025).

12. Game updates. *LoL.* URL: https://www.leagueoflegends.com/en-us/news/game-updates/ (Access date 3 January 2025).

Yefimenko A.Yu., Koibichuk V.V., Mynenko S.V., Kushnerov O.S., Hrytsenko K.H.

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF THE ESPORTS DISCIPLINES DEVELOPMENT: TRENDS AND PROSPECTS

Esports is a modern-world phenomenon that combines high technologies, interactive entertainment, and a global audience. The rapid development of the industry is largely driven by advancements in hardware, software, and networking technologies. The aim of the study is to identify the key technological aspects of the development of esports disciplines, their trends, and the prospects for future innovative changes.

The article discusses the technologies and their impact on the development of esports disciplines as the core elements of the esports industry, taking into account current challenges. Special attention is given to the implementation of innovative solutions such as specialized artificial intelligence algorithms, virtual and augmented reality, high-performance computing platforms, cloud platforms (Xbox Cloud Gaming, NVIDIA GeForce Now, Riot Games), next-generation networks (10 Gb/s networks and low-latency networks), and others.

During the analysis and comparison of the technologies used in the esports disciplines Dota 2, League of Legends, and CS:GO, which are in the Top 5, their technological excellence is determined through the use of advanced graphic engines (Source Engine, Unreal Engine 3, etc.), specialized servers for optimising the network code during synchronising the players actions, artificial intelligence, virtual and augmented reality tools, optimized network protocols, anti-cheat systems (Valve Anti-Cheat), scaling modules, server synchronization, network codes, content delivery network, proprietary servers, and data centers.

The role of cloud technologies and modern data transmission tools in shaping the competitive environment for players and organizing tournaments is outlined.

As a result of the study, the key technological areas should be improvement and expanded application in the esports industry.

Key words: *esports, esports disciplines, technologies, software, innovations, gaming.*

УДК 681.3.06
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/12

Зилевіч М.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сваха Д.М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИСОКОЕФЕКТИВНІ МЕТОДИ ПОСТАНОВКИ РАДІОЗАВАД НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ КОМУНІКАЦІЙНОГО СИГНАЛУ

У статті розглянуто сучасні підходи до постановки радіозавад, що ґрунтуються на аналізі комунікаційного сигналу. Визначено проблеми традиційних методів радіопридушення в умовах швидко змінюваних радіочастотних середовищ та запропоновано нові рішення, спрямовані на підвищення ефективності роботи систем радіоелектронної боротьби (РЕБ). Окрему увагу приділено адаптивним підходам до аналізу та придушення сигналів, які враховують структуру, параметри та динаміку цільових систем зв'язку.

Ключовими аспектами дослідження виступає аналіз сучасних систем зв'язку та обмежень існуючих методів радіопридушення, зокрема стосовно систем із адаптивною модуляцією та частотним хопінгом. Розробка алгоритмів для ідентифікації та класифікації сигналів, які дозволяють створювати ефективні цілеспрямовані стратегії глушіння. Визначення енергоефективних методів, що мінімізують ризики впливу на дружні та цивільні системи.

У дослідженні представлено комплексний аналіз існуючих підходів до створення радіозавад, зокрема проактивних, реактивних, функціонально-специфічних та гібридних методів. Описано переваги та недоліки кожного з них, а також наведено класифікацію методів залежно від функціональності. Для підвищення ефективності було запропоновано використання програмно-визначених радіосистем (SDR), які забезпечують гнучкість, точність і високу швидкодію під час аналізу та постановки завад.

Запропонований метод поєднує радіорозвідку з постановкою радіозавад, що дозволяє адаптивно змінювати параметри в реальному часі, оптимізуючи ефективність перешкод. Основні переваги нового підходу включають точність налаштувань для націлювання на конкретні компоненти пакету, такі як преамбули або синхрослова. Гнучкість зміни параметрів завад залежно від динаміки каналу. Ефективне використання енергії завдяки адаптивному управлінню активністю пристроїв.

Запропонований підхід порівняно із традиційними методами. Основними перевагами є менше енергоспоживання, більша точність та швидкодія. Дослідження закладає основу для подальшого розвитку систем РЕБ, орієнтованих на інформаційну безпеку в умовах сучасного інформаційного протистояння.

Ключові слова: *радіопридушення, радіоелектронна боротьба, програмно-визначене радіо (SDR), енергоефективність, комунікаційні сигнали, частотний хопінг, адаптивна модуляці, радіорозвідка.*

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток сучасних систем зв'язку зумовлює виникнення складних систем із вищими вимогами до безпеки та енергоефективності, що є викликом для традиційних методів постановки радіозавад. Зокрема, системи, що використовують широкосмугову передачу даних, адаптивну модуляцію та динамічне підлаштування параметрів сигналу, роблять застарілі методи глушіння, орієнтовані на фіксовані частоти або параметри сигналу, малоефективними. У зв'язку з цим виникають нові завдання для фахівців у галузі радіоелектронної боротьби, які спрямовані на забезпечення ефективного порушення ворожих комунікацій, мінімізуючи при цьому вплив на дружні системи та цивільну інфраструктуру.

Одна з основних проблем у постановці радіозавад загального призначення – це надмірне використання енергії, ризики створення перешкод для цивільних систем зв'язку та можливість ненавмисного втручання в союзні комунікації. У цьому контексті виникає нагальна потреба в розробці методів, що забезпечують точну і цілеспрямовану дію на ворожі системи зв'язку. Особливої актуальності дана тема набуває у військових та спеціалізованих системах, де радіоелектронна безпека є критично важливим елементом.

Для підвищення ефективності радіоелектронної боротьби (надалі – РЕБ) важливо досліджувати нові підходи до аналізу сигналів зв'язку. Це передбачає виявлення, класифікацію та адаптивну генерацію специфічних радіозавад, що спрямовані на порушення роботи цільових систем. Такий підхід забезпечує мінімальний вплив на суміжні канали та знижує енергоспоживання, що є ключовим фактором у сучасних військових операціях.

Дослідження зосереджено на розробці інноваційних високоефективних методів аналізу сигналів зв'язку, що відповідають сучасним вимогам до точності, швидкодії та енергетичної ефективності. Одним із перспективних напрямів є застосування програмно-визначених радіосистем (Software-Defined Radio, SDR) для реалізації адаптивних завад. Зокрема, пристрої на кшталт BladeRF забезпечують можливість швидкої обробки сигналів, генерації цілеспрямованих завад та динамічної адаптації до змін параметрів комунікаційних систем.

Формування цілеспрямованих завад здійснюється шляхом аналізу структури сигналів, їх частотних спектрів і часових характеристик. Такий підхід дозволяє ефективно порушувати роботу критичних компонентів систем зв'язку, мінімізуючи при цьому побічні ефекти для суміжних систем. Таким чином, запропоновані методи відкривають нові можливості для оптимізації роботи сучасних комунікаційних технологій в умовах високої динаміки та складних технічних викликів. Значення цього дослідження полягає не лише у вирішенні актуальних завдань РЕБ, але й у створенні фундаментальної бази для розробки майбутніх технологій забезпечення інформаційної безпеки в умовах інформаційного протистояння.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Принцип роботи будь-якої системи радіоелектронної боротьби (РЕБ) спрямований на навмисне порушення бездротової передачі даних, зокрема шляхом зайняття середовища передачі або спотворення сигналів, що змушує передавачі втрачати зв’язок. Переважно такі дії спрямовані на фізичний рівень передачі пакетів, хоча можливі й міжрівневі атаки. Методи радіопридушення поділяються на прості та складні залежно від функціональності. У свою чергу, прості методи класифікуються на проактивні та реактивні. Складні методи поділяються на два підтипи: функціонально-специфічні та розумно-гібридні. Більш детальна класифікація представлена на рисунку 1.

Проактивні завади створюють сигнали перешкод незалежно від передачі даних у мережі. Вони надсилають пакети або випадкові дані заважаючи працювати всім вузлам на цьому каналі. Ці завади працюють на одному конкретному каналі. Існує три основні типи проактивних завад: постійні, оманливі та випадкові.

1. Метод постійної завади безперервно генерує випадкові біти, ігноруючи протокол CSMA [1]. Згідно з механізмом CSMA, перед передаванням даних легітимний вузол повинен перевірити стан бездротового середовища. Передавання дозволяється лише тоді, коли середовище залишається вільним протягом встановленого інтервалу DIFS (DCF Interframe Space). Якщо канал зайнятий під час цього інтервалу, вузол відкладає передавання. Постійний глушник створює постійну зайнятість бездротового середовища, блокуючи комунікацію між легітимними вузлами. Хоча така атака легко виявляється та не є енергоефективною, вона є досить простою

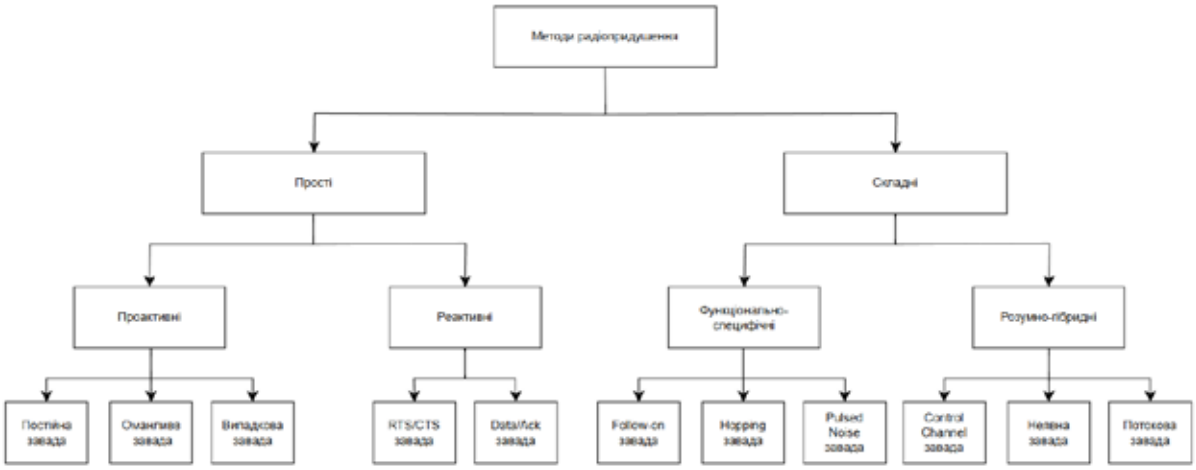


Рис. 1. Класифікація методів радіопридушення

в реалізації та здатна повністю паралізувати комунікацію між вузлами мережі.

2. Метод оманливої завади постійно передає стандартні пакети, замість випадкових бітів, як це відбувається у випадку постійних завад. Він вводить інші вузли в оману, створюючи ілюзію легітимної передачі даних, через що вони залишаються в режимі приймання, доки завада не припиниться або не буде усунена. У порівнянні з постійною завадою, виявити оманливу заваду складніше, оскільки вона використовує звичайні пакети, а не випадкові біти. Проте, подібно до постійних завад, оманливі також не є енергоефективними через безперервну передачу [1].

3. Метод випадкових перешкод періодично передає випадкові біти або звичайні пакети. Він чергує фази активності і сну для економії енергії. Цей підхід є компромісом між енергоефективністю та ефективністю постанови радіозавди, оскільки він не може створювати радіозавади під час фази сну [1].

Постановка реактивних завад ґрунтується на активації засобу радіопридушення тоді, коли виявлено мережеву активність на певному каналі [1], і має на меті порушити приймання повідомлень. Застосування даного методу доцільне по відношенню як до малих, так і до великих пакетів, але є менш енергоефективним, ніж метод випадкових перешкод, оскільки вимагає постійного моніторингу радіо ефіру. Однак виявити реактивну заваду важче, ніж проактивну, через складність точного вимірювання коефіцієнта надсилання пакетів (PDR). Існує два методи постановки реактивних перешкод:

1. Метод завад RTS/CTS активується при виявленні RTS-повідомлення. Він спотворює RTS, запобігаючи отриманню відповіді CTS від одержувача, що змушує відправника припинити передачу. Крім того, даний метод може створювати перешкоди після отримання RTS і до відправлення CTS, не даючи відправнику можливості передавати дані [2].

2. Метод завад Data/ACK націлений на пакети даних або ACK-пакети. Активується при детектуванні початку передачі даних, а потім пошкоджує дані або пакети ACK, змушуючи їх повторно передаватися.Якщо дані пошкоджені або ACK-пакети втрачені, відправник повторно передає дані [2].

Функціонально-специфічні завади розробляються з наперед визначеною функцією і можуть бути як проактивними, так і реактивними. Вони можуть працювати на одному каналі для економії енергії або охоплювати кілька каналів для більшої пропускної здатності перешкод, незалежно від споживання енергії. Навіть якщо вони зосереджені на одному каналі – можливе перемикання між каналами залежно від їхньої функціональності. Існує три методи постановки функціонально-специфічних завад:

1. Метод завад Follow-on швидко перемикається між каналами (тисячі разів на секунду), створюючи перешкоди в кожному з них на короткий проміжок часу. Він перемикає канали при виявленні завад і може використовувати псевдовипадкові послідовності, щоб зменшити можливість впливу на свою роботу з боку методів протидії завадам, таких як частотна модуляція з розширеним спектром (FHSS) [3].

2. Метод завад зі стрибкоподібною перебудовою каналів (Hopping) проактивно перестрибує між каналами, перекриваючи алгоритм CSMA. Такий метод може блокувати декілька каналів одночасно, використовуючи псевдовипадкову послідовність, і залишається прихованим під час фази виявлення [4, 5].

3. Метод імпульсно-шумових завад може перемикатися між каналами і смугами частот, заощаджуючи енергію, вмикаючись і вимикаючись за розкладом. На відміну від базових випадкових завад, такий метод може впливати на кілька каналів одночасно [6].

Розумно-гібридні завади є ефективними та дієвими у створенні перешкод, розроблені для максимального впливу з одночасним збереженням енергії. Ці методи можуть працювати як у проактивному, так і у реактивному режимах, націлюючись на всю мережу або значні її частини у великих мережах. Розглянуто три основних методи розумно-гібридних перешкод:

1. Метод керуючого каналу націлюється на відповідний канал у багатоканальних мережах, порушуючи координацію. У цьому випадку випадкові завади можуть значно погіршити продуктивність, тоді як безперервні завади можуть повністю заблокувати доступ [7].

2. Метод неявного глушіння використовує алгоритм адаптації швидкості, що використовується в бездротових мережах, викликаючи відмову в обслуговуванні на інших вузлах, коли точка доступу зосереджує свою увагу на зв'язку з вузлом зі слабким сигналом [8].

3. Метод глушіння потоку вимагає використання декількох пристроїв для зменшення потоку трафіку, як в централізованих, так і в децентралізованих моделях. При централізованому управлінні пристрій постановки використовує розраховану потужність для ефективності, в той час як

в децентралізованих моделях пристрої обмінюються інформацією для оптимізації атаки [9].

Постановка завдання. Метою цієї роботи є розробка ефективних методів аналізу сигналів зв'язку та реалізації методів цілеспрямованого радіопридушення. Основна мета полягає в ефективному виведенні з ладу систем зв'язку противника з одночасним мінімізацією споживання енергії та зменшенням перешкод для суміжних систем. Для досягнення цієї мети дослідження зосереджене на кількох ключових напрямках:

1. Проведення аналізу сучасних систем зв'язку та методів динамічної модуляції сигналів, що дозволить виявити обмеження існуючих методів радіозавад, зокрема проти систем з адаптивною модуляцією.

2. Розробка алгоритму для ідентифікації та класифікації сигналів зв'язку, що стане основою для створення більш точних стратегій їхнього нейтралізування.

3.Створення методів глушіння, які забезпечуватимуть енергоефективність і мінімізуватимуть ризики виникнення перешкод для дружніх систем або цивільної інфраструктури.

Запропонований підхід сприятиме підвищенню ефективності сучасних методів радіопридушення в умовах динамічно змінюваного радіочастотного середовища.

Виклад основного матеріалу. Радіо пакети є основою для передачі інформації в будь-якій системі бездротового зв'язку, включаючи системи з частотним хопінгом та складними схемами модуляції. Розуміння структури пакету на фізичному рівні є ключовим для створення ефективних методів глушіння, які можуть націлювати перешкоди на критичні компоненти пакету, блокуючи комунікацію. Пакет в радіоефірі зазвичай складається з кількох основних елементів:

1. **Преамбула (Preamble)** є першою частиною пакету, яка допомагає приймаючому пристрою визначити початок пакету та синхронізувати свої параметри для прийому сигналу. Преамбула містить повторювані біти або спеціальні символи, які дозволяють приймачеві налаштуватися на конкретні параметри, як то часова синхронізація чи частотне зміщення. Преамбула часто використовується для визначення частотного зміщення та інших параметрів каналу зв'язку.

2. **Синхрослово (Synchronization Word).** Після преамбули слідує синхрослово, яке є важливим елементом для точної синхронізації між передавачем і приймачем. Синхрослово допомагає приймачеві визначити точний момент початку передачі даних і уточнити час та частоту для коректного прийому. Воно є унікальним набором бітів, що відрізняється від інших частин пакету, що дозволяє приймачеві чітко розпізнати цей сигнал серед шумів або перешкод.

3. **Дані (Payload) та опціональні поля.** Основна частина пакету – це дані або payload. Це безпосередньо корисні дані, що передаються через канал зв'язку. Розмір і структура цих даних можуть змінюватися в залежності від стандарту або технології зв'язку. В системах з пакетною комутацією ці дані можуть бути поділені на кілька сегментів, які передаються окремо, а потім збираються разом у приймачі. Опціональні поля містять додаткову інформацію, яка може бути необхідна для коректної роботи системи. Це можуть бути поля для корекції помилок, перевірки цілісності даних (наприклад, CRC – циклічний контрольний код), а також інструкції або параметри конфігурації для пристрою прийому або передачі.

Для наочності на рисунку 2 наведено формат пакета для радіомодуля RFM66

За результатами проведеного аналізу пропонується енергоефективний метод глушіння, який поєднує в собі дві ключові складові: радіорозвідку та постановку радіозавад на основі отриманих даних. На першому етапі проводиться аналіз параметрів каналу зв'язку з використанням SDR (Software Defined Radio) технологій, що дозволяє виявити важливі елементи сигналу, такі як частоти, синхрослово та преамбулу. Отримані результати використовуються для точного налаштування завад націлених на конкретні частоти та компоненти пакету, що забезпечить високу ефективність і мінімізацію впливу на інші сигнали. Цей підхід дає змогу глушити лише ті канали зв'язку, які використовуються для передавання важливих

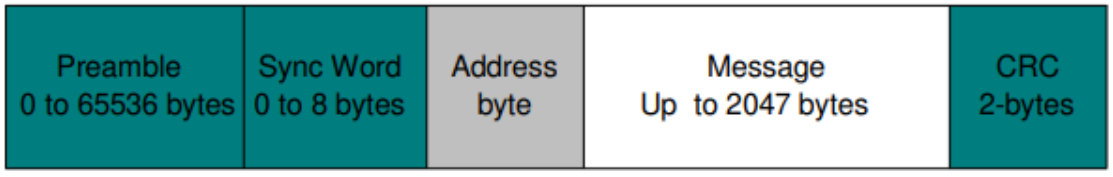


Рис. 2. Формат пакету для радіомодуля RFM66

даних, знижуючи ймовірність випадкового блокування інших бездротових систем.

1. **Радіорозвідка (Signal Intelligence).** На першому етапі SDR-пристрій проводить радіорозвідку для визначення параметрів каналу, включаючи частоти, на яких відбувається передача сигналу, типи модуляції, а також використання частотного хопінгу. Після проведення аналізу, необхідно зібрати таблицю частот, по яких відбувається комунікація, а також виявити синхрослово, що дозволяє точно визначити структуру пакету. Цей етап дає змогу зрозуміти, як виглядає передача, що дає основу для подальшої постанови завади.

2. **Аналіз параметрів сигналу.** Виявивши параметри передачі, необхідно налаштувати характеристики для синхронізації з каналом зв'язку. Визначення частотного хопінгу дозволяє створити таблицю частот, по яким передається цільовий комунікаційний сигнал. Важливим етапом є визначення розміру та значення синхрослова, довжини та значення преамбули, що дозволяє точно спрямовувати перешкоди на ключові компоненти пакету.

3. **Постановка завад на основі аналізу каналу.** Після збору необхідної інформації, SDR-пристрій активізує постановку завади, шляхом надсилання пакетів, що використовуватимуть визначені параметри та саме на тих частотах, які були визначені під час радіорозвідки. Дані перешкоди зможуть порушувати синхронізацію та перешкоджати коректному обміну пакетами між вузлами мережі.

Порівняння з іншими методами постановки завад. Традиційні методи, не завжди є ефективними, оскільки їхня основна мета максимально займати місце в одному або декількох каналах, для придушення корисного сигналу. Також через те, що при використанні традиційних методів намагаються створювати завади на максимальній потужності, такі пристрої не є енергоефективними.

У порівнянні з традиційними методами, метод на основі SDR має кілька переваг:

- **Точність налаштування**: SDR дозволяє націлюватися безпосередньо на конкретні частоти, синхрослова та преамбули, що робить постановку завад точнішим.
- **Гнучкість**: Завдяки програмному налаштуванню, можна швидко змінювати параметри завади в залежності від зміни каналу.
- **Радіорозвідка**: Можливість аналізувати канал та визначати його параметри до початку постановки завади значно підвищує ефективність впливу.

Висновки. У даній роботі розглянуто методи радіопридушення, спрямовані на створення перешкод для передачі інформації через радіоканали. Проведено аналіз наявних рішень у цій галузі та оцінено їхню ефективність у залежності від умов середовища та характеристик сигналу. Досліджено вплив параметрів сигналу, умов середовища та технічних характеристик засобів радіопридушення на їхню ефективність. Розглянуто можливість адаптації параметрів радіопридушення в реальному часі для підвищення ефективності перешкод і зменшення впливу на ненавмисні цілі. Запропоновано енергоефективний підхід, заснований на аналізі комунікаційного сигналу. Цей підхід дозволяє оптимізувати параметри роботи засобів радіопридушення для досягнення максимального рівня ефективності при мінімальному енергоспоживанні. Це є ключовим аспектом у розробці сучасних систем радіоелектронної боротьби.

Список літератури:

1. Wenyuan Xu, Wade Trappe, Yanyong Zhang, and Timothy Wood. The feasibility of launching and detecting jamming attacks in wireless networks. In Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing (MobiHoc '05). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2005, pp.46–57. https://doi.org/10.1145/1062689.1062697

2. K. Pelechrinis, M. Iliofotou and S. V. Krishnamurthy, "Denial of Service Attacks in Wireless Networks: The Case of Jammers," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 13, no. 2, pp. 245-257, Second Quarter 2011, doi: 10.1109/SURV.2011.041110.00022.

3. A. Mpitziopoulos, D. Gavalas, G. Pantziou and C. Konstantopoulos, "Defending Wireless Sensor Networks from Jamming Attacks," 2007 IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Athens, Greece, 2007, pp. 1-5, doi: 10.1109/PIMRC.2007.4394775.

4. Ghada Alnifie and Robert Simon. A multi-channel defense against jamming attacks in wireless sensor networks. In Proceedings of the 3rd ACM workshop on QoS and security for wireless and mobile networks (Q2SWinet '07). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2007, pp.95–104. https://doi.org/10.1145/1298239.1298257

5. Alnifie, Ghada & Simon, Robert. MULEPRO: A multi-channel response to jamming attacks in wireless sensor networks. Wireless Communications and Mobile Computing. 2010. DOI:10. 704-721. 10.1002/wcm.734.

6. Muraleedharan, Rajani & Osadciw, Lisa. Jamming attack detection and countermeasures in wireless sensor network using ant system. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2006. DOI:10.1117/12.666330.

7. Loukas Lazos, Sisi Liu, and Marwan Krunz. Mitigating control-channel jamming attacks in multi-channel ad hoc networks. In Proceedings of the second ACM conference on Wireless network security (WiSec '09). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2009., pp. 169–180. https://doi.org/10.1145/1514274.1514299

8. Broustis, Ioannis & Pelechrinis, Konstantinos & Syrivelis, Dimitris & Krishnamurthy, Srikanth & Tassiulas, Leandros. FIJI: Fighting implicit jamming in 802.11 WLANs. № 19., 2009., pp. 21-40. 10.1007/978-3-642-05284-2_2.

9. Tague, Patrick & Slater, David & Poovendran, Radha & Noubir, Guevara. Linear Programming Models for Jamming Attacks on Network Traffic Flows. 2008. pp. 207 – 216. DOI: 10.1109/WIOPT.2008.4586066.

Zylevich M.O., Svakha D.M. HIGHLY EFFICIENT METHODS OF DETERMINING RADIO INTERFERENCE BASED ON COMMUNICATION SIGNAL ANALYSIS

The article considers modern approaches to jamming based on communication signal analysis. The problems of traditional jamming methods in rapidly changing radio frequency environments are identified, and new solutions are proposed to improve the efficiency of electronic warfare (EW) systems. Special attention is paid to adaptive approaches to signal analysis and suppression that consider target communication systems' structure, parameters, and dynamics.

The key aspects of the study are the analysis of modern communication systems and the limitations of existing jamming methods, particularly systems with adaptive modulation and frequency hopping. Development of algorithms for signal identification and classification that allow for the creation of effective targeted jamming strategies. Determination of energy-efficient methods that minimize the impact risks on friendly and civilian systems.

The study presents a comprehensive analysis of existing approaches to jamming, including proactive, reactive, functionally specific, and hybrid methods. The advantages and disadvantages of each of them are described, and the methods are classified depending on their functionality. To increase efficiency, it was proposed to use software-defined radio systems (SDR), which provide flexibility, accuracy, and high speed during analysis and jamming.

The proposed method combines radio reconnaissance with jamming, which allows adaptively changing parameters in real-time, optimizing the effectiveness of jamming. The main advantages of the new approach include the accuracy of settings for targeting specific packet components, such as preambles or syncwords. Flexibility in changing jamming parameters depending on channel dynamics. Efficient use of energy due to adaptive control of device activity.

The proposed approach is compared to traditional methods. The main advantages are lower power consumption, greater accuracy, and speed. The study lays the foundation for the further development of electronic warfare systems focused on information security in the conditions of modern information confrontation.

Key words: *radio jamming, electronic warfare, software-defined radio (SDR), energy efficiency, communication signals, frequency hopping, adaptive modulation, radio intelligence.*

УДК 655.226
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/13

Кавин Б.Я.
Національний університет «Львівська політехніка»

РАСТРУВАННЯ ПОЛІНОМІНАЛЬНО ПЕРЕТВОРЕНИХ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Стаття присвячена розробці моделі поліномінально перетворених цифрових зображень на основі аналізу властивостей растрової обробки на стадії приготування їх до друку для поліпшенні якості друкованих зображень.

У статті розроблено та представлено математичну модель поліномінального перетворення цифрових зображень світлих тонів у діапазоні $0 \le L \le 255$ рівнів. Зясовано, що розтяг динамічного діапазону дає змогу формувати типові варіанти градаційних характеристик зображення і різні алгоритми растрового перетворення. Визначено різниці характеристик растрування від лінійного перетворення, а також растрову оптичну густину растрово перетворених цифрових зображень на основі яких проаналізовано властивості растрування типових варіантів поліномінального перетворення.

У статті розроблено та представлено структурну схему симулятора растрування поліномінального перетворення цифрових зображень світлих тонів в пакеті MATLAB:Simulink, для розрахунку і побудови градаційних характеристик поліномінального перетворення, характеристик растрування їх різниць та растрової оптичної густини. Побудовано градаційні характеристики поліномінального перетворення цифрових зображень поданих рівнями сірого $0 \le L \le 255$, які є випуклими кривими зміщеними у світлі тони. Здійснено їх растрування та одержано різні алгоритми растрового перетворення, які розширяють можливості процесу растрової обробки зображень.

Визначено різниці градаційних характеристик від лінійного перетворення для оцінки властивостей растрування. Зясовано, що графіки різниць є відємними U-подібними кривими, мають екстремуми та відповідають абсолютному контрасту і кількісно характеризують реакцію зорової системи на світле зображення. Визначено оптичну густину растрово перетворених цифрових зображень, початкові значення яких становлять 2,389 одиниць і встановлено, що вони швидко зменшуються і після $L_0 > 50$ рівнів залежно від прйнятого алгоритму становлять від 0,5 до 0,3 одиниць, що властиво світлим тонам.

В статті сформовано рекомендації щодо використання результатів дослідження при приготуванні цифрових зображень до друкування, які сприятимуть поліпшенні якості друкованих зображень, зокрема результати дослідження та імітаційного моделювання можуть бути застосовані при приготуванні цифрових зображень до друкування для вибору оптимальної градаційної характеристики репродукції.

Ключові слова: *растрування, алгоритми, цифрові зображення, поліномінальне перетворення, характеристики, якість.*

Постановка проблеми. У поліграфії широко застосовують різні методи обробки цифрових зображень для покращення їх якості, здійснюють коригування і синтез тонопередачі. Однією із головних технологічних операцій на стадії приготування зображень до друкування є растрування цифрових зображень і виготовлення растрової друкарської форми за технологією компютер-друкарська пластина. У сучасних растрових процесах (RIP) оператор може задати роздільну здатність, лініатуру растра, вибрати форму растрових елементів тощо [5, с. 180]. Оператор який готує цифрове зображення до друкування у більшості не має оригіналу і коригує зображення на екрані монітора візуально, а якість зображення залежить від його кваліфікації, виробничого досвіду, знань і умінь, тому не може бути оптимальною.

В компютерних видавничих системах, програмах компютерної графіки та растровому процесі не передбачена програма побудови характеристики растрового перетворення цифрових зображень різних алгоритмів, тому оператор не має змоги оцінити результати растрування. У доступних джерелах мало інформації про властивості растрово перетворених цифрових зображень різної тональності і алгоритмів растрування. Отже аналіз властивостей растрування поліномінального перетворення цифрових зображень є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційні класичні методи раструванні основані

на засадах розкладання зображення за допомогою растрової сітки, а растрові елементи можуть мати квадратну, круглу, ромбічну чи овальну форму, величина площі яких є основним носієм інформації про тон зображення [1, с. 400]. У публікаціях [2, с. 235; 3, с. 155] розроблені моделі растрування для елементів квадратної і круглої форми та побудовані характеристики растрування для фізичної лініатури геометричного розміру і площини растрового елемента та проаналізовані їх властивості. На основі формули демодуляції [1, с. 400; 7, с. 488] розраховані характеристики растрової оптичної густини для лінійної зміни відносної площі [$0 \le S \le 1$], яка характеризує сприйняття зображення зоровою системою людини. У [6, с. 37] побудовані моделі нормованого растрового перетворення для растрових елементів квадратної, круглої і ромбічної форми, які дозволяють шляхом масштабування здійснити перехід до растрового перетворення заданої лініатури, що спрощує аналіз і коригування. Звернемо увагу на те, що традиційне класичне растрування безпосередньо не корилює із сучасним описом цифрових зображень подане 256 рівнями сірого.

З появою компютерної графіки і компютерних видавничих систем розроблено алгоритми растрування типу АІМ (амплітудно-імпульсна модуляція), ШІМ (широтно-імпульсна модуляція), а також новітні методи растрування: гібридні растри, стохастичні растри, растри фірми Agfa тощо [7, с. 488; 8, с. 291]. Встановлено, що новітні алгоритми растрування забезпечують кращу якість друкованих зображень у тому числі нульових [6, с. 37; 7, с. 488]. Однак, для їх впровадження у виробництво необхідно строго нормалізувати процес растрування, нормалізацію матеріалів, устаткування, наявність автоматичної системи зональної подачі фарби тощо, що значно затрудняє їх впровадження у виробництво не тільки в Україні, але і на Заході [8, с. 291; 9, с. 1104; 10, с. 594].

У доступних джерелах [1, с. 400; 7, с. 488; 8, с. 291 9, с. 1104; 10, с. 594] представлена інформації про растрування цифрових зображень, зокрема про характеристики різних алгоритмів растрування та їх властивості. Звернемо увагу на те, що традиційне класичне растрування та їх моделі безпосередньо не корилюють із сучасним описом цифрових зображень, відсутні звязки алгоритмів растрування із такими параметрами як цифрове зображення, демодуляція растрування, оптична густина тощо. Відсутність кількісних показників оцінки властивостей растрового перетворення цифрових зображень обмежує інформаційні можливості репродукційного процесу.

Постановка завдання. Мета статті: Розробити модель растрування поліномінального перетворення цифрових зображень, визначити характеристики растрування та оптичну густину, побудувати структурну схему моделі симулятора, визначити і побудувати градаційні характеристики типових варіантів цифрових зображень, визначити характеристики алгоритмів растрування їх оптичну густину, різниці від лінійного перетворення і провести аналіз растрування світлих тонів.

Виклад основного матеріалу. Для вирішення поставленої задачі моделювання растрового перетворення цифрових зображень світлих тонів застосували запропоноване автором поліномінальне перетворення яке формує цифрове зображення

$$L = \frac{b \times L_0}{L_0 + a}, \text{ якщо } 0 \le L_n \le 255 \qquad (1)$$

де, L_0 – лінійна шкала, яка змінюється в межах $0 \le L_0 \le 255$, b і a – сталі коефіцієнти, знаючи які можна одержати різні варіанти поліномінального перетворення світлих тонів.

Для растрування застосуємо нормоване цифрове поліномінальне перетворення

$$L_n = L \,/\, 255 \qquad (2)$$

і у загальному плані подамо растрування нормованого поліномінального перетворення зображень

$$S = F(L_n), \text{ якщо } 0 \le L_n \le 1 \text{ та } 1 \le S \le 0 \qquad (3)$$

де, F(◦) – функція яка забезпечує вибраний алгоритм растрування цифрового зображення.

Основні вимоги до функції: F(◦) – неперервна спадна функція яка відповідає поліномінальному перетворенню, параметри якої забезпечують задані алгоритми растрування, якщо $L_n = 0$ то функція F(◦) =1, коли $L_n = 1$ то F(◦) = 0 Для забезпечення поставлених вимог опрацьовано нормоване поліномінальне перетворення

$$L_n = \frac{2 \times L_0}{L_0 + a} \times M, \text{ якщо } 0 \le L_0 \le 1, \qquad (4)$$

де, a – коефіцієнт, M – масштаб донастроювання перетворення L_n в межах $0 \le L_0 \le 1$

Дальше опрацювали типові варіанти нормованого поліномінального перетворення цифрових зображень світлих тонів:

$$L_n 1 = \frac{2 \times L_0}{L_0 + 0,3} \times 0,65, \qquad (5)$$

$$L_n 2 = \frac{2 \times L_0}{L_0 + 0,5} \times 0,75, \quad (6)$$

$$L_n 3 = \frac{2 \times L_0}{L_0 + 0,8} \times 0,9, \quad (7)$$

$$L_n 4 = \frac{2 \times L_0}{L_0 + 1,3} \times 1,15, \text{ якщо } 0 \le L_0 \le 1, \quad (8)$$

в якому M_i – масштаб донастроювання L_n перетворення до межі $0 \le L_0 \le 1$

Якщо відоме нормоване поліноміальне перетворення, то здійснимо його растрування

$$S = 1 - L_n, \text{ якщо } 0 \le L_0 \le 1, \text{ та } 1 \le S \le 0 \quad (9)$$

Для дослідження опрацювали типові алгоритми растрового перетворення цифрових зображень (5)-(8) і визначимо їх різниці від лінійного перетворення

$$E = S_i - S_0 \quad (10)$$

де, S_i – відносні площі растрових елементів різних алгоритмів растрування S_0 – лінійна характеристика растрування

На основі відомого виразу визначили растрову оптичну густину поліноміального перетворення.

$$D = - log[1/(1,004-S)] \quad (11)$$

Для аналізу властивостей поданих алгоритмів растрування цифрових зображень застосували об'єктно-орієнтоване програмування в пакеті MATLAB:Simulink. На основі викладеного і виразів (5) – (11) розробили структурну схему моделі симулятора растрування поліноміального перетворення цифрових зображень світлих тонів, яка подана на рис. 1

Блок *Ramp* генерує лінійну шкалу L_0, яка масштабується блоком *Gain*, після чого поступає на входи функціональних блоків першого стовпця F_{cn} - $F_{cn}3$, у діалогових вікнах яких записані програми – вирази (5) – (8) типових варіантів поліноміального перетворення $L_n 1 – L_n 4$. Отримані величини масштабуються блоками *Gain 1 – Gain 4,* а на їх виходах одержують нормоване поліноміальне перетворення цифрових зображень світлих тонів $L_n 1 – L_n 4$, які подаються на вхід мультиплексора *Mux,* візуалізуються блоком *Scope* та подаються на входи функціональних блоків другого стовпця $F_{cn} 4$ - $F_{cn} 8$. У діалогових вікнах функціональних блоків записані програми – вираз (9) для растрування поліноміального перетворення, які візуалізуються блоком *Scope1*. На входи блоків віднімання *Add – Add3* подаються значення відносних площ *S1-S4*, а на другі входи – відносна площа S_0 – лінійної шкали. На виходах блоків *Add* одержується їх різниці *E1 – E4* – які візуалізуються блоком *Scope 2*. У діалогових вікнах блоків математичних функцій записані вирази (11) для визначенням растрової густини поліноміального перетворення *D1 – D4*, які візуалізуються блоком *Scope 3* і *Display 1*.

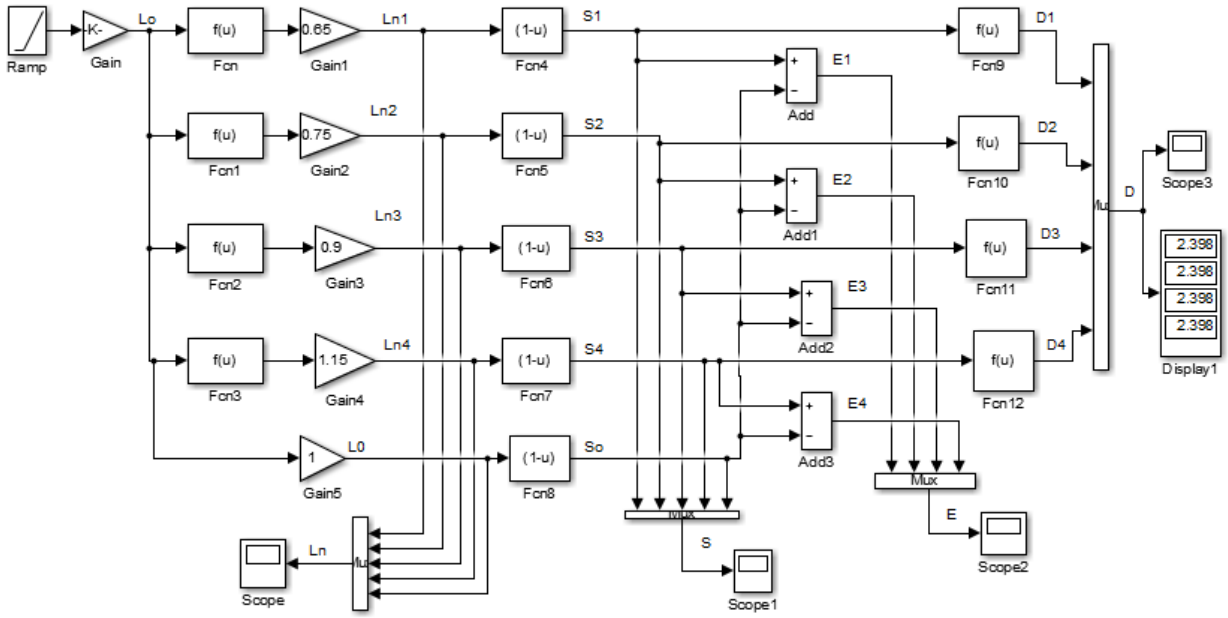


Рис. 1. Структурна схема моделі симулятора растрування поліноміального перетворення зображень світлих тонів

В процесі дослідження налаштували блоки математичних функцій на задані параметри і програми. В інтерактивному режимі роботи симулятора визначити масштаби: *M1=0,65; M2=0,75; M3=0,9; M4=1,15*. Результати імітаційного моделювання градаційних характеристик типових варіантів поліномінального перетворення цифрових зображень світлих тонів подані на рис. 2.

Для порівняння на рисунку подана лінійна шкала L_0. Градаційні характеристики є випуклими кривими і добре розтягнуті у світлі тони які досліджуються. На початку діапазону характеристики мають велику крутизну, тому швидко досягають світлих тонів. На середніх тонах крутизна поступово зменшується, а характеристики прямують до кінцевого значення *255* рівнів. Отже, поліномінальне перетворення добре розтягує світлий діапазон тонів порівняно з традиційним гама перетворенням.

Результати моделювання растрового перетворення типових варіантів поліномінального перетворення цифрових зображень світлих тонів подані на рис. 3.

Зверху розташована лінійна характеристика растрування L_0. Початкові значення характеристик растрового перетворення дорівнють одиниці, що відповідає темним тонам. Характеристики растрування є вгнутими кривими, і рівномірно розтягнутими у сторону світлих тонів, які растрюються. Отже, поліномінальне перетоврення дає змогу одержати різні алгоритми растрового перетворення цифрових зображень світлих тонів, що є перевагою порівняно із існуючими видами растрування.

Результати моделювання різниць характеристик растрування від лінійного перетворення подані на рис. 4.

Графіки різниць є *U*-подібними легко зміщеними ліворуч кривими. Знак мінус означає що лінійні значення різниць становлять: *E1 = – 0,142; E2 = -0,198; E3 = – 0,262; E4 = – 0,35* одиниць. Звернемо увагу на те, що різниці відносних площ $E = S_i - S_0$ пропорційні абсолютній різниці площі двох елементів, які є носіями тону, відповідає абсолютному контрасту [4] має екстремум, і кількісно у відносних одиницях характеризує реакцію зорової системи на світле збудження.

Результати моделювання растрової оптичної густини растрово перетворених цифрових зображень світлих тонів подані на рис. 5.

Початкове значення растрової оптичної густини становить 2,398 одиниць, швидко зменшується на початку діапазону і в околі $L_0 = 50$

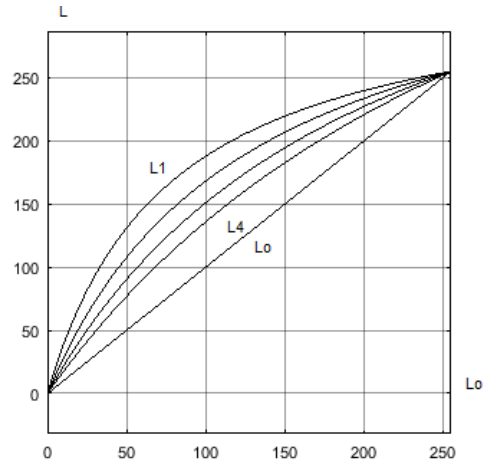


Рис. 2. Градаційні характеристики типових варіантів поліномінального перетворення цифрових зображень

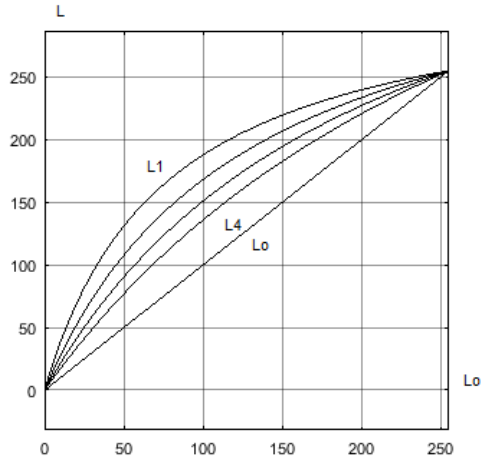


Рис. 3. Графіки растрового перетворення типових варіантів поліномінального перетворення цифрових зображень

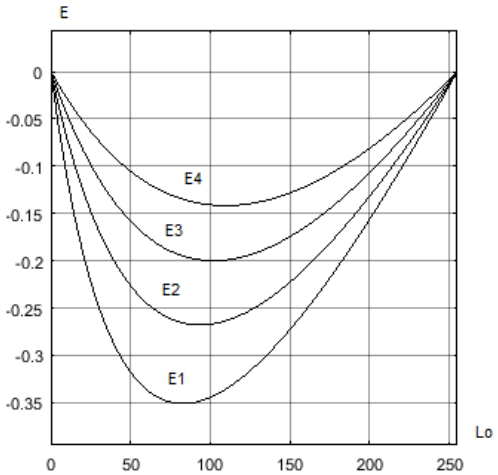


Рис. 4. Графіки різниць характеристик растрування від лінійного перетворення

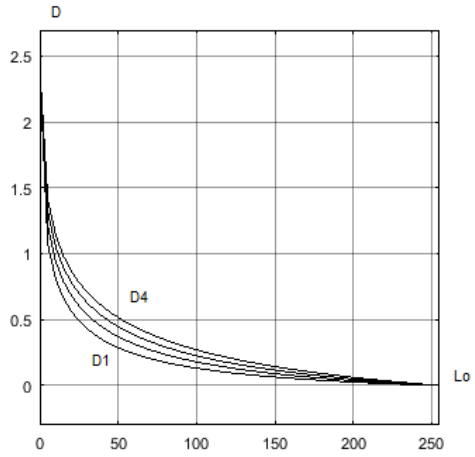


Рис. 5. Графіки растрової оптичної густини поліноміальних перетворень цифрових зображень світлих тонів

рівнів становить: *0,515; 0,446; 0,370; 0,286* одиниць. Після цього плавно і майже лінійно прямують до нульового кінцевого значення. Отже, растрова оптична густина для різних алгоритмів растрування цифрових зображень є мала майже на усьому діапазоні і відповідає світлим тонам.

Результати проведених досліджень можна застосувати у комп'ютерних видавничих системах при приготуванні цифрових зображень до друкування.

Висновки. Розроблено математичну модель растрування поліноміального перетворення цифрових зображень світлих тонів, що забезпечує кращі градаційні характеристики, різні алгоритми растрового перетворення, графіки різниць характеристики растрування від лінійного перетворення і растрової оптичної густини. На основі викладеного розроблено структурну схему моделі симулятора растрування поліноміального перетворення цифрових зображень світлих тонів в пакеті MATLAB:Simulink. Запрограмовано і налаштовано симулятор на чотири типові варіанти растрового перетворення, який розраховує і будує градаційні характеристики, визначає графіки алгоритмів растрування, різниць характеристик растрування від лінійної і растрової оптичної густини.

За результатами моделювання встановлено, що типові варіанти градаційних характеристик поліноміального перетворення є випуклими кривими добре розтягнуті у світлих тонах порівняно з традиційним гама перетворенням зображень. Початкові значення характеристик растрового перетворення дорівнюють одиниці, що відповідає темним тонам є вгнутими кривими рівномірно розтягнутими у сторону світлих тонів. Доведено, що поліноміальне перетворення дає змогу одержати різні алгоритми растрового перетворення цифрових зображень світлих тонів, що є перевагою над існуючими видами растрування.

Для оцінки властивостей растрового перетворення визначено різниці характеристик растрування від лінійного перетворення. Графіки різниць є відємними *U*-подібними кривими, а знак мінус означає, що лінійне растрове перетворення S_0 переважає S_i. Експерементальне значення різниць становлять: $E_1 = 0{,}142$; $E_2 = -0{,}198$; $E_3 = -0{,}262$; $E_4 = -0{,}35$ одиниць. Доведено, що різниця відносних площ $E = S_i - S_0$ пропорційна абсолютній різниці двох елементів, які є носіями тону, тому відповідають абсолютному контрасту, мають екстремум і кількісно характеризують реакцію зорової системи на світле збудження.

Встановлено, що початкове значення растрової оптичної густини растрового перетворення цифрових зображень становлять 2,389 одиниць, швидко зменшуються на початку діапазону і в околі $L_0 = 50$ рівнів становить: 0,515; 0,446; 0,370; 0,286 одиниць, що характеризує світлі тони. Після цього плавно і майже лінійно прямують до нульового кінцевого значення. Растрова оптична густина для різних алгоритмів растрування цифрових зображень є невелика майже на усьому діапазоні і відповідає світлим тонам.

Результати дослідження та імітаційного моделювання можуть бути застосовані при приготуванні цифрових зображень до друкування для вибору оптимальної градаційної характеристики репродукції.

Список літератури:

1. Барановський І.В, Яхимович Ю.П. Поліграфічна переробка образотворчої інформації. навч. посібник. Київ-Львів: ІЗМН, 1998. 400 с.

2. Барановський І.В, Луцків М.М., Філь Л.В. Побудова і аналіз характеристик растрування Наукові записки: Зб. наук. праць. Львів: УАД. 2013. № 4 (45).

3. Барановський І.В, Філь Л.В. Аналіз характеристики растрування для ромбічнорго растрового елемента Компютерні технології друкарства: Зб. наук. праць. Львів: УАД. 2013. № 45 – С. 150-157.

4. Воробель Р.А. Логарифмічна обробка зображень: монографія. Київ, НВП «Видавництво ''Наукова думка НАН'' України» 2012, 232 с.

5. Гавриш Б.М, Дурняк Б.В., Тимченко О.В., Ющик О.В. Відтворення зображень растровими скануючими пристроями: навч. посібн. Львів: УАД. 2016, 180 с.

6. Гунько Д.Т. Нормована модель растрового перетворення для елементів квадратної форми: Зб. наук. праць. Львів: УАД. 2020. № 2(38) – С. 32-39.

7. Луків М.М. Цифрові технологічні друкарства: монографія. Львів: УАД, 2012, 488 с.

8. Мартинюк В.Т. Основи друкарської підготовки образотворчої інформації: підручник Кн.2. Процеси опрацювання образотворчої інформації. Київ: Університет «Україна», 2009. 291 с.

9. Gonnzalez R., Woods E., Digstal image Processing: International Version 3-rd. Editon, Inc. publishing as Printice itall. Copuringht. 2008-1104 p.

10. Donnie O'Quinn Print Publishing a Hayden Shop Hahual. 201 West 103 rd. Street, Indiana-polis, Indiana. 2003-594 p.

11. Johre Berrd Digitall Image Processing. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. 2007-584p.

Kavyn B.Ya. RASTERIZATION OF POLYNOMIALLY TRANSFORMED DIGITAL IMAGES

The article is devoted to the development of a model of polynomially transformed digital images based on the analysis of the properties of raster processing at the stage of preparing them for printing to improve the quality of printed images.

The article develops and presents a mathematical model of polynomial transformation of digital images of light tones in the range $0 \le L \le 255$ levels. It is found that the extension of the dynamic range allows for the formation of typical variants of gradation characteristics of the image and various algorithms of raster transformation. The differences in the characteristics of rasterization from linear transformation are determined, as well as the raster optical density of rasterized digital images, on the basis of which the properties of the rasterization of typical variants of polynomial transformation are analyzed.

The article develops and presents a structural diagram of a simulator for rasterization of polynomial transformation of digital images of light tones in the MATLAB:Simulink package, designed for calculating and constructing gradation characteristics of polynomial transformation, rasterization characteristics of their differences, and raster optical density. The gradation characteristics of the polynomial transformation of digital images represented by gray levels $0 \le L \le 255$ are constructed, which are convex curves shifted towards light tones. They were rasterized, and various raster transformation algorithms were obtained, which expand the capabilities of the raster image processing process.

The differences in gradation characteristics from linear transformation were determined to assess the properties of rasterization. It was found that the difference graphs are negative U-shaped curves, have extrema, and correspond to absolute contrast, quantitatively characterizing the response of the visual system to a light image. The optical density of the raster-transformed digital images was determined, with initial values of 2.389 units, and it was established that they rapidly decrease. After Level $0 > 50$ levels, depending on the adopted algorithm, they range from 0.5 to 0.3 units, which is typical of light tones.

The article formulates recommendations for using the research results when preparing digital images for printing, which will help improve the quality of printed images. In particular, the results of the research and simulation modeling can be applied when preparing digital images for printing to select the optimal gradation characteristics of reproduction.

Key words: *rasterization, algorithms, digital images, polynomial transformation, characteristics, quality.*

УДК 655.226(5)
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/14

Кавин С.Я.
Національний університет «Львівська політехніка»

МОДЕЛЮВАННЯ СТЕПЕНЕВО-ЛІНІЙНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ СВІТЛИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Стаття присвячена розробці моделі степенево-лінійного перетворення зображень на основі аналізу властивостей класичних параметрів в додрукарських процесах поліграфії, (таких як градаційні характеристики, оптична щільність та контрастна чутливість), з метою вирішення задачі покращення візуальної якості зображень.

Розкрито суть явища постеризації – візуально помітні переходи від одного до іншого рівня сірого в темних ділянках зображення, що спотворює зображення.

У статті розроблено і представлено математичну модель степенево-лінійного перетворення цифрових зображень світлих тонів шляхом комбінації степеневого і лінійного перетворень. В процесі дослідження опрацьовано і представлено три типові варіанти степенево-лінійного перетворення зображень. Визначено градаційні характеристики, оптичну густину та контрастну чутливість, яка кількісно оцінює сприйняття зображення зоровою системою людини.

У статті розроблено і представлено модель трьохканального симулятора степенево-лінійного перетворення цифрових зображень у пакеті MATLAB:Simulink, що дає можливість розраховувати і будувати градаційні характеристики типових перетворень, оптичну густину та контрастну чутливість.

Здійснено дискретизацію градаційних характеристик на початку діапазону чорного зображення і проведено їх аналіз для виявлення постеризації степенево-лінійного перетворення

Зясовано, що в результаті імітаційного моделювання типових градаційних характеристик, вони є опуклими кривими і на початку діапазону мають малу крутизну, що усуває постеризацію на темних ділянках зображень. Встановлено, що на середньому діапазоні і у світах градаційні характеристики мають достатню крутість, тому не має втрат у світах. Початкові значення контрастної чутливості становлять дві одиниці, а їх характеристики є вгнутими кривими і прямують до кінцевих значень: 0.02; 0.41; 0.74.

Визначено в процесі дослідження, що градаційні дискретизовані характеристики мають початкові значення 1 рівень, а зорова система людини розрізняє (4 – 5) рівнів, тому у розробленому степенево-лінійному перетворенні відсутні умови виникнення постеризації на темних ділянках зображення, що є його перевагою.

В статті сформовано рекомендації щодо використання результатів проведених досліджень, зокрема типові градаційні характеристики степеневого лінійного перетворення, можуть бути застосовані на етапі обробки зображень у комп'ютерних видавничих системах.

Ключові слова: *модель, степенево-лінійне перетворення, аналіз, градаційні характеристики, оптична густина, симулятор, контраст чутливості.*

Постановка проблеми. Основні градаційні перетворення, які часто застосовуються для покращення якості зображення: лінійні, логарифмічні і степеневі [8, с. 1345; 9, с. 594; 10, с. 1104]. Для поліграфічного репродукування важливим є градаційна характеристика перетворення оригіналу, репродукції чи проміжного зображення. Зміна градаційної характеристики (коригування) здійснюється за допомогою програм компютерної графіки, у яких застосовують різні методи та засоби коригування і інструменти, наприклад, Curres (Криві). У робочому вікні задають градаційну характеристику і спостерігають зображення на моніторі. У більшості випадків оператор не має оригіналу, тому коригує зображення на власний розсуд. Відповідно якість зображення не може бути оптимальна. В програмах компютерної графіки не передбачена програма для побудови градаційної характеристики цифрового зображення, що обмежує їх можливості [3, с. 180; 5, с. 480; 6, с. 291].

При приготуванні цифрових зображень до друкування найчастіше застосовують степеневе перетворення зображень. У доступних джерелах мало уваги приділяють аналізу властивостей степеневого перетворення, зокрема зв'язку параметрів:

градаційних характеристик, оптичною густиною, контрастом, раструванням тощо, а також наявність постеризації – появи помітних переходів на темних ділянках зображення, що погіршує якість зображення [5, с. 480; 6, с. 291; 9, с. 594].

Отже розроблення нового методу степенево-лінійного перетворення світлих тонів і аналіз його властивостей є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Амплітудні характеристики багатьох пристроїв компютерних видавничих систем, (сканери, фотокамери, монітори, проектори, друкарські системи) описують і аналізують за допомогою степеневого перетворення, а процедура коригування їх характеристик за традицією називають гама коригування [6, с. 291; 7, с. 885; 9, с. 594]. У загальному плані степеневе перетворення цифрових зображень описується степеневою функцією [6, с. 291; 10, с. 1104]

$$L = M \times L_0^r, \text{ якщо } 0 \le L_0 . \le 1 \text{ та } 0 \le L \le 255 \quad (1)$$

де, L_0 – лінійна шкала (вхідне зображення), L – вихідне зображення після перетворення, M – масштаб, r – показник степені

Задаючи різні значення показника степені r, можна одержати множину градаційних характеристик. Значення показника $r < 1$ відповідає світлим тонам (розтяг зображення). Якщо степеневе перетворення використовується для коригування то необхідно вибрати потрібний показник степені r у виразі (1) У публікації [6, с. 291 7, с. 885; 4, с. 204] встановлено, що при показниках степені $r < 0,5$ та при $r > 1,5$ виникає постеризація – візуально помітні переходи від одного до іншого рівня сірого, що спотворює зображення та відповідно є основним недоліком степеневого перетворення і обмежує його властивості щодо інтервалів коригування. У звязку із викладеним актуальним є розроблення моделювання та здійснення аналізу степенево-лінійного перетворення зображень світлих тонів.

Постановка завдання. Мета статті: Розробити модель степенево-лінійного перетворення зображень світлих тонів, побудувати симулятор перетворення в пакеті MATLAB:Simulink за допомогою якого розрахувати і побудувати градаційні характеристики і провести аналіз їх властивостей.

Виклад основного матеріалу. У поліграфії при приготуванні зображень для друкування широко використовують класичне степеневе перетворення. Однак мало уваги приділено аналізу його властивості щодо зв'язку із класичними для поліграфії параметрами, градаційними перетвореннями, оптичною густиною, чутливістю, постеризацією, яка викликає візуально помітні переходи від одного до іншого рівня сірого на темних ділянках зображення, що спотворює зображення та обмежує його можливості [6, с. 291]. Для усунення постеризації і розширення функціональних можливостей степеневого перетворення розроблено степенево-лінійне перетворення світлих тонів, яке здійснюється шляхом віднімання степеневого перетворення від лінійного, яке у загальному плані подано виразом

$$L = (2 L_0 - L_0^r) \times 255,$$

$$\text{якщо } 0 \le L_0 \le 1 \text{ та } 0 \le L \le 255 \quad (2)$$

де, L_0 – лінійна шкала, L – вихідне перетворене зображення, r – показник степені.

Задаючи різні значення показника степені, можна одержати множину перетворень. Для дослідження опрацювали три типові варіанти степенево-лінійного перетворення зображень світлих тонів:

$$L_1 = (2 L_0 - L_0^r \times 2) 55, \quad (3)$$

$$L_2 = (2 L_0 - L_0^r \times 1,6) \times 255, \quad (4)$$

$$L_3 = (2 L_0 - L_0^r \times 1,3) \times 255,$$

$$\text{якщо } 0 \le L_0 \le 1 \text{ та } 0 \le L_i \le 255 \quad (5)$$

Визначимо оптичну густину степенево-лінійного перетворення цифрових зображень на основі виразу

$$D = log10[255/(L+1)] \quad (6)$$

Для кількісної оцінки якості степенево-лінійного перетворення визначили контрастну чутливість перетворення як похідну перетворення для різних варіантів тоновідтворення

$$C = \frac{dL}{dL_0} \quad (7)$$

Звернемо увагу на те, шо цифрове зображення в компютері зберігається у вигляді упорядкованого масиву чисел, а для спрощення аналізу застосовують аналогову модель зображення. Щоб виявити постеризацію степенево-лінійного перетворення здійснили дискретизацією аналогових градаційних характеристик за допомогою блоку квантування *Quantizer*.

На основі викладеного і виразів степенево-лінійного перетворення (3) – (5), оптичної густини (6) та контрастної чутливості (7) можна скласти програму, розрахувати і побудувати градаційні характеристики, оптичну густину та контрастну

чутливість. Для спрощення розвязання поставленого завдання застосуємо обєктно-орієнтоване програмування у пакеті *MATLAB:Simulink* для імітаційного моделювання. На основі викладеного і виразів (2) – (1) із операційних блоків бібліотеки побудовано структурну схему моделі симулятора степенево-лінійного перетворення цифрових зображень, яку подану на *рис. 1.*

Основними блоками моделі симулятора є функціональні блоки математичних функцій, які здійснюють необхідні розрахунки. Блок *Ramp* генерує лінійну шкалу L_0, яка масштабується і паралельно подається на входи першого стовпця блоків математичнмх функцій $F_{cn} - F_{cn}2$ у діалогових вікнах яких записана програма – вирази (3), (4), (5) для розрахунку нормованих градаційних характеристик, що подаються на входи блоків *Gain,* які їх масштабують (множать на 255), а на їх виході одержуються типові варіанти градаційних характеристик степенево-перетворених зображень L_1, L_2, L_3. Отримані вихідні величини паралельно подаються на входи мультиплексора M_{ux} і візуалізуються блоками *Scope.* Обчислені степеневі перетворення L паралельно подаються на входи другого стовпця блоків математичних функцій $F_{cn}3$ – $F_{cn}6$ у діалогових вікнах яких записана програма – вираз (5) для розрахунку оптичної густини, які візуалізуються блоком *Scope* і *Display.* Для визначення контрастної чутливості зображень вони подаються на блок похідної *Derivative* і візуалізується блоком *Scope2.* Для виявлення постеризації степенево-лінійного перетворення застосували блок квантування *Quantizer.*

В процесі дослідження налаштували блоки симулятора на відтворення зображень світлих тонів. У діалогових вікнах першого стовпця $F_{cn} - F_{cn}3$ задали лінійну складову перетворення і показники степені $r_1 = 2{,}0;\ r_2 = 1{,}6;\ r_3 = 1{,}3.$ Задали масштаби $M = 255$ блоків *Gain.*

Результати моделювання типових градаційних характеристик степенево-лінійного перетворення подані на *рис. 2.*

Для порівняння на рисунку подана лінійна шкала L_0. Традиційні характеристики є опуклими кривими і на початку діапазону мають малу крутизну, що усуває постеризацію на темних ділянках зображень. Перша зверху градаційна характеристика відповідає показнику степені $r = 2{,}0,$ а нижня характеристика відповідає степені $r = 1{,}3.$ На середньому діапазоні і у світах градаційні характеристики мають достатню крутість, тому немає втрат у світах. Порівнюючи градаційні характеристики степенево-лінійного перетворення і традиційного степеневого перетворення [6, с. 291], робимо висновок, що на початку темного діапазону градаційні характеристики розробленого степенево-лінійного перетворення є більш плавні і мають меншу крутизну, що усуває постеризацію у глибоких тонах, що є перевагою.

Результати моделювання оптичної густини степенево-лінійного перетворення цифрових зображень подані на *рис. 3.*

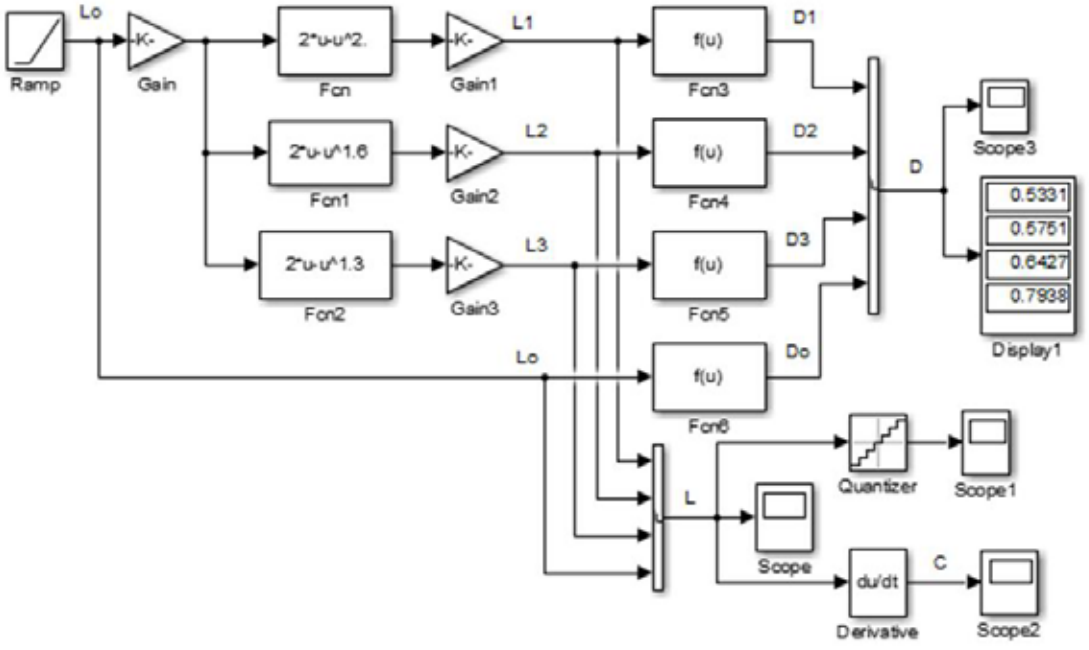


Рис. 1. Структурна схема моделі симулятора степенево-лінійного перетворення зображень

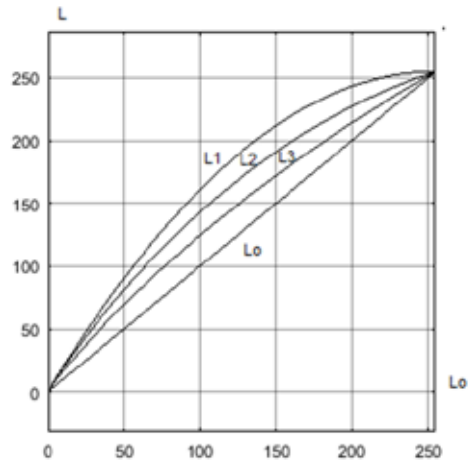


Рис. 2. Градаційні характеристики типових варіантів степенево-лінійного перетворення зображень світлих тонів

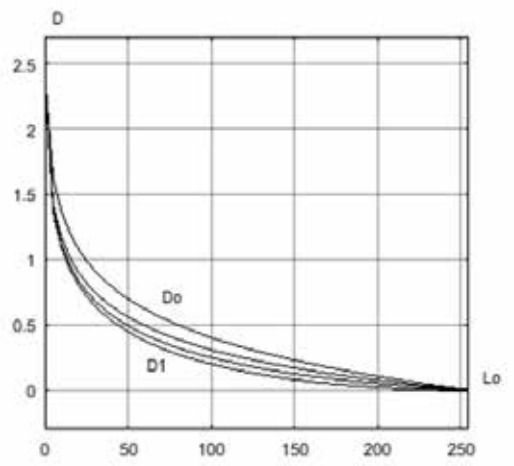


Рис. 3. Графіки оптичної густини степенево-лінійного перетворення світлих зображень

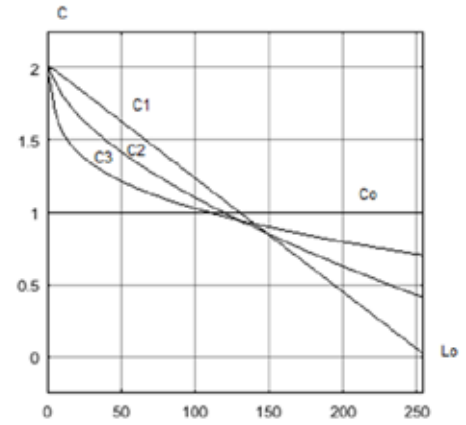


Рис. 4. Графіки контрастної чутливості степенево-лінійного перетворення

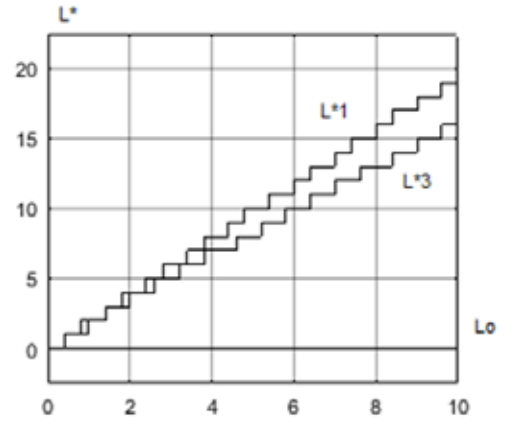


Рис. 5. Дискретизовані градаційні характеристики на початку діапазону чорного

Початкові значення оптичної густини становлять близько 2,5 одиниць оптичної густини і є вгнутими кривими. Вони швидко зменшуються на початку діапазону і при L_0 = 50 рівнів становить: $D_1 = 0,44;\ D_2 = 0,49;\ D_3 = 0,56,\ D_0 = 0,67$ одиниць прямуючи до нульового кінцевого значення. Зауважимо, що оптична густина лінійної шкали L_0 розташована зверху, тому її оптична густина переважає усі типові градаційні перетворення світлих зображень.

Результати моделювання контрастної чутливості степенево-лінійного перетворення цифрових зображень світлих тонів подано на *рис. 4*

Початкові значення контрастної чутливості становлять дві одиниці. Характеристики чутливості є вгнутими кривими, пересікають одиничну лінію і прямують до кінцевих значень: $C_1 = 0,02;\ C_2 = 0,41;\ C = 0,74$. Зауважимо, що контрастна чутливість лінійної шкали дорівнює одиниці на усьому інтервалі тонопередачі. Отже, світлі тони підвищують контрастну чутливість степенево-лінійного перетворення, яке кількісно і якісно оцінює зображення щодо сприйняття тонів зоровою системою людини, що є перевагою розробленого степенево-лінійного перетворення.

Щоб кількісно оцінити крутизну градаційних кривих степенево-лінійного перетворення і виявити умови відсутності постеризації на початку діапазону чорного на *рис. 5* подані дискретизовані градаційні характеристики в крупному плані.

Градаційні дискретизовані характеристики є ступеневими кривими. Перші ступені дорівнюють нулеві. Наступні ступені становлять: $L_1 = 1,2,3,4,....18$ рівнів, $L_3 = 1,2,3,4,.....15$ рівнів. Оскільки дискретизовані характеристики мають початкове зміщення 1 рівень, а зорова система людини помічає початкове зміщення (4 – 5) рівнів, то у розроблених типових варіантах степенево-лінійного перетворення відсутні умови

для виникнення постеризації на темних ділянках зображення, що є його перевагою.

На основі проведених досліджень і результатів моделювання встановлено, що розроблене степенево-лінійне перетворення світлих тонів усуває постеризацію на темних ділянках зображення, підвищує контрастну чутливість зображень і сприйняття тону зоровою системою людини, що є його перевагою.

Висновки. Розроблено математичну модель степенево-лінійного перетворення світлих тонів зображення на основі введення лінійної складової, що дало можливість зменшити крутизну градаційних характеристик на початку темного діапазону тонів. Опрацьовано три типові варіанти степенево-лінійного перетворення світлих тонів зображення, визначили їх оптичну густину та контрастну чутливість, які кількісно оцінюють степенево-лінійне перетворення.

Побудовано структурну схему моделі симулятора степенево-лінійного перетворення в пакеті *MATLAB:Simulink,* яка дає можливість розраховувати і будувати градаційні характеристики, оптичну густину і контрастну чутливість та аналізувати їх властивості. Доведено, що при показниках степені $r = 2,0; 1,6; 1,3$. сформовані типові варіанти градаційних характеристик є опуклими кривими і на початку діапазону мають малу крутизну, що усуває постеризацію зображень у глибоких тінях. Встановлено, що початкові значення оптичних густин мають значення 2,5 одиниць, які швидко зменшуються і при $L_0 = 50$ рівнів становлять $D = 0,44; 0,49; 0,56; 0,67$. одиниць і поступово прямують до нульового значення, що відповідає світлим тонам зображення.

Початкові значення контрастної чутливості становлять дві одиниці, а їх характеристики є вгнутими кривими, пересікають одиничну лінію і прямують до кінцевих значень: $C = 0,02; 0,41; 0,74$. отже, світлі тони підвищують контрастну чутливість степенево-лініного перетворення, яке кількісно і якісно оцінює зображення щодо сприйняття тонів зоровою системою людини.

Шляхом дискретизації градаційних характеристик в крупному плані встановлено, що значення перших ступенів дорівнює нулеві, а наступні один рівень, тому зорова система не помічає одиничних ступенів, відповідно у розробленому степенево-лінійному перетворенні відсутні умови для винекнення постеризації на темних ділянках, що є його перевагою.

Результати проведених досліджень, зокрема типові градаційні характеристики степеневолінійного перетворення можна застосувати на стадії обробки зображень у компютерних видавничих системах.

Список літератури:

1. Барановський І.В., Яхимович Ю.П. Поліграфічна переробка образотворчої інформації: навч.посібн. Львів – Київ: ІЗМН, 1998. 400 с.

2. Воробель Р. А. Логарифмічна обробка зображень: монографія. Київ. Науково-виробниче підприємство «Видавництво «Наукова думка» НАН України». 2012, 232 с.

3. Гавриш Б.М., Дурняк Б.В., Тимченко О.В, Ющик О.В. Відтворення зображень растровими скануючими пристроями: навч.посібн. Львів: УАД, 2016. 180 с.

4. Лотошунська Н.Д., Іванів О.В. Теорія кольору та кольороутворення: навч. посібн. Львів. НУ «Львівська політехніка», 2014, 204 с.

5. Луцків М.М. Цифрові технології друкарства: монографія. Львів: УАД, 2012. 480 с.

6. Матринюк В.Т. Основи додрукарської підготовки образотворчої інформації: підручник. Кн.2 – К.:Університет «Україна» 2009, 291 с.

7. Buczynski L. Skanery I skanowanie. Warszawa: Wydawnictwo MIKOMA, 2005, 885 p.

8. Malina W., Ablameyko S., Pawlok W. Podstawy Cyfrowego Pretwarzania Obrazok. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2002. 1345.

9. Donnie O'Quinn. Print Publishing a Hayden Shop Manual. 201 West 103 rd. Street, Iniana-polis, Indiana. 2003-594 p.

10. Rafael C. Gonzales, Richard E. Woods. Digital image processing: international Version 3rd Edition. 1nc publishing as Prentice Hall. Copyright, 2008-1104 p.

Kavyn S.Ya. MODELING OF STEP-LINEAR TRANSFORMATION OF LIGHT IMAGES

The article is dedicated to the development of a model for step-linear image transformation based on the analysis of the properties of classical parameters in pre-press processes of printing (such as gradation characteristics, optical density, and contrast sensitivity) in order to solve the problem of improving the visual quality of images.

The essence of the phenomenon of posterization is revealed – visually noticeable transitions from one gray level to another in dark areas of the image, which distorts the image.

The article develops and presents a mathematical model of the step-linear transformation of digital images of light tones by combining power-law and linear transformations. Three typical variants of step-linear image transformations are worked out and presented. Gradation characteristics, optical density, and contrast sensitivity, which quantitatively assess the perception of the image by the human visual system, are determined.

The article also develops and presents a model of a three-channel simulator for step-linear transformation of digital images in the MATLAB: Simulink package, which allows the calculation and construction of gradation characteristics of typical transformations, optical density, and contrast sensitivity.

The gradation characteristics were discretized at the beginning of the black image range, and their analysis was carried out to detect posterization in the step-linear transformation. It was found that, as a result of simulation modeling of typical gradation characteristics, they are convex curves, and at the beginning of the range, they have a low steepness, which eliminates posterization in the dark areas of the images. It was established that in the middle and high ranges, the gradation characteristics have sufficient steepness, which ensures no loss of detail in lighter areas.

The initial values of contrast sensitivity are two units, and their characteristics are concave curves, approaching the final values: 0.02, 0.41, and 0.74.

The study determined that the discretized gradation characteristics have initial values of 1 level, and the human visual system distinguishes (4–5) levels. Therefore, the developed step-linear transformation does not create conditions for the occurrence of posterization in dark areas of the image, which is an advantage.

The article provides recommendations for the use of the results of the research. In particular, typical gradation characteristics of step-linear transformation can be applied at the image processing stage in computer publishing systems.

Key words: *model, step-linear transformation, analysis, gradation characteristics, optical density, simulator, contrast sensitivity.*

УДК 66.07-048.75:681.5
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/15

Каменський А.О.
Черкаський державний технологічний університет

РОЗРОБКА СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОННО-КАТАЛІТИЧНОЇ КОНВЕРСІЇ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ В ПРОДУКТИ ОРГАНІЧНОГО СИНТЕЗУ

Сучасне індустріальне середовище, яке швидко розвивається, вимагає від виробників хімічної продукції впровадження автоматизації та комп'ютеризації в технологічний процес, щоб залишатися конкурентоспроможними, підвищувати безпеку та продуктивність. Автоматизація в хімічній промисловості – це використання технологій контролю та моніторингу виробничих процесів з мінімальним втручанням людини. Це комплексний підхід до оптимізації кожної ланки хімічного виробництва. Серед видів автоматизації, що впроваджені в хімічній галузі, виділяють: системи керування процесами, які управляють складними хімічними реакціями; роботизовані системи для транспортування та пакування матеріалів; аналіз даних для контролю якості та прогнозного обслуговування.

В даній статті обґрунтовано ряд факторів, що впливають на необхідність застосування та оновлення автоматизації на підприємствах хімічної галузі, серед яких: технологічно складні процеси, що швидко змінюються; ринковий попит на нові хімічні речовини; застарілість існуючих систем автоматизації; підтримка безпеки виробництва і т.д. Розглянуто переваги автоматизації для хімічних підприємств, серед яких: підвищена ефективність і продуктивність, покращена безпека та управління ризиками, зниження витрат і рентабельність, зведення до мінімуму незапланованих простоїв. Серед ризиків застосування сучасних засобів автоматизації відмічено: інвестиційні витрати на початку впровадження, навчання персоналу та технічна експертиза, ризики кібербезпеки.

В роботі розглянуто розробку схеми автоматизації технології переробки газу CO_2 за допомогою технічних засобів при виконанні наукових досліджень хімічного напряму. В якості прикладу обрано лабораторну установку плазмо-каталітичної конверсії вуглекислого газу в продукти органічного синтезу, а саме метанол та формальдегід. Метою роботи було теоретично спрогнозувати автоматизацію найбільш небезпечних ділянок схеми конверсії. В якості технічних засобів автоматизації застосовано датчики температури, тиску, витрат. Запропонована схема автоматизованого контролю, в поєднанні з комп'ютерною обробкою отриманих даних, дає можливість зробити більш якісними результати досліджень, моніторити та управляти технологічним процесом, проводити діагностику роботи технічного обладнання, забезпечувати стабільність процесу конверсії вуглекислого газу.

Ключові слова: *автоматизація, комп'ютеризація, хімічна галузь, лабораторні дослідження, контроль та керування, конверсія, плазмо-каталіз, діоксид вуглецю.*

Постановка проблеми. Сучасне сьогодення приділяє надзвичайну увагу автоматизації та цифровізації в різних галузях технологій, і хімічна не виключення. Автоматизація в хімічній промисловості заслуговує великої уваги через складність проходження хіміко-технологічних процесів та реакцій, швидкість перетворень, контроль якості продуктів та сировини, врахування відхилень від заданих режимів, шкідливість робочого середовища, пожежо- та вибухонебезпечність залучених до технологічного процесу речовин. Основними критичними процесами, які потребують контролю, керуванню та автоматизації, не залежно від напряму діяльності хімічного виробництва, є: безпека та відповідність нормативним процесам; оптимізація ресурсів (сировини, енергії та персоналу); контроль і моніторинг технологічних параметрів процесів; збір, аналіз та збереження даних.

Для якісної роботи хімічного підприємства в цілому, або певної технологічної ланки зокрема, існує проблема браку своєчасної інформації про протікання високотехнологічних процесів, а також ряд факторів, які обумовлюють труднощі, пов'язані з традиційними методами хімічного виробництва, які існують на сьогодні в Україні: економічна нестабільність та стійка конкурентність, порушення в управлінні ланцюгами постачання через військовий стан України, відповідність нормативним вимогам, проблеми технологічного та операційного контролю, технічне обслуговування та ремонт [1]. Технологічний процес на хімічних підприємствах має ряд особливостей та унікальний цикл. Зазвичай це безперервний

потік сировини від початку і до кінця виробничого процесу. Відповідно, основним завданням підприємства є забезпечення безперервної роботи всього обладнання, тому що збій одного із процесів може зупинити всю виробничу лінію, що спричинить значні економічні втрати внаслідок простою та можливість аварійних ситуацій. Сучасна автоматизація та комп'ютеризація вирішує більшість цих проблем шляхом моніторингу та своєчасному контролю за технологічним процесом. Автоматизовані системи здатні швидко реагувати та сповіщати про екстрені ситуації, слідкують за станом обладнання, сигналізуючи, при необхідності, про його обслуговування або ремонт. Більшість хімічних підприємств, в залежності від своїх економічних можливостей, прагнуть осучаснити автоматизацію виробництва, впроваджуючи такі новітні розробки як штучний інтелект (ШІ) і машинне навчання, робототехніку, Інтернет речей (IoT), програмне забезпечення, доповнену (AR) і віртуальну реальність (VR), 3D-друк [1, 2].

Так як хімічна галузь складається не тільки з виробничих заводів, а й містить наукову складову – лабораторії підприємств, вищих навчальних закладів, наукових інститутів, де безпека і контроль різних факторів є не менш важливими, то доцільно розглянути впровадження автоматизації в даній сфері. Більшість хімічних технологій починають свій шлях з наукових досліджень. В процесі роботи над темою по зменшенню та переробці діоксиду вуглецю, виникла необхідність теоретично спрогнозувати і розробити автоматизацію схеми лабораторної установки для електронно-каталітичної конверсії вуглекислого газу в продукти органічного синтезу, а саме метанол та формальдегід [3, с. 73]. Дане рішення дасть можливість контролювати температуру, витрати вуглекислого газу та води, тиск в системі, а також надасть безпечності й керованості процесу в разі порушення технологічного режиму. Прогнозованість даних факторів дозволить легше адаптувати лабораторну установку (або її вдосконалити) для використання в хімічній переробці.

Отже, проблематикою роботи є вдосконалення схеми лабораторної установки по переробці газу CO_2 за допомогою плазмо-каталітичної конверсії в органічні продукти методом її автоматизації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автоматизація технологічного процесу – сукупність методів і засобів, призначених для реалізації системи або систем, що дозволяють здійснювати управління самим технологічним процесом без безпосередньої участі людини, або залишення за людиною права прийняття найбільш відповідальних рішень [4]. Це складний комплексний процес, який містить технічну складову, тобто аналіз умов технології виробництва, підбір обладнання контролю та регулювання й інформаційну складову, яка відповідає за керування технологічним режимом, використовуючи відповідне програмне забезпечення та комп'ютерний моніторинг з допомогою операторів. Тобто це своєрідна людино-машинна взаємодія.

Аналізуючи літературні джерела, потрібно відмітити, що розробка і структура автоматизації в різних галузях мають як спільні частини, так і свої особливості, в залежності від напрямку та типу виробництва [5].

В машинобудуванні та приладобудуванні використовуються верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК). Які, об'єднані з промисловими роботами, автоматизованим транспортом та складом в технологічні комплекси, передбачають високий ступінь автоматизації не тільки основних, але і допоміжних операцій: транспортування та складування заготовок, виробів, інструмента, технологічного оснащення, матеріалів [5, 6, 7].

В харчовій промисловості, відповідно до Інтернет джерел, залучається новітнє програмне забезпечення. Як приклад, сучасна система SCADA plus – платформа, яка координує, аналізує, оптимізує виробничий процес і забезпечує зв'язок із локальними системами управління всіма ділянками заводу (завод «Протеїн Інвест»). При отриманні даних система самостійно порівнює їх із заданими значеннями і, в разі відхилення від поставленого завдання, сповіщає про це інженерний персонал, дозволяючи йому вжити необхідних заходів [8]. У виробничий процес даної галузі все частіше залучають робототехніку на базі AI, 3D – друк, технологію штучного інтелекту(ШІ). ШІ застосовують в точному землеробстві, безпеці харчових продуктів та контролі якості, оптимізації ланцюгів постачання [9, с. 335].

Хімічна галузь, як і весь світ виробництва, переживає епоху швидких змін та еволюції, головним чином завдяки цифровій трансформації та технологічному прогресу. У контексті хімічного виробництва цифрова трансформація може передбачати використання автоматизації для оптимізації процесів, штучного інтелекту – для покращення виробництва або пристроїв, Інтернету речей – для віддаленого моніторингу та керування обладнанням [10]. У роботі Ларичевої Л.П. [11] представлено огляд впровадження автоматичного контролю в хімічній промисловості.

Автор дослідила сучасні засоби автоматизації технологічних процесів, прилади та системи автоматичного контролю, регулювання і управління, що базуються на мікропроцесорній техніці. Дана характеристика автоматизованим системам фірм Honeywell, Yokogawa, Siemens, які впроваджені на українських хімічних підприємствах.

В наукових дослідженнях та розробках, які є невід'ємною частиною хімічної галузі, що відбуваються на базі лабораторій, використовують автоматизовану система наукових досліджень (АСНД). Система розроблена для автоматизації проведення різних наукових розробок і експериментів, а також для їхнього управління. Основними завданнями АСНД є здобуття нових даних про досліджуваний процес, об'єкт чи явище. Основою функціонування АСНД є принципи обміну інформацією між дослідником й устаткуванням в режимі реального часу. Функції АСНД: збір вимірювальних даних та їх початкове оброблення (алгоритм дослідницького процесу); введення керуючої інформації та управління науковим обладнанням; зберігання інформації та її обмін з іншими персональними електронними обчислювальними машинами [12]. Невід'ємною складовою наукових досліджень є використання різноманітного комп'ютерного програмного забезпечення, яке дає можливість робити збір, обробку, аналіз та систематизацію отриманих даних; моделювання, оптимізацію та візуалізацію експериментальних розробок [13, с. 26].

Постановка завдання. Метою роботи є теоретично розробити автоматизацію технологічної схеми лабораторної установки електронно-каталітичної конверсії вуглекислого газу в метанол та формальдегід.

Виклад основного матеріалу. Розробка автоматизації технологічної схеми лабораторної установки електронно-каталітичної конверсії вуглекислого газу в продукти органічного синтезу є частиною експериментальних досліджень щодо глобальної проблеми надмірної кількості діоксиду вуглецю в атмосфері Землі та його утилізації. На сьогодні зміну клімату починає відчувати все людство. Науковці та всесвітні організації б'ють на сполох через великі обсяги викидів CO_2. Видобуток та спалювання викопного палива, пожежі, війни – все це призвело до збільшення глобальної середньої концентрації вуглекислого газу в 2023 році до 420 ppm, що спричинило підвищення температури планети на багато років вперед [14]. Потенційним способом скорочення викидів діоксиду вуглецю є уловлювання та перетворення CO_2 в хімічні речовини й рідке паливо, наприклад: метанол, етанол, мурашина кислота, формальдегід.

Серед існуючих технологій переробки вуглекислого газу [15] обрано метод плазмового каталізу (електронно-каталітичний метод) з використанням діелектричного бар'єрного розряду [3, с. 73; 16]. Переваги технології: м'які умови роботи, легке масштабування, активація газу активними електронами замість тепла, більш високі швидкості реакцій за рахунок значних концентрацій активних частинок, можливість використання сировини без спеціальної підготовки та отримання цільових продуктів в одну стадію.

Під час експериментальної роботи була розроблена та впроваджена лабораторна установка, яка дозволила отримати позитивні результати у синтезі метанолу та формальдегіду. В наукових дослідженнях електронно-каталітичної переробки газу CO_2 використовувалась технологічна схема (рис. 1), яка дала можливість проводити експеримент в межах хімічної лабораторії [3, с. 73; 17].

У процесі конверсії CO_2 досліджувалися різні температурні режими, регулювалася напруга та випробовувався ряд каталізаторів. Аналіз вмісту проб проводився на спектрофотометрі марки «UV-5800PC» у поєднанні з ПК. Для вдосконалення розрахунків розроблено веб-додаток, який допомагає оптимізувати та швидко опрацьовувати отримані дані зі спектрофотометра у вигляді Excel таблиць [18, с. 86].

Огляд роботи технологічної схеми. Установка містить блок попередньої підготовки газової суміші, систему розрядників, які слугують джерелами бар'єрного розряду, та холодильник. Перед початком роботи, впродовж 30–40 хв., проводиться розігрів трубчастої печі до температури проведення досліду (250–400 °С). Водночас, зволожувач заповнюється дистильованою водою об'ємом 50 $см^3$ і нагрівається до 70 °С.

Газоподібний діоксид вуглецю з балону (1) подається на ротаметр (2), де виставляються витрати по CO_2 в межах 960–1000 $см^3$/хв. Це мінімальні витрати, які подолають усі гідравлічні опори. Потім газ надходить у зволожувач (3) для насичення CO_2 парами води. Зволожений і підігрітий газ, через конденсатовідвід (4), поступає у газорозрядник 1 (6), в якому відбувається активація вуглекислого газу і парів води (реакція розкладу вуглекислого газу і парів води). В якості розрядника використано озонатор Сіменса, на який подавалась напруга 10 кВ. Після первинного газорозрядника газовий потік потрапляє на вторин-

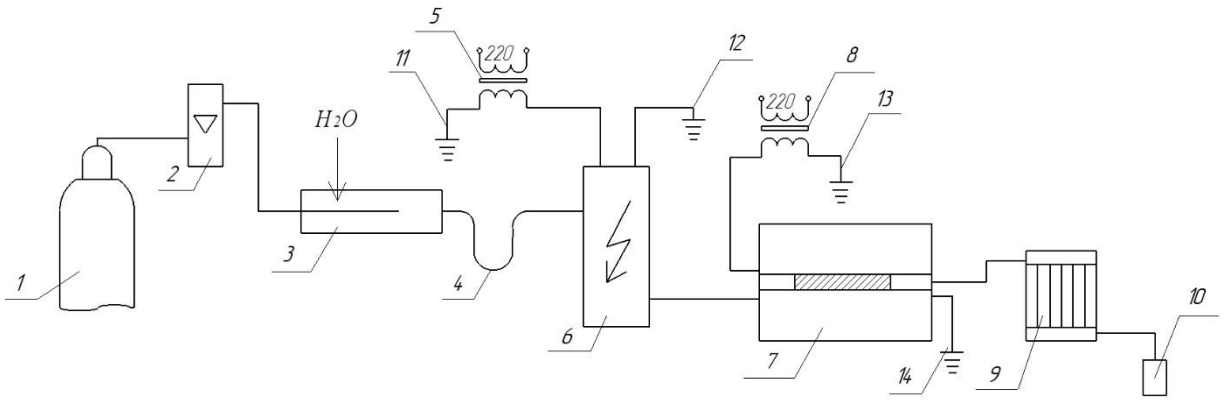


Рис. 1. Схема лабораторної установки по переробці CO_2 в органічні сполуки

1 – балон CO_2; 2 – ротаметр; 3 – зволожувач; 4 – конденсатовідвід; 5 – джерело живлення 1; 6 – газорозрядник 1; 7 – трубчаста піч з каталізатором та газорозрядник 2; 8 – джерело живлення 2; 9 – холодильник; 10 – пробовідбірник; 11, 12, 13, 14 – заземлення.

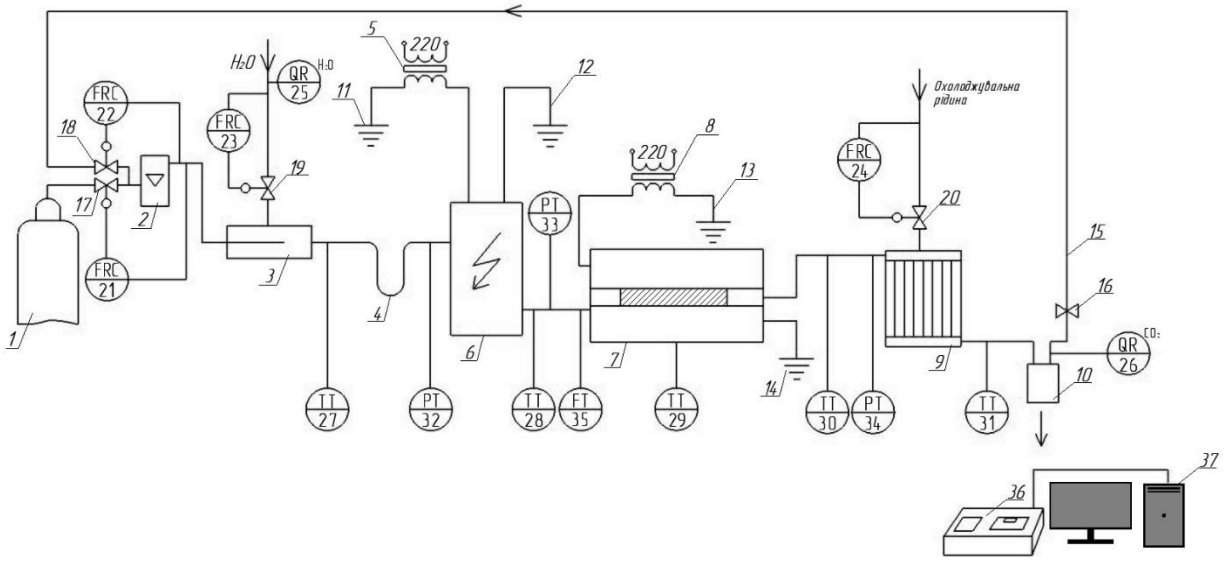


Рис. 2. Схема автоматизації технології конверсії CO_2 в органічні сполуки

1 – балон CO_2; 2 – ротаметр; 3 – зволожувач; 4 – конденсатовідвід; 5 – джерело живлення 1; 6 – газорозрядник 1; 7 – трубчаста піч з каталізатором та газорозрядник 2; 8 – джерело живлення 2; 9 – холодильник; 10 – пробовідбірник; 11, 12, 13, 14 – заземлення; 15 – байпас; 16–20 – регулюючі клапани; 21–24 – регулятори витрат; 25–26 – датчик складу H_2O і CO_2 відповідно; 27–31 – датчики температури; 32–34 – датчики тиску; 35 – датчик витрат; 36 – спектрофотометр; 37 – комп'ютер.

ний газорозрядник в трубчастій печі (7) з обраним каталізатором (нержавіюча сталь (12Х18Н10Т), СНК-2 та ін.). В розряднику 2 напруга варіюється від 7 до 11 кВ, в залежності від експериментальних умов. Після печі синтез-газ надходить у змієвиковий холодильник (9), де охолоджується і конденсується, після цього потрапляє у пробовідбірник (10). В якості пробовідбірника використано склянку Дрекселя з дистильованою водою об'ємом 50 мл. Тривалість досліду 20 хвилин. Вміст проби аналізується на спектрофотометрі, дані з якого виводяться на комп'ютер у вигляді Excel таблиць.

Для створення комп`ютеризованої системи управління технологічним процесом розроблена схема автоматизації технології конверсії вуглекислого газу (рис. 2), яка визначає структуру пунктів контролю й керування та їх функції.

Автоматизація процесу конверсії вуглекислого газу (рис. 2). Відповідно до технологічної схеми вуглекислий газ подається з балона 1, обладнаного редуктором, на ротаметр 2. За допомогою редуктора регулюється і підтримується на відповідному рівні тиск подачі CO_2. Для контролю витрат газу в межах 960–1000 $см^3$/хв, застосовується регулятор витрат 21 при регулюванні кла-

паном 17. Донасичення газу парою здійснюється у зволожувачі 3 за рахунок вприскування дистильованої води. Фіксований об'єм води 50 мл регулюється за допомогою регулятора витрати 23 та регулюючого клапана 19. Датчик складу 25 визначає якість води, так як домішки можуть впливати на якість та склад продуктів конверсії. Перед потраплянням парогазової суміші в первинний газорозрядник 6 в системі відбувається контроль температури і тиску датчиками 27 і 32. В газорозряднику 6 підтримується температура в межах 70 ^{0}C і встановлена напруга 10кВ. Між первинним і вторинним газорозрядниками (6 і 7) встановлений датчик контролю витрат 35 активованої парогазової суміші для підтримки стабільності системи. Тепловий режим між двома розрядниками контролюється датчиком 28. Датчики тиску 32, 33 і 34 забезпечують моніторинг падіння тиску в системі, що може спричинити порушення її герметичності й зупинку процесу конверсії в цілому. Температурний режим в трубчастій печі з газорозрядником 7 (250–400 ^{0}C) задається вбудованим регулятором температури і контролюється датчиком температури 29. Напруга на вторинному газорозряднику 7 становить 7–11 кВ і регулюється автотрансформатором. Після трубчастої печі, газова суміш, що містить синтезовані сполуки (метанол і формальдегід) охолоджується в холодильнику 9, тому слід вимірювати температуру на виході з печі. Автоматичний контроль температури на виході з трубчастої печі здійснюють датчиком температури 30. Подача в холодильник охолоджувальної рідини (води) регулюється клапаном 20 і регулятором витрат води 24. Це забезпечує контроль, стабілізацію та підтримку заданого режиму охолодження й економію води. Датчик 31 контролює температуру суміші після холодильника. Потім, після охолодження, синтезована суміш органічних речовин надходить в пробовідбірник 10 (склянка Дрекселя з водою об'ємом 50 мл). Для конверсії непрореагованого газу CO_2, в технологічний процес впроваджено систему байпасу 15, обладнану датчиком складу CO_2 26, регулюючими клапанами 16 і 18 та регулятором витрат 22. Аналіз отриманих проб відбувається на спектрофотометрі марки «UV-5800PC» 36 у поєднанні з комп'ютером 37.

Висновки. В процесі інтегрування автоматизації в наукові дослідження щодо переробки вуглекислого газу в органічні продукти електронно-каталітичним методом розроблена схема автоматизації, за допомогою якої можна забезпечити якісний контроль температурного режиму та перепаду тиску в системі, моніторинг витрат водних ресурсів. Додана можливість застосувати систему байпасу в разі необхідності повторної переробки непрореагованого вуглекислого газу.

Незважаючи на те, що мета автоматизації та комп'ютеризації – зменшення втручання людини в технологічний процес, на сьогодні це неможливо впровадити в хімічних лабораторіях через обмеження сучасних технологій, застарілість обладнання та необхідність інтелектуальної участі людини. Тому впровадження автоматизації стосується насамперед контролю за технологічним процесом, забезпечення точності й якості його виконання, а також гарантування безпеки у разі непередбачуваних ситуацій. Дана схема автоматизації є теоретичною розробкою, тому що на її впровадження впливає ряд факторів: технічні та фінансові обмеження.

Наступним кроком автоматизації даної схеми є підбір відповідних засобів автоматизації в залежності від їх технічних характеристик та технологічних вимог процесу конверсії CO_2 в продукти органічного синтезу.

Список літератури:

1. How Automation is Changing the Chemical Industry: Trends, Insights, and Case Studies. URL: https://www.electricsolenoidvalves.com/blog/how-automation-is-changing-the-chemical-industry-trends-insights-and-case-studies/ (дата звернення: 13.01.2025).

2. Святний В.А., Бровкіна Д.Ю. Сучасні тенденції в автоматизації промислових комплексів URL: https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2016.1.04 (дата звернення: 13.01.2025).

3. Kamensky A., Olshevsky O., Pochynok V., Viazovyk V. (2021). Electrocatalytic Processing of Carbon Dioxide into Methanol and Formaldehyd. Science and Innovation, 17(5), pp. 73–82. https://doi.org/10.15407/scine17.05.073

4. Промислова автоматизація. URL: https://navitel.com.ua/web/activities/industrial-automation/?lang=ua (дата звернення: 10.01.2025).

5. Шевченко В. В., Тимчик Г. С. Основи автоматизації технологічних процесів. Конспект лекцій. Навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 111с.

6. Автоматизація виробництва в машинобудуванні. Ч. І: навчальний посібник / Ю. І. Муляр, С. В. Репінський. Вінниця: ВНТУ, 2019. 99 с.

7. Я. І. Проць, В. Б. Савків, О. К. Шкодзінський, О. Л. Ляшук Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 344с.

8. ОВП «Протеїн Інвест» Комплекс робіт з автоматизації та електропостачання. URL: https://se.ua/en/projects/oep-protein-invest-complex-of-works-on-automation-and-power-supply/ (дата звернення: 10.01.2025).

9 Винничук Р. (2024) Штучний інтелект в харчовій промисловості. Grail of Science, (43), с. 335–343. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.06.09.2024.043

10. The Automation Advantage: Enhancing Chemical Manufacturing Processes. URL: https://praxie.com/automation-in-chemical-manufacturing/ (дата звернення: 10.01.2025)

11. Конспект лекцій з дисципліни «Контроль та автоматизація хімічних процесів та виробництв» для студентів напряму 051301 − Хімічна технологія /Укладачі: Ларичева Л.П. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2016. 172 с.

12. Пількевич І. А., Молодецька К. В., Сугоняк І. І., Лобанчикова Н. М. Основи побудови автоматизованих систем управління. Навчальний посібник. Житомир: ЖДУ ім. І. Франка, 2014. 178с.

13. Каменський А.О. Аналіз програмного забезпечення для наукових досліджень в хімічній галузі. Наукові досягнення та відкриття сучасної молоді [Електронний ресурс]: зб. матер. III Всеукр. наук. конф. студ. та молодих вчених. Луцьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2024. С. 26-30. URL: https://donntu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/06/zbirnyk_naukovi-vidkryttya-suchasnoyi-molodi.pdf.

14. Greenhouse gas concentrations surge again to new record in 2023. URL: https://wmo.int/news/media-centre/greenhouse-gas-concentrations-surge-again-new-record-2023 (дата звернення: 15.01.2025).

15. Ramses Snoeckx and Annemie Bogaerts Plasma technology – a novel solution for CO_2 conversion? Chem. Soc. Rev., 2017, 46, pp. 5805-5863. DOI: https://doi.org/10.1039/C6CS00066E

16. A. Bogaerts, G. Centi Plasma Technology for CO_2 Conversion: A Personal Perspective on Prospects and Gaps. DOI: https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00111

17. В.М. Вязовик Електронно-каталітичне перетворення діоксиду вуглецю в формальдегід та метанол. DOI: http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2024-153-2-11-17 (дата звернення: 25.01.2025).

18. Каменський А.О. Розробка програмного веб-додатку для аналізу результатів спектрофотометричних досліджень електронно-каталітичної конверсії вуглекислого газу. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Т.35(74) № 3. С. 86-92. DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.1/15

Kamenskyi A.O. DEVELOPMENT OF AN AUTOMATION SCHEME FOR THE TECHNOLOGY OF ELECTRO-CATALYTIC CONVERSION OF CARBON DIOXIDE INTO ORGANIC SYNTHESIS PRODUCTS

The modern, rapidly evolving industrial environment requires chemical manufacturers to introduce automation and computerization into the technological process in order to remain competitive, increase safety and productivity. Automation in the chemical industry is the use of technologies to control and monitor production processes with minimal human intervention. This is a comprehensive approach to optimizing each link in chemical production. Among the types of automation implemented in the chemical industry are: process control systems that manage complex chemical reactions; robotic systems for transporting and packaging materials; data analysis for quality control and predictive maintenance.

This article substantiates a number of factors that influence the need to apply and update automation at chemical enterprises, including: technologically complex, rapidly changing processes; market demand for new chemicals; obsolescence of existing automation systems, support for production safety, etc. The benefits of automation for chemical enterprises are considered, including: increased efficiency and productivity, improved safety and risk management, cost reduction and profitability, minimizing unplanned downtime. Among the risks of using modern automation tools, investment costs at the beginning of implementation, personnel training and technical expertise, and cybersecurity risks are noted.

The paper considers the development of a scheme for automating the technology of CO_2 gas processing with the help of technical means in the course of chemical research. As an example, a laboratory installation for the plasma-catalytic conversion of carbon dioxide into organic synthesis products, namely methanol and formaldehyde, was chosen. The aim of the work was to theoretically predict the automation of the most dangerous parts of the conversion scheme. Temperature, pressure, and flow sensors were used as technical means of automation. The proposed automated control scheme, combined with computer processing of the data obtained, makes it possible to improve the research results, monitor and control the technological process, diagnose the operation of technical equipment, and ensure the stability of the carbon dioxide conversion process.

Key words: *automation, computerization, chemical industry, laboratory research, control and management, conversion, plasma catalysis, carbon dioxide.*

УДК 001.89+004.5
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/16

Качурівський В.О.
ВП Національний університет біоресурсів і природокористування України
«Бережанський агротехнічний інститут»

Качурівська Г.М.
ВП Національний університет біоресурсів і природокористування України
«Бережанський агротехнічний інститут»

АСОЦІАТИВНИЙ КОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ АВТОРА НАУКОВОЇ ПУБЛІКАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ ОБЛІКУ НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ НАУКОВО-ПЕДАГОГІЧНИХ ПРАЦІВНИКІВ

У даній роботі проаналізовано моніторинг виконання ліцензійних умов провадження освітньої діяльності менеджментом закладу вищої освіти, зовнішніми державними та приватними інституціями. Запропоновано автоматизувати процес формування звітності за публікаційною активністю науково-педагогічних працівників за допомогою інформаційної системи обліку наукових публікацій. Формалізуючи дані про наукові публікації, визначено, що інформацію можна подати у вигляді кортежу. Сукупність даних кортежів утворює множину публікацій. Встановлено, що одному автору відповідає певна множина представлень запису прізвища, імені та по батькові, в залежності від оригіналу мови публікації та записаного прізвища та ініціалів у реквізитах друкованого видання, яка формує сутність асоціативних подань. На основі понятійного апарату теорії множин показано, що запис про наукову публікацію є перетином множини публікацій та множини асоціативних подань. Для однозначної ідентифікації науково-педагогічного працівника розроблено політику формування асоціативного коду, який представляє один з варіантів множини представлень прізвища та ініціалів автора.

Оскільки сферою менеджменту закладу освіти є штатні науково-педагогічні працівники, то сформовано дві окремі сутності: штатні працівники та автори з інших установ. Визначено атрибути сутності штатних працівників, які можуть бути розширенні. Формування асоціативного коду використовує маркер, який вказує асоціативну сутність представлень прізвища та ініціалів.

У статті проведено моделювання структури бази даних для ведення обліку наукових публікацій. Розроблено алгоритм формування асоціативного коду у вигляді діаграми послідовностей для збереження у базі даних. Запропоновану політику формування асоціативного коду можна використовувати в інформаційних системах обліку інших видів професійних активностей: освітня та науково-методична діяльність, інновації та інтелектуальна власність, професійна експертна та громадська діяльність, міжнародна діяльність та інше. Розглянута інформаційна система реалізується за допомогою різноманітного стеку інформаційних технологій на основі клієнт-серверної архітектури.

Ключові слова: *асоціативний код, подання, професійна активність, інформаційна система, наукова публікація, теорія множин.*

Постановка проблеми. Діяльність закладу вищої освіти регламентується Законами України «Про освіту», «Про вищу освіту», «Про фахову передвищу освіту», «Про професійну (професійно-технічну) освіту», «Про професійний розвиток працівників» та іншими. Провадження освітньої діяльності здійснюється на основі Постанови Кабінету Міністрів України № 1187 «Про затвердження Ліцензійних умов провадження освітньої діяльності» [1]. Ліцензійні умови провадження освітньої діяльності встановлюють вичерпний перелік вимог, обов'язкових для виконання закладом вищої освіти або науковою установою.

Зокрема, у п. 38 «Досягнення у професійній діяльності…» визначено перелік двадцяти пунктів, які визначають кадрові вимоги до осіб, які здійснюють освітню діяльність [1]. Відповідно до п. 36 «науково-педагогічні, педагогічні та наукові працівники, які забезпечують освітній процес, повинні мати не менше чотирьох досягнень у професійній діяльності за останні п'ять років, визначених у пункті 38 цих Ліцензійних умов» [1].

Моніторинг менеджментом закладу вищої освіти виконання науково-педагогічними, педагогічними та науковим працівниками Ліцензійних умов завжди є актуальним. Одним з видів поточного контролю за визначеними показни-

ками є подача звітності за певний період. Однією з форм такої звітності є річний звіт про діяльність закладу вищої освіти, в якому відображається відповідність ліцензійним вимогам. Річна звітність – це статичний носій інформації і він не забезпечує оперативного інформування про діяльність науково-педагогічних, педагогічних та наукових працівників через певний період після звітності.

Усунути цей недолік можна через впровадження в менеджмент закладу вищої освіти інтегральної інформаційної системи «Professional activity» для обліку досягнень у професійній діяльності науково-педагогічних, педагогічних та наукових працівників. У цій системі накопичується та зберігається інформація про двадцять пунктів професійної діяльності.

Завданням інформаційної системи є збір та зберігання інформації, яка може бути логічно згрупована відповідно до п. 38 Ліцензійних умов:

- ***Наукова діяльність*** – пункти 1, 5, 6, 7, 8, 12;
- ***Освітня та науково-методична діяльність*** – пункти 3, 4, 13, 14, 15;
- ***Інновації та інтелектуальна власність*** – пункт 2;
- ***Професійна експертна та громадська діяльність*** – пункти 9, 19;
- ***Міжнародна діяльність*** – пункти 10, 17, 18;
- ***Практична діяльність*** – пункти 11, 20;
- ***Діяльність у сфері безпеки та оборони*** – пункти 16, 17, 18.

Однією із підсистем інформаційної системи «Professional activity» є «Scientific publications» – система обліку та прогнозування наукових публікацій науково-педагогічних працівників. До завдань цієї системи входить питання збору та збереження інформації про публікацію у вигляді бібліографічного опису. Завдання менеджменту визначають можливість управління інформацією для формування звітності за різноманітними критеріями вибору: науково-педагогічний працівник, кафедра, календарний період та інше.

При розробці бази даних обліку наукової діяльності, освітньої та науково-методичної діяльності, одним з важливих питань інформаційної системи є ідентифікація авторів наукової публікації. Дана проблема виникає у зв'язку з тим, що в бібліографічному описі літературних джерел немає однозначного правила запису прізвища, ім'я по батькові автора публікації. Так, в описах може зустрічатися прізвище автора та один або два ініціали. Якщо публікація виходить іноземною мовою або в іноземному виданні, то запис прізвища та ініціалів проводиться іноземною мовою [2, с. 187].

Для усунення цих суперечностей необхідно розробити правила формування асоціативних ключів для ідентифікації в базі даних науково-педагогічних, педагогічних та наукових працівників незалежно від представлення у виданнях прізвища та імені.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інформаційні технології все частіше застосовуються в діяльності закладів вищої освіти від організації освітнього середовища здобувачів освіти до управлінського менеджменту об'єктами освітньої та наукової діяльності. Зокрема, у період воєнного стану, активно розвиваються дистанційні форми участі об'єктів освітнього процесу.

Аналіз освітнього середовища закладу освіти та зацікавлених осіб на предмет його відповідності умовам організації освітнього процесу за принципами відділеного навчання проведено в праці [3, с. 106].

Інформаційні технології значно поліпшують доступ до інформації, збільшують можливості спілкування під час дистанційного навчання, підвищують ефективність та мотивацію навчання, забезпечують нові шляхи подання інформації, які полегшують її розуміння, дають можливість для випробування власних ідей та проектів [4, с. 100]. У праці проаналізовано навчальні платформи та переваги у використанні.

Аспекти використання інформаційних технологій в управлінні вищим навчальним закладом описані в праці І. Шоробури. Зокрема, відзначено, що розвиток інформаційного менеджменту, зв'язано з організацією системи обробки даних і знань, послідовного їхнього розвитку до рівня інтегрованих автоматизованих систем управління вищим навчальним закладом [5, с. 189].

Використання інформаційної системи презентації робочих програм освітніх компонент визначає ряд переваг в комунікаційному менеджменті діяльності закладу вищої освіти та сприянні політики студентоцентризму в освітньому процесі [6, с. 24]. Частина праць орієнтовані на розвиток напрямку управління закладом освіти засобами інформаційних технологій [7, 8].

У праці авторів, яка присвячена розв'язанню практичної задачі розробки інформаційної системи обробки даних щодо публікаційної діяльності викладача закладу вищої освіти, визначено, що актуальною задачею є застосування інформаційних технологій для автоматизації процесу підготовки звітності з публікаційної діяльності [9, с. 77].

Процеси автоматизації формування звітної документації про публікаційну активність потре-

бують розробки політики ідентифікації науково-педагогічних працівників для ефективного управлінського менеджменту.

Постановка завдання. Метою статті є розробка політики формування асоціативних ключів авторів наукових для формування представлення автора або колективу авторів у бібліографічному описі публікації та однозначного визначення автора при створенні звітної документації різноманітних форм.

Виклад основного матеріалу. Елементами інформаційної системи обліку «Scientific publications» є множина наукових публікацій науково-педагогічних працівників закладу освіти. Кожна публікації є унікальним об'єктом з точки зору теорії множин. Публікації притаманні такі атрибути: автори публікації, назва публікації, реквізити видавництва, сторінки публікації у виданні, дата оприлюднення, гіперпокликання на електронну версію (DOI або URL) та інше.

Формалізуючи дані про наукові публікації інформацію можна подати у вигляді кортежу, де кожен елемент відповідає певному атрибуту:

$$P = (TofA; PT; J; Y; V; PH; PD; U; Ps; Pf; L; T),$$

де *TofA (team of author)* – колектив авторів, *PT (publish title)* – назва публікації, *J (journal)* – наукове видання, *Y* – календарний рік видання, *V (volume)* – том чи номер журналу, *PH (publishing house)* – видавництво, *PD (publication date)* – дата оприлюднення публікації, *U (url)* – DOI або гіперпокликання на електронну версію, *Ps (page start*) – початкова сторінка публікації, *Pf* (*page finish*) – кінцева сторінка публікації, *L* (*language*) – мова публікації, *T (type)* – категорія статті.

Забезпечення достовірності даних про наукову публікацію покладається на менеджмент закладу освіти, який проводить верифікацію поданої інформації. Визначений кортеж доповнюється атрибутом *SofS (statue of system)*, який визначає стан перевірки автентичності документа чи точності поданої інформації та буде наступним:

$$P = (TofA; PT; J; Y; V; PH; P; U; Ps; Pf; L; T; SofS). \quad (1)$$

Видавництва, які видають наукові журнали, складають множину *PH* такого виду:

$$PH = \{ p_i,\ i = \overline{1,n} \}, \quad (2)$$

де *n* – кількість видавництв, які внесені до інформаційної системи на поточний момент.

Наукові журнали складають множину *J* такого виду:

$$J = \{ t_i,\ i = \overline{1,r} \}, \quad (3)$$

де *r* – кількість назв наукових видань, які внесені до інформаційної системи на поточний момент.

Колектив авторів наукових публікацій *TofA* може складається із штатних працівників та авторів з інших установ. Ці множини можна подати таким чином:

- Штатні працівники (заклад вищої освіти):

$$S = \{ s_i,\ i = \overline{1,l},\ q_j, j = \overline{1,m} \}, \quad (4)$$

де *l* – кількість науково-педагогічних працівників за основним місцем роботи, *m* – кількість науково-педагогічних працівників за сумісництвом.

- Інші автори (інші установи):

$$O = \{ o_i,\ i = \overline{1,k} \}, \quad (5)$$

де *k* – кількість авторів з інших установ.

Множина авторів наукових публікацій *A* є об'єднанням (4) та (5): $A = S \cup O$.

Автор наукової публікації в бібліографічному описі наукової праці представляється записом прізвища та скорочення імені, по батькові або прізвища та скороченням імені мовою публікації (в подальшому представлення). Один автор може публікувати наукові статті державною або іноземними мовами. Представлення подаються мовою публікації.

З огляду на це, назва автора публікації може бути подана як множина варіантів представлень – прізвища, імені та по батькові.

$$N = \{ n_i,\ i = \overline{1,k} \}, \quad (6)$$

де *k* – кількість варіантів представлення.

Між елементами множини *A* та *N* встановлюється відповідність одного автора декільком варіантам представлення:

$$a_i = \{ n_j,\ j = 1 \ldots \left| N_j \right| \}. \quad (7)$$

Для конкретної публікації a_i має одне значення, залежно від бібліографічного опису поданого видавництвом.

Колектив авторів однієї публікації подається як множина *TofA* представлень авторів таким чином:

$$TofA = \{ a_i,\ i = \overline{1,c} \} \subseteq N, \quad (8)$$

де *c* – кількість авторів публікації.

Враховуючи (1), (2), (3), (8) одна публікація може бути представлена таким кортежом:

$$PUB_i = \begin{pmatrix} id; TofA; PT; t_i \in J; Y; V; p_i \in PH; \\ PD; U; Ps; Pf; L; T; SofS \end{pmatrix}, \quad (9)$$

де *id* – ідентифікатор кортежу.

База даних є сукупністю публікацій (9) і визначається наступною формулою

$$Database = \sum_i PUB_i.$$

Базу даних складають наступні сутності: публікації (article) – кортеж *PUB* (9); видавництва – множина *PH* (2); наукові видання – множина *J* (3); співавтори наукової публікації – множина *TofA* (8).

До кожної сутності визначено атрибути, які дають всю повноту інформації. Враховуючи форми нормалізації бази даних встановлено такі зв'язки між сутностями бази даних:

- В одному науковому журналі може бути опубліковано декілька наукових статей штатними працівниками закладу вищої освіти (1 *: n*);
- Одну статтю готує колектив авторів (1 *: n*);
- Одному автору відповідає декілька альтернативних представлень прізвища, імені та по батькові (1 *: n*).

З точки зору адміністративного менеджменту закладу вищої освіти, для моніторингу наукової діяльності більший інтерес представляють штатні науково-педагогічні працівники. Тому автори розподілені на дві сутності staff_author та other_autor. Усі можливі представлення прізвищ та ініціали інших авторів подаються у цій сутності. Для штатних працівників передбачено дочірню таблицю associatiative_name_staff, у якій зберігаються усі їх представлення прізвищ та ініціалів. Між сутністю staff_author та associatiative_name_staff встановлено відношення (*1 : N*), яке пов'язує одного штатного працівника з усіма його представленнями. Це дозволяє проводити вибірку наукових праць конкретного штатного науково-педагогічного працівника, здійснювати моніторинг виконання ним п. 38.1 Ліцензійних умов [1] та планувати публікаційну активність на виконання даного пункту.

Встановлення відношеннь між сутністю team_author та двома таблицями associatiative_name_staff, other_autor призведе до виникнення аномалій під час додавання, оновлення або видалення даних у реляційній базі даних, адже значення ідентифікаторів даних в сутностях можуть співпадати. Це може призвести до некоректної роботи бази, втрати даних або дублювання.

Для вирішення цієї проблеми ми пропонуємо сутність team_author розширити атрибутом code_author, який є асоціативним кодом для ідентифікації автора наукової публікації.

Враховуючи ідею авторів, яка висвітлена у праці [2, с. 188], асоціативний ключ має складатися з двох або більше атрибутів та вказувати на сутність, з якої ці атрибути отримати. Асоціативний ключ складає певний шифр (тестовий рядок) з двох складових:

Перша складова – один із символів «S» або «O». Символ «S» вказує, що подальші атрибути будуть використовуватися з сутності associatiative_name_staff. Символ «O» – подальші атрибути будуть використовуватися з сутності other_autor.

Друга складова – ідентифікатор асоціації (представлення) автора з сутності associatiative_name_staff або з сутності other_autor.

Приклад: є такий асоціативний ключ «S-18». S – наукових працівник закладу освіти, 18 – ідентифікатор запису з сутності associatiative_name_staff.

Між складовими коду використовується розподільник мінус (-) для розподілу текстової величини на дві складові методом *split()* в програмній обробці даних. Також цей розподільник може бути використаний функцією *SUBSTRING_INDEX()* або *CONCAT_WS ()* (мова SQL) при створенні запиту на вибірку даних, де потрібен ідентифікатор представлень автора.

Запропонований асоціативний код однозначно визначає автора або колектив авторів публікації.

Графічно структуру проєктованої бази даних відображено на рисунку 1.

Реалізація функціональних можливостей має здійснюватися на основі клієнт-серверної архітектури з розподільним доступом до бази даних.

Внесення інформації до бази даних потребує розробки алгоритму для автоматичного формування асоціативного коду. Реалізація алгоритму використовує технології розробки на *frontend* та *backend* сторонах. Даний алгоритм можна подати таким переліком дій:

1. Отримання атрибутів публікації введених у GUI форму на стороні користувача (Frontend).

2. Внесення атрибутів публікації таблицю бази даних article (окрім колективу авторів) – (Backend).

3. Запит на вибірку уже збережених представлень авторів публікації – таблиці associative_name_staff та other_author (Backend).

4. Циклічний перебір авторів публікації та перевірка отриманих представлень. Якщо представлення уже існує, то визначаємо його ідентифікатор та вносимо дані до таблиці team_author. Якщо представлення відсутнє, то створюємо нове представлення подання автора (таблиця associative_name_staff або other_author) та вносимо дані до таблиці team_author (Backend). Реалізація даного пункту передбачає можливість розпізнавати список штатних або інших авторів який надходить з GUI форми.

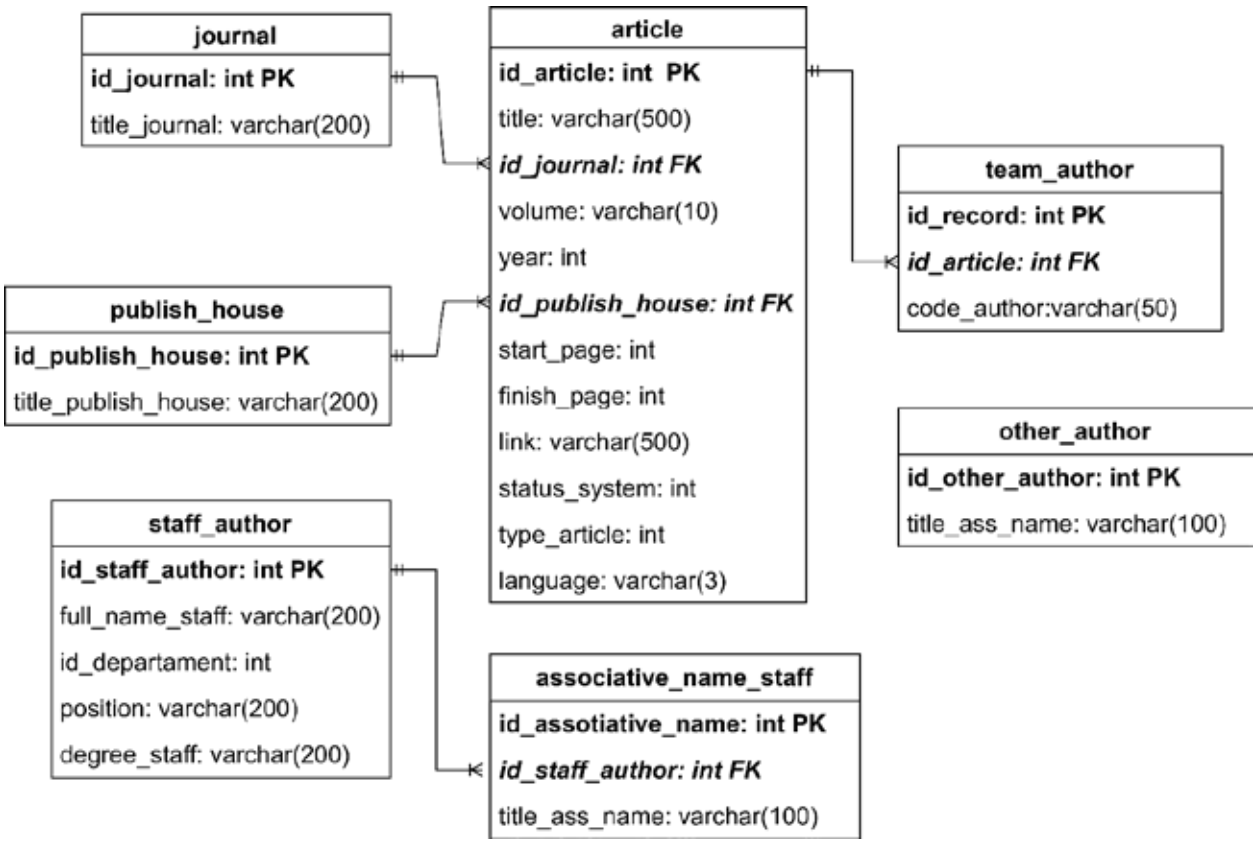


Рис. 1. UML-діаграма бази даних для обліку наукових публікацій

Джерело: розробка авторів

5. Вивід повідомлення про реакцію системи та реакція на винятки – *feedback* (Frontend).

Графічно розроблений алгоритм можна подати за допомого такої блок схеми (Рисунок 2).

Розроблений алгоритм реалізовано на стороні сервера засобами PHP (Hypertext Preprocessor).

Висновки. У відокремленому підрозділі Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут» до управлінського менеджменту впроваджено підсистему «Scientific publications» – інформаційну систему обліку наукових публікацій штатних працівників закладу освіти. Ця система забезпечує поточний моніторинг та оперативне інформування про публікаційну активність на виконання п. 38.1 Ліцензійних умов.

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. На основі понять теорії множин проведено формалізацію даних про наукові публікації як об'єкта інформаційної системи. Встановлено залежності між штатними працівниками та множиною представлення записів прізвища, імені та по батькові, які використовуються в бібліографічному описі наукової публікації. Відзначено, що колектив авторів є підмножиною представлень.

2. Об'єктом інформаційної системи є наукова публікація, яка у формальному виді представляється як кортеж визначених атрибутів. Описано сутності для повноти збереження інформації, що стали підґрунтям для моделювання бази даних реляційного типу.

3. Для однозначного визначення у звітній документації штатних працівників закладу освіти як авторів наукової публікації, розроблено політику формування асоціативного коду в залежності від представлення прізвища, імені та по батькові в бібліографічному описі. Розроблено алгоритм реалізації правил формування асоціативного коду в програмній реалізації на серверній стороні. Дана політика застосовується при формуванні запитів на вибірку інформації про публікаційну активність працівника, кафедри, факультету та закладу освіти у цілому за календарний період.

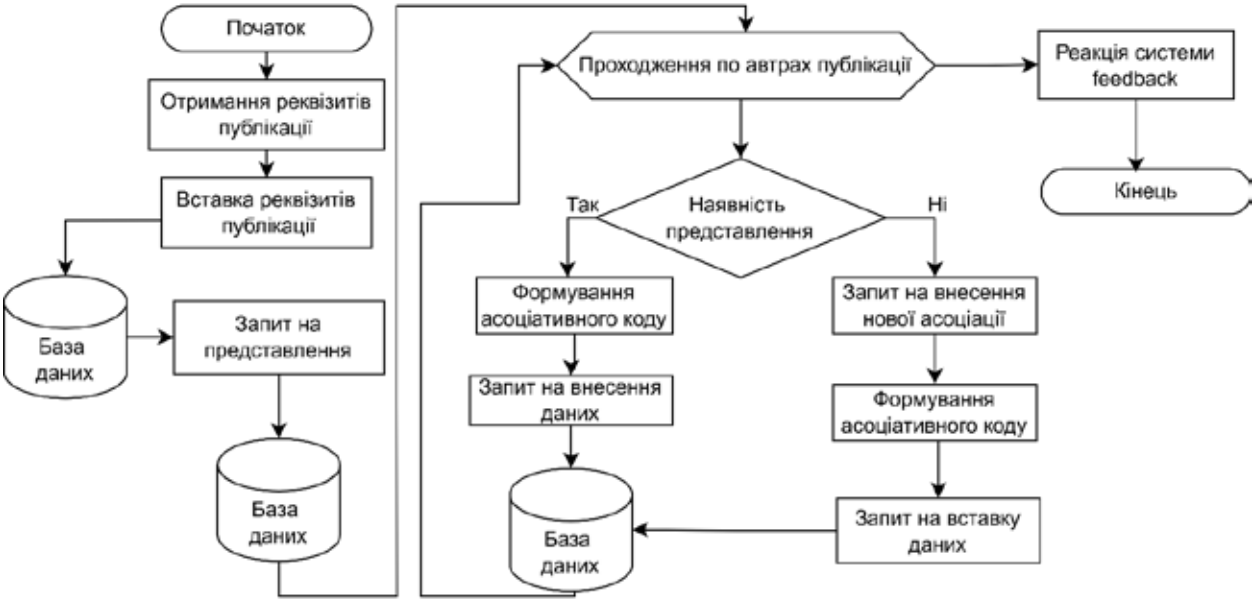


Рис. 2. Алгоритм роботи з формуванням асоціативного коду

Джерело: розробка авторів

Список літератури:

1. Постанова Кабінету Міністрів України № 1187 "Про затвердження Ліцензійних умов провадження освітньої діяльності". URL:https://surl.li/wnbrzf (дата звернення: 18.01.2025).

2. Качурівський В. Формування асоціативних ключів ідентифікації авторів наукової публікації. «Сталий розвиток аграрної сфери: інженерно-економічне забезпечення», матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут». Запоріжжя: ФО-П Однорог Т.В., 2024. С. 187-189. URL:https://surl.li/kjrtqm (дата звернення: 15.01.2025).

3. О. В. Придатко, Н. Є. Бурак, В. Є. Дзень, і М. С. Кунинець, «Адаптивна інформаційно-довідкова система «UniBell» як складова частина проєкту «Smart-університет», SBUNFU, Том. 30, Вип. 5, 2020, С. 105-113. DOI: https://doi.org/10.36930/40300518 (дата звернення: 15.01.2025).

4. Сіняєва О., Крекот М., Завгородній О., Сичова Т., Сичов А., СиняєваО. Особливості використання інформаційних технологій в освіті. Освіта. Інноватика. Практика, 2023. Том 11, No7. С. 98-104. DOI:10.31110/2616-650X-vol11i7-013 (дата звернення: 15.01.2025).

5. Шоробура І. Використання інформаційних технологій в управлінні вищим навчальним закладом. Педагогічний дискурс (21), 2016, С. 187-192.

6. Качурівський В.О., Качурівська Г.М. Моделювання інформаційно-документальної системи презентації освітніх компонент освітньої програми. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2022. Вип. 6(37), ч.II. с. 17-25. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).2.17-25 (дата звернення: 15.01.2025).

7. Придатко О. В., Бурак Н. Є., Дзень В. Є., Кунинець М. С. Запровадження інформаційно-довідкової системи «UniBell» у освітнє середовище вищого навчального закладу. Український журнал інформаційних технологій. 2020, т. 2, № 1. С. 57–65. DOI: https://doi.org/10.23939/ujit2020.02.057 (дата звернення: 12.01.2025).

8. Бурячківський, Е. С.; Аннєнкова, І. П.; Шпильова, К. О. Інформаційний менеджмент у закладах вищої медичної освіти. Сучасні напрями змін в управлінні охороною здоров'я: модернізація, якість, комунікація: Міжнародна наукова конференція, 31 травня 2024 року, м. Одеса. Львів – Торунь : Liha-Pres, 2024. С. 63-66.

9. ВІТЮК, І. В.; ІСТОМІНА, Н. М. Розробка функціональної моделі інформаційної системи з обробки даних щодо публікаційної діяльності викладача ЗВО. Інженерні та освітні технології, 2023, 11.1: 76-87.

Kachurivskyi V.O., Kachurivska H.M. ASSOCIATIVE IDENTIFICATION CODE OF THE AUTHOR OF A SCIENTIFIC PUBLICATION IN THE INFORMATION SYSTEM FOR ACCOUNTING OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS OF SCIENTIFIC AND PEDAGOGICAL WORKERS

This paper analyzes the monitoring of the implementation of licensing conditions for educational activities by the management of a higher education institution, external state and private institutions. It is proposed to automatise the process of generating reports on the publication activity of scientific and pedagogical workers using an information system of accounting for scientific publications. Formalizing data on scientific publications, it is determined that information can be presented in the form of a tuple. The set of these tuples forms a set of publications. It is established that one author corresponds to a certain set of representations of the surname, first name and patronymic records, depending on the original language of the publication and the recorded surname and initials in the details of the printed edition, which forms the essence of associative representations. Based on the conceptual apparatus of set theory, it is shown that a record of a scientific publication is the intersection of a set of publications and a set of associative representations. For the unambiguous identification of a scientific and pedagogical worker, a policy for forming an associative code has been developed, which represents one of the options for the set of representations of the author's surname and initials.

Since the sphere of management of an educational institution is full-time scientific and pedagogical workers, two separate entities have been formed: full-time employees and authors from other institutions. The attributes of the full-time employees entity, which can be expanded, have been determined. The formation of an associative code uses a marker that indicates the associative entity of the representations of the surname and initials.

The article models the structure of a database for keeping records of scientific publications. An algorithm for forming an associative code in the form of a sequence diagram for storage in a database has been developed. The proposed policy for forming an associative code can be used in information systems for accounting for other types of professional activities: educational and scientific and methodological activities, innovations and intellectual property, professional expert and public activities, international activities, etc. The considered information system is implemented using a diverse stack of information technologies based on client-server architecture.

Key words: *associative code, representation, professional activity, information system, scientific publication, set theory.*

УДК 004.735
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/17

Киричек Г.Г.
Національний університет «Запорізька політехніка»

Пестов О.Д.
Національний університет «Запорізька політехніка»

Тягунова М.Ю.
Національний університет «Запорізька політехніка»

МАСШТАБНА ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНА MESH МЕРЕЖА

В роботі досліджується масштабованість експериментальної схеми маршрутизації Yggdrasil щодо логіки, ліміту переходів, використання процесора та пам'яті. Експерименти з демоном маршрутизації проведено на різного розміру топологіях із використанням середовищ meshnet-lab і coreemu-lab. Виявлено певні особливості використання даної схеми маршрутизації як основи масштабної децентралізованої mesh мережі. Метою роботи є проведення досліджень, визначення доцільності використання схеми маршрутизації Yggdrasil, як основи масштабної децентралізованої mesh мережі. Об'єктом дослідження є процес проєктування масштабної децентралізованої mesh мережі на основі схеми маршрутизації Yggdrasil. Предметом є моделі, методи та програмні засоби реалізації масштабної децентралізованої mesh мережі на основі Yggdrasil. У рамках дослідження запропоновано нові підходи до розгортання масштабної децентралізованої mesh мережі як альтернативи ієрархічним мережами інтернет-провайдерів. Авторами визначено збільшення використання процесору на довгих гілках остовного дерева і аномалії трафіку, які внесені блукаючим кореневим вузлом та запропоновано попереджувальний майнінг малих ключів для детермінованого розміщення кореневих вузлів, також наведено модель системи та обґрунтовано використання стандарту IEEE 802.11s з вимкненою маршрутизацією як базової технології канального рівня. А також отримано орієнтовну структуру масштабної децентралізованої mesh мережі та технічні вимоги до її вузлів. Результати показали, що Yggdrasil значно перевершує інші протоколи mesh маршрутизації, такі як OLSR і Babel в обмеженні переходів, визначаючи параметри використання системних ресурсів. Експерименти демонструють типовий час конвергенції, а також тенденції використання пам'яті та процесора Yggdrasil і підтверджують їх масштабування з глибиною мережі, а не з її загальним розміром. Тому Yggdrasil є перспективним методом розгортання великомасштабних децентралізованих сітчастих мереж незалежних вузлів і альтернативою централізованим ієрархічним мережам.

Ключові слова: *масштабованість, mesh мережа, Yggdrasil, маршрутизація, IEEE 802.11s.*

Постановка проблеми. В наші дні централізовані програмно-визначені мережі стають все більш популярними серед інтернет-провайдерів завдяки перевагам у автоматизованому віддаленому налаштуванні обладнання, моніторингу, контролі, простоті розгортання, використанні апаратного забезпечення типу «white box» тощо [1]. Ці переваги є можливими за рахунок надійності мережі та стійкості до збоїв, бо централізація неминуче додає системі єдині точки відмови [2]. Є багато прикладів того, наскільки ненадійними є централізовані ієрархічні системи зв'язку, що вимагає іншого підходу – сітчастої (mesh) мережі, де межа між маршрутизаторами та кінцевими пристроями стає розмитою. Кожен вузол мережі функціонує незалежно, встановлюючи зв'язки з іншими вузлами поблизу з метою маршрутизації трафіку в мережі не покладаючись на центральний орган [1, 2]. Потенційним вирішенням проблем, які вникають є використання експериментальної схеми маршрутизації Yggdrasil [3], основна суть якої полягає у використанні адресації на основі відкритих ключів Ed25519 [4] і самоорганізованого остовного дерева мережі. Останнє схоже на CottonCandy, за винятком того, що замість визначеного шлюзу коренем дерева стає вузол із найнижчим значенням ключа, і може бути автоматично заміненим у разі збою. Пошук вузлів виконується на вимогу і за допомогою широкомовних розсилок, які фільтруються bloom-фільтрами. Результатом такого пошуку є отримання координат вузла, який приймає дані, відносно поточного кореня мережі, за якими надсилається трафік. Для визначення напрямку трафіку, на кожному

наступному вузлі застосовується опортуністична жадібна маршрутизація [5], пакети надсилаються через з'єднання, що наблизить їх до вказаних координат.

Через те, що схема маршрутизації Yggdrasil є відносно новою та все ще перебуває на альфастадії розробки, існує не так багато робіт, які охоплюють її функціональність або просто наводять, як приклад. Автори наукових робіт представляють результати застосування порівняльних тестів при використанні оверлейної тестової мережі Yggdrasil як інструменту обходу NAT при віддаленому керуванні, але без тестування масштабованості самої схеми маршрутизації [6]. Інші автори порівнюють Yggdrasil із іншими мережними протоколами маршрутизації в ряді бенчмарків, де лише один з них підтримує масштабування понад 100 вузлів [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження з питань маршрутизації для великих mesh мереж зосереджені на її реалізації для IoT та бездротових сенсорних мереж, з урахуванням оптимізації енергоспоживання і віддаленості за рахунок пропускної здатності та безпеки [8]. Наприклад, мережа на основі CottonCandy працює за принципом організації вузлів в остовне дерево (spanning tree) від вузла Інтернет-шлюзу, призначеного коренем дерева, при цьому уникаючи зіткнень завдяки використанню рекурсивних запитів даних під час робочих циклів (рис. 1) [9].

Додатковим засобом уникнення зіткнень є використання вузлами різних каналів відповідно до остовного дерева – кожен вузол прослуховує батьківський канал на предмет рекурсивних запитів, а пропагує їх за власним каналом, відмінним від батьківського (рис. 2).

Хоча підхід добре працює при невеликих обсягах сенсорних даних, він не підходить для спонтанного зв'язку між вузлами в мережі загального призначення. Крім того, наявність чітко визначеного кореневого вузла додає до мережі єдину точку збою, що перешкоджає загальній меті децентралізації.

Ямамото та інші автори пропонують протокол маршрутизації VORTEX – підхід, заснований на опортуністичній маршрутизації ієрархічної структури рівнів, яка встановлена на початковому етапі (рис. 3) [10]. Рівні розподіляються за наступним алгоритмом: вузли періодично надсилають HELLO-пакети та прослуховують ефір на предмет отримання пакетів від інших вузлів; з кількості унікальних ID у HELLO-пакетах кожен вузол має кількість сусідів та їх ступені; якщо вузол має найбільшу ступінь, він підвищує свій ступінь до 1, інакше надсилає UTR (запит підвищення рівня) вузлу з найбільшим ступенем; отримувач UTR підвищує свій рівень до 1; аналогічно серед вузлів першого рівня обираються вузли другого рівня.

Для пари кінцевих вузлів мережа виглядає як «чорна скринька», а проміжні вузли просто пересилають пакети вздовж ієрархії, поки вони не досягнуть одержувача. Пакети проходять кількома шляхами для забезпечення надійності. Необхідність здійснювати виявлення маршруту відпадає, однак мережа переповнюється додатковим трафіком, який знижує її продуктивність.

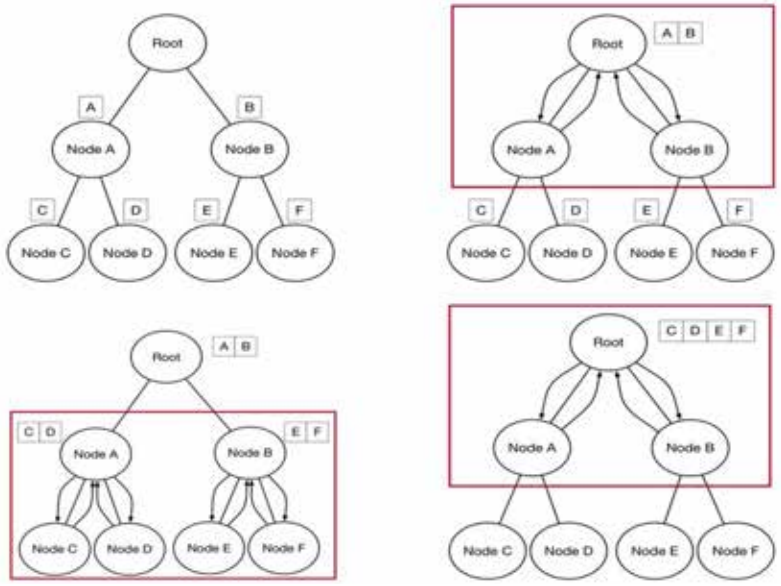


Рис. 1. Рекурсивне збирання даних у остовному дереві CottonCandy [9]

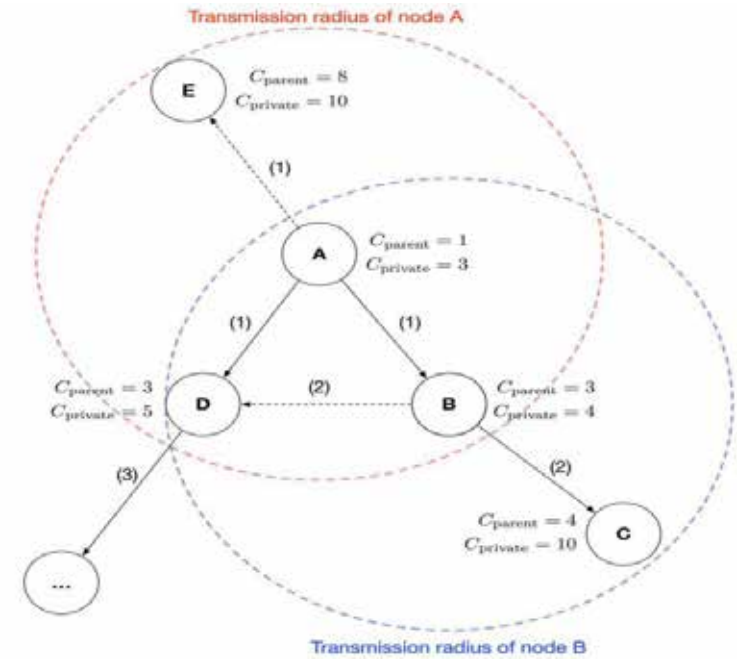


Рис. 2. Канальний розподіл CottonCandy [9]

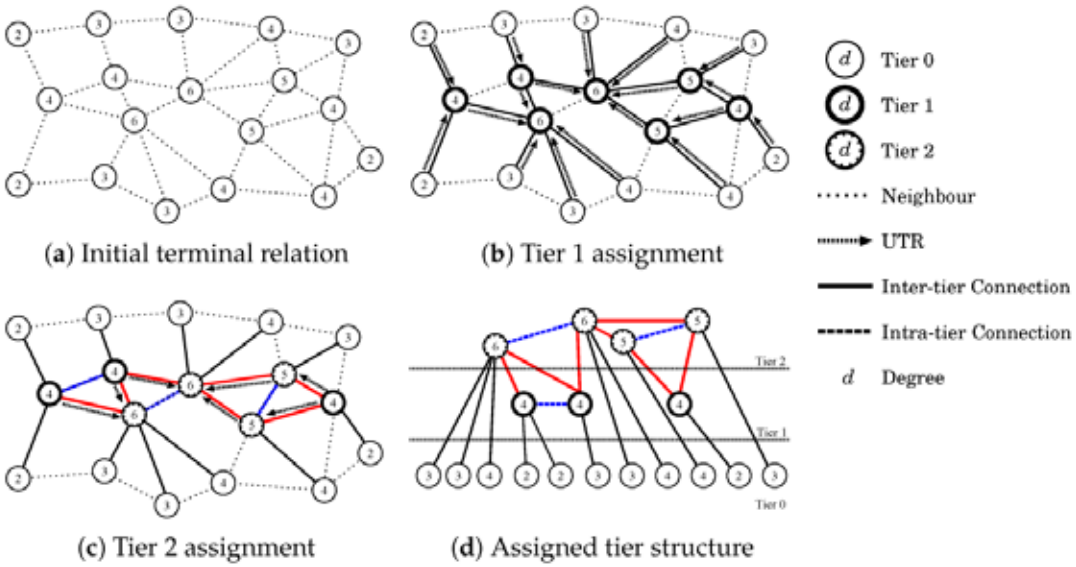


Рис. 3. Розподіл вузлів за рівнями у VORTEX [10]

Прабу та інші [11] мають новий підхід до mesh маршрутизації – концепцію «теплових слідів» і представляють її за допомогою bloom-фільтрів на кількох рівнях градієнта інтенсивності (рис. 4). Під час пошуку маршруту вузли випадковим чином «переглядають» мережу, поки не досягнуть «тепла» вузла призначення у bloom-фільтрі останнього рівня, а потім слідують за ним у напрямку збільшення інтенсивності (рис. 5). Інші вузли можуть слідувати до місця призначення, повторно використовуючи маршрут. При цьому знайдений маршрут поступово оптимізується під час використання (рис. 6).

Основним недоліком цього підходу є його великомасштабна продуктивність, пов'язана з випадковим пошуком із малою кількістю рівнів градієнта «тепла». Тому щоб знайти пункт призначення, може знадобитися пройти всю мережу, що призведе до збільшеного використання пам'яті.

Постановка завдання. Метою роботи є проведення досліджень, визначення доцільності використання схеми маршрутизації Yggdrasil, як

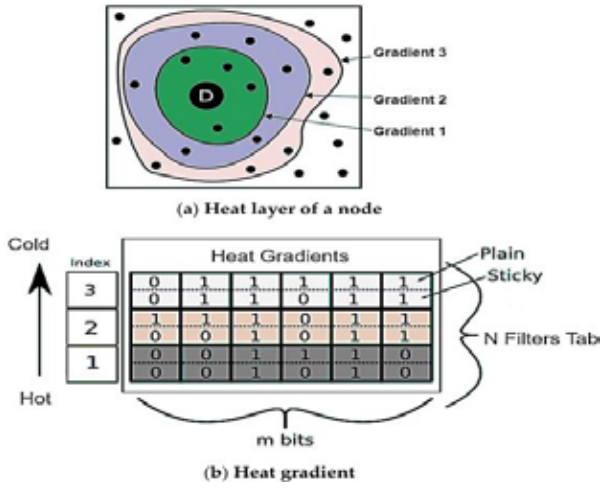


Рис. 4. Градієнт інтенсивності «тепла» вузла D bloom-фільтрами [11]

основи масштабної децентралізованої mesh мережі. Об'єктом дослідження є процес проєктування масштабної децентралізованої mesh мережі на основі схеми маршрутизації Yggdrasil. Предметом є моделі, методи та програмні засоби реалізації масштабної децентралізованої mesh мережі на основі Yggdrasil. У рамках дослідження потрібно визначити збільшення використання процесору на довгих гілках остовного дерева і аномалії трафіку, які вносяться блукаючим кореневим вузлом та запропонувати попереджувальний майнінг малих ключів для детермінованого розміщення кореневих вузлів, а також навести модель системи та обґрунтувати використання стандарту IEEE 802.11s із вимкненою маршрутизацією як базової технології канального рівня, отримати орієнтовну структуру масштабної децентралізованої mesh мережі та технічні вимоги до її вузлів. Експериментально продемонструвати, що Yggdrasil значно перевершує інші протоколи маршрутизації сітчастої мережі в обмеженні переходів, визначаючи параметри використання системних ресурсів та довести, що Yggdrasil є перспективним методом розгортання децентралізованих сітчастих мереж незалежних вузлів і альтернативою централізованим ієрархічним мережам.

Виклад основного матеріалу. При прийнятті рішення про доречність схеми маршрутизації важливим є масштабування, використання системних ресурсів і зростання часу конвергенції із розміром мережі. Випробування проводилися із використанням середовища meshnet-lab, враховуючи його гнучкість та можливості емуляції великомасштабних топологій за допомогою мережевого простору імен Linux (Linux network namespaces) [12] та автоматизації процесу за допомогою Python

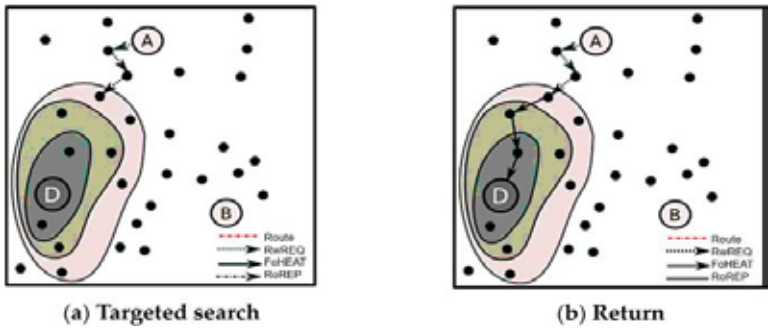


Рис. 5. Пошук вузла D за його «теплом» [11]

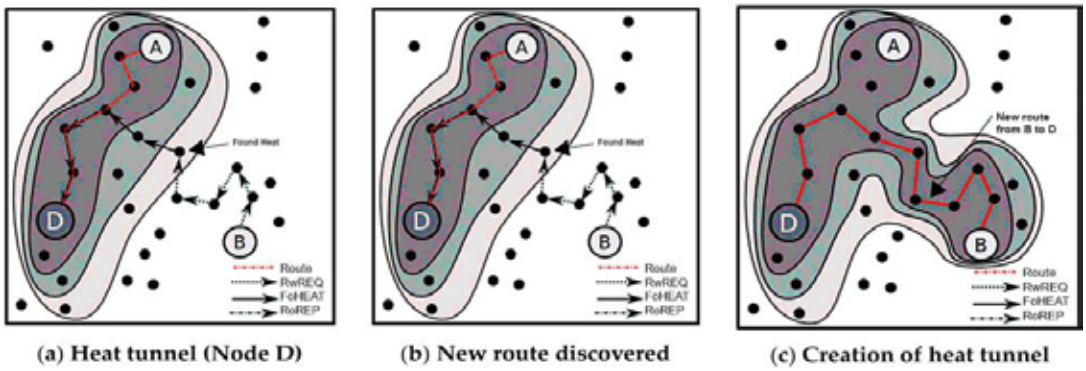


Рис. 6. Повторне використання «теплового тунелю» вузлом B [11]

[13]. Однак, слід зазначити, що хост-система, на якій проводилися тести, не може обробляти більше ніж 750 вузлів одночасно, оскільки після цього в системі закінчується пам'ять і починають використовуватися додаткові ресурси. Процедура є покроковою:

– підготовка топології згенерованими файлами JSON, включеними до meshnet-lab та обмеження пропускної здатності з'єднань до 100 Мбіт/с;

– запуск демонів маршрутизації на вузлах;

– запуск скрипту моніторингу системних ресурсів (кожну секунду здійснюється запис використання ЦП та резидентної пам'яті);

– очікування 30 сек., поки вузли знаходять один одного;

– протягом наступних 30 секунд надсилаються N унікальних випадкових пінгів із кількістю переходів 2 і дедлайном у 30 сек., де N є кількістю з'єднань;

– очікування 15 секунд;

– повторюються попередні кроки п'ять разів;

– запуск сценарію збору інформації про вузли (необхідна для визначення кореневого вузла під час обробки результатів);

– зупинка демонів, сценаріїв моніторингу ресурсів і очищення мережі;

– повторення процедури на більшій топології, доки не надійде менше 40% пінгів або не буде застосовано більше 750 вузлів.

Цей алгоритм, як більш реалістичний і найгірший сценарій відповідно, перевірено на топології випадкового дерева і лінійній топології. Крім того, з метою дослідження обсягу пам'яті, що використовується в конвергентній мережі, проведено тривалі за часом експерименти на найбільшій життєздатній топології, що визначається 100% надходженням пінгів.

Інший експеримент на випадковій деревоподібній топології з 50 вузлів без обмеження пропускної здатності показав різницю у використанні процесору для вузлів, які передають та приймають дані, а також вузлів, які не беруть участі в передачі. Трафік генерувався протягом 10 секунд між двома віддаленими вузлами за допомогою утиліти iperf3. Нарешті, проведення експерименту на лінійній топології з 750 вузлами із недосконалими повільними з'єднаннями показав стійкість Yggdrasil до таких умов. Застосовано наступні параметри з'єднань: пропускна здатність дорівнювала 10 Мбіт/с із затримкою 10±5 мс. Трафік генерувався між першим і останнім вузлом за допомогою стандартної утиліти ping. Останні два тести проводилися вручну. Процедуру бенчмаркінгу автоматизовано за допомогою модифікованої версії скрипту Python «benchmark1», включеного в meshnet-lab.

Результати порівняльного аналізу пам'яті за топологією випадкового дерева підтверджують припущення про те, що на використання пам'яті вузлом позитивно впливає кількість його з'єднань. Незважаючи на збільшення загального розміру мережі, використання пам'яті для абсолютної більшості вузлів залишається приблизно у тому ж діапазоні. Надходження пакетів для топології випадкового дерева залишається весь час на рівні 100%.

Оскільки в лінійній топології кожен вузол, крім першого та останнього, має лише два зв'язки, відтінок і розмір точок представляють положення вузлів у лінії. Довжина мережі позитивно впливає на використання пам'яті, що підтверджується піковим її використанням, наведеним у таблиці 1. Ця тенденція більш помітна на лінійних топологіях, хоча для мереж із понад 300 вузлів вона перестає бути настільки постійною.

Іншу динаміку для лінійної топології можна спостерігати при середньому використанні процесору. Коли вузли розташовані в лінію, використання процесору масштабується відповідно до її довжини і тим більше, чим ближче до середини лінії конкретний вузол. Крім того, кореневий вузол завжди ділить лінію на дві частини, для яких довжина та середні точки розглядаються

Таблиця 1

Пікове використання пам'яті

Розмір мережі	Пікове використання пам'яті, КБ		Розмір мережі	Пікове використання пам'яті, КБ		Розмір мережі	Пікове використання пам'яті, КБ	
	Дерево	Лінія		Дерево	Лінія		Дерево	Лінія
50	28640	26640	300	29300	30300	550	28664	30740
100	27980	27740	350	28812	31840	600	28624	32712
150	29036	29496	400	29004	30512	650	30092	32116
200	27432	28104	450	27736	30812	700	29620	30912
250	28660	29912	500	29428	31168	750	29564	30656

окремо. Мережі з 700 і 750 вузлами ніколи не досягають 100% надходження пакетів. Подальше дослідження виявило, що це відбувається через повернення утилітою ping «змішаного» результату середовищу meshnet-lab. У довгих топологіях потрібно чекати значно довше, поки прийде початковий пакет. Це призводить до того, що вузол надсилає другий пакет, що успішно надходить і тому результат становить «50%».

Маючи цю інформацію, ознакою конвергентної мережі можна вважати надходження пакетів вище 95% та, таким чином, дізнатися приблизний час конвергенції (табл. 2). Вимірювання записані з інтервалом принаймні 60 секунд, тому числа не слід приймати за номіналом. Однак їх можна використати для побудови графіка часу конвергенції, що передбачає лінійну залежність між довжиною мережі та часом конвергенції.

Експеримент проводився на mesh мережі розміром у 19 вузлів. Вузол n1 посилав пінг на віддалений вузол n20 великими пакетами, через що середовище визначало ці вузли, як вузли із значним об'ємом трафіку (рис. 7).

Звертаючи увагу на обсяги трафіку можна помітити, як після вузла n2 трафік нібито розподіляється між вузлами n3 і n5 знижуючи швидкість (з 750 Кбіт/с до 375 Кбіт/с). Подальше дослідження надало змогу визначити, що це є наслідком жадібної маршрутизації, через яку потоки трафіку n1 → n20 і n20 → n1 передаються різними шляхами. Коли трафік передається від n1 до n20, використовується короткий шлях n4 – n5, оскільки він дозволяє пропустити вузол n3. Таким же чином для трафіку, що передається від вузла n20 до n1, використовується з'єднання між вузлами n7 – n3, оскільки воно дозволяє пропустити вузол n5. Ця поведінка чітко простежується в топології, яка наведена на рисунку 8. Для вузлів використовуються кабельні з'єднання із односпрямованими потоками трафіку між вузлами n1 і n2. З'єднання поза деревом між вузлами n12 – n14 та n13 – n15 дозволяють трафіку пропускати два вузли і тому вважаються ефективними. Ця особливість використання різних шляхів для потоків трафіку між двома вузлами є корисною для збільшення пропускної здатності та зменшення заторів при передачі.

Ця особливість використання різних шляхів для потоків трафіку між двома вузлами є корисною для збільшення пропускної здатності та зменшення заторів при передачі.

Висновки. У роботі проведено дослідження масштабованості експериментальної схеми маршрутизації Yggdrasil щодо логіки, ліміту переходів, використання процесора та пам'яті. Експерименти з демоном маршрутизації проведено на різного розміру топологіях із використанням середовищ meshnet-lab і coreemu-lab. Виявлено певні особливості використання даної схеми маршру-

Таблиця 2

Час конвергенції на лінійній топології

Довжина мережі	Час конвергенції, с	Довжина мережі	Час конвергенції, с	Довжина мережі	Час конвергенції, с
50	60	300	206	550	462
100	65	350	220	600	401
150	129	400	224	650	326
200	135	450	252	700	502
250	190	500	310	750	361

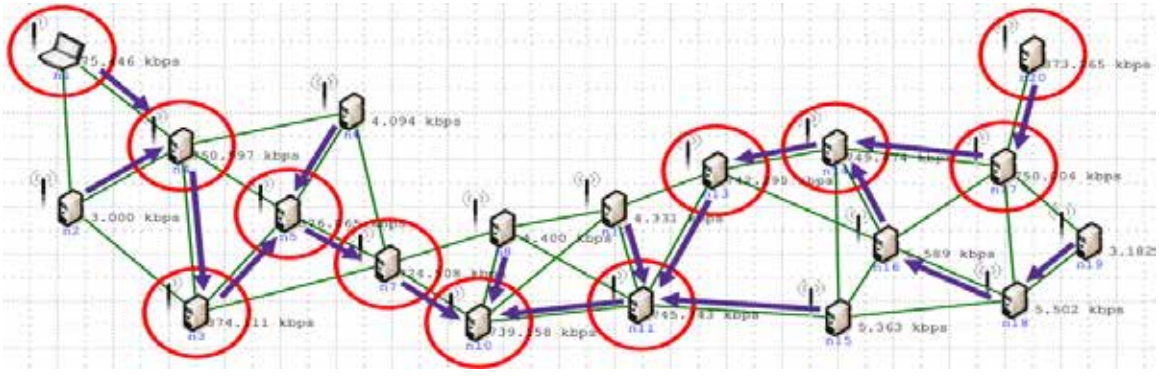


Рис. 7. Бездротова mesh мережа на 19 вузлів, трафік між n1 та n20

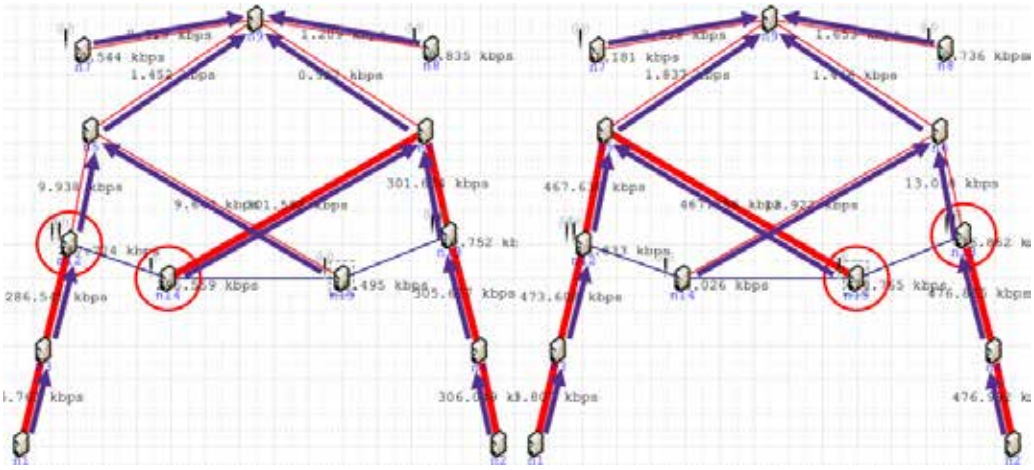


Рис. 8. Мережа на 15 вузлів, потоки трафіку n1 → n2 та n2 → n1

тизації як основи масштабної децентралізованої mesh мережі. Результати показали, що Yggdrasil значно перевершує інші протоколи mesh маршрутизації в обмеженні переходів, визначаючи параметри використання системних ресурсів. Експерименти демонструють типовий час конвергенції, а також тенденції використання пам'яті та процесора Yggdrasil і підтверджують їх масштабування з глибиною мережі, а не з її загальним розміром. Yggdrasil визнано перспективним методом розгортання масштабних децентралізованих сітчастих мереж.

Список літератури:

1. Greig J. A. Wireless Mesh Networks as Community Hubs: Analysis of Small-Scale Wireless Mesh Networks and Community-Centered Technology Training. Journal of Information Policy. 2018. 8(1). P. 232–266.

2. Рудьковський О.Р., Киричек Г.Г. Програмний комплекс з підтримки розподіленої взаємодії мережевих пристроїв та додатків. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки».* 2021. Вип.32(71). № 2. С. 229–234.

3. Yggdrasil Network. URL: https://yggdrasil-network.github.io/ (дата звернення: 06.01.2025).

4. Brendel J., Cremers C., Jackson D., Zhao, M. The Provable Security of Ed25519: Theory and Practice. IEEE Symposium on SP. 2021. P. 1659-1676.

5. Khaledi M., Rovira-Sugranes A., Afghah F., Razi A. On greedy routing в dynamic uav networks. IEEE International Conference on Sensing, Communication and Networking (SECON Workshops), 2018. P. 1-5.

6. Messan PN, Krupinski S., Maurelli F., Vallicrosa G., Ridao, P. Evaluation of computer networking methods for interaction with remote robotic systems. IEEE AFRICON. 2021. P. 1-6.

7. Reich B. Wifi-Ad-hoc Mesh Networks for mobile Systems (Doctoral dissertation, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg). 2024.

8. Киричек Г.Г., Щетінін М.О. Конфігурація серверів з використанням Ansible. Publishing House "Baltija Publishing". 2021. С. 15–17.

9. Wu D., Liebeherr J. A Low-Cost Low-Power LoRa Mesh Network for Large-Scale Environmental Sensing. IEEE Internet of Things Journal. 2023. P. 1.

10. Yamamoto R., Yamazaki T., Ohzahata S. VORTEX: Network-Driven Opportunistic Routing for Ad Hoc Networks. Sensors. 2023. 23(6). P. 2893.

11. Prabu S., Maheswari M., Jothi B., Banupriya J., Bindu G. Efficient Bloom Filter-Based Routing Protocol for Scalable Mobile Networks. Engineering Proceedings. 2023. 59(1). P. 75.

12. Schubert D., Jaeger B., Helm M. Network Emulation using Linux Network Namespaces. Network. 2019. 57.

13. Massaron L., Mueller J. P. Python for Data Science For Dummies. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2015. 418 p.

Kyrychek H.H., Pestov O.D., Tiahunova M.Yu. SCALE DECENTRALIZED MESH NETWORK

The paper investigates the scalability of the experimental Yggdrasil routing scheme in terms of logic, hop limit, CPU usage, and memory. Experiments with the routing daemon were conducted on different sized topologies using the meshnet-lab and coreemu-lab environments. Certain features of using this routing scheme as the basis of a large-scale decentralized mesh network have been identified. The purpose of the work is to conduct research, determine the feasibility of using the Yggdrasil routing scheme as the basis of a large-scale decentralized mesh network. The object of the research is the process of designing a large-scale decentralized mesh network based on the Yggdrasil routing scheme. The subject is models, methods and software tools for implementing a large-scale decentralized mesh network based on Yggdrasil. The research proposes new approaches to deploying a large-scale decentralized mesh network as an alternative to hierarchical ISP networks. The authors identify increased CPU usage on long branches of the spanning tree and traffic anomalies introduced by a wandering root node, and propose predictive mining of small keys for deterministic placement of root nodes. They also present a system model and justify the use of the IEEE 802.11s standard with routing disabled as the basic link-layer technology. They also obtain an approximate structure of a large-scale decentralized mesh network and technical requirements for its nodes. The results show that Yggdrasil significantly outperforms other mesh routing protocols such as OLSR and Babel in limiting hops by determining system resource usage parameters. The experiments demonstrate the typical convergence time, as well as the memory and CPU usage trends of Yggdrasil and confirm that they scale with network depth rather than with its overall size. Therefore, Yggdrasil is a promising method for deploying large-scale decentralized mesh networks of independent nodes and an alternative to centralized hierarchical networks.

Key words: *scalability, mesh network, Yggdrasil, routing, IEEE 802.11s.*

УДК 629.735
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/18

Корнута В.А.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Меренько Б.І.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Катамай Ю.В.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Дмитрів І.Я.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Іванців Н.Т.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Дячук А.В.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

МЕТОДИ УБЕЗПЕЧЕННЯ ВІД ПОМИЛОК ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ НАФТОГАЗОВОЇ ГАЛУЗІ

У статті йдеться про сучасні підходи до зменшення ризиків і помилок у функціонуванні інтелектуальних автоматизованих систем (ІАС), які застосовуються в нафтогазовій галузі. Основна увага приділяється використанню тестування, верифікації та аналізу покриття коду як ефективних інструментів для забезпечення надійності та відповідності системи галузевим стандартам безпеки. Верифікація дозволяє ідентифікувати помилки на етапі проектування та розробки програмного забезпечення, забезпечуючи відповідність алгоритмів, коду та логіки системи вимогам проекту. Формальні методи, такі як перевірка моделей і синтез правил керування, застосовуються для підтвердження коректності системи та оптимізації процесу її розробки. Забезпечується тестування всіх можливих сценаріїв функціонування системи, дозволяючи ідентифікувати нефункціональні або недокументовані частини коду. Також досліджено ефективність модульного та інтеграційного тестування, що дозволяє забезпечити безперебійну роботу системи в екстремальних умовах і запобігти аварійним ситуаціям. Приділено увагу тестуванню на основі властивостей, які вирішують відповідність нефункціональним вимогам та виявляють критичні перевірки, які можуть залишитися непоміченими іншими видами тестування. У роботі також описано підходи до моделювання поведінки автоматизованих систем із використанням формальних мов і методик моделей, що дозволяють перевірити недоліки на етапах планування. Розглянуто переваги застосування перевірки обмеженої моделі, яка дозволяє спростити пошук контрприкладів. Запропоновані рекомендації спрямовані на оптимізацію тестових сценаріїв, підвищення структурної закритості системи та використання інструментів автоматизації процесу перевірки. Такі підходи сприяють зниженню витрат на розробку та випробування, а також забезпечують відповідність ІАС сучасному стандарту.

Ключові слова: *нафтогазова галузь, інтелектуальні автоматизовані системи, тестування, верифікація, формальні методи.*

Постановка проблеми. Специфіка роботи в нафтогазовій сфері, а саме, складні умови експлуатації, значний обсяг оброблюваних даних і високий рівень автоматизації, вимагає використання спеціалізованих підходів до управління ризиками. Зменшення ймовірності виникнення помилок можливо завдяки застосуванню сучасних методів аналізу ризиків, превентивного обслуговування обладнання та алгоритмічних підходів виявлення та прогнозування відхилень у роботі системи. Ефективне управління ризиками в інтелектуальних автоматизованих системах (ІАС) забезпечує використання як традиційних, так і інноваційних підходів. Серед найпоширеніших методів можна виділити системний аналіз, моніторинг стану обладнання в реальному часі та машинне

навчання. Застосування цифрових двійників дозволяє моделювати сценарії розвитку подій та оцінювати наслідки можливих відхилень у роботі системи. Це, у свою чергу, допоможе розробляти ефективні стратегії реагування на ризики. Крім того, велике значення мають технології предиктивної аналітики, які дають можливість прогнозувати несправності до їх виникнення, що сприяє зниженню аварійності та посиленню продукту. У цій статті розглянуто основні методи мінімізації ризиків і помилок у роботі ІАС, що застосовуються в нафтогазовій галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зменшення ризиків і помилок у роботі ІАС має вирішальне значення для забезпечення безпеки та ефективності у складних промислових галузях, таких як нафтогазова промисловість. Одним із ключових етапів є тестування програмного забезпечення, а також вибір і оцінка тестових кейсів, які здатні виявити специфічні помилки, що можуть залишатися непоміченими при використанні стандартних підходів [1]. Верифікація та перевірка покриття коду є ефективними інструментами, що дозволяють оцінити коректність, надійність і повноту системи. Верифікація допомагає виявити помилки ще на етапі розробки алгоритмів, коду або логіки системи, тим самим мінімізуючи ризики серйозних збоїв у майбутньому. Наприклад, у нафтогазовій промисловості це може включати контроль критичних параметрів, таких як тиск, температура або витрати у трубопроводах, а також прогнозування несправностей обладнання на основі алгоритмів штучного інтелекту [2, 3]. Застосування верифікації дозволяє також перевірити відповідність галузевим стандартам безпеки, тестувати поведінку системи в екстремальних умовах та перевіряти функціональність у сценаріях, що максимально наближені до реальних умов експлуатації [4]. Наприклад, верифікація сценаріїв аварійного відключення обладнання дозволяє оцінити готовність системи до реагування на відмови сенсорів чи інші позаштатні ситуації [5]. Верифікація може проводитися за допомогою формальних та неформальних методів. Формальні методи, такі як перевірка моделі, дозволяють виконувати аналіз на рівні абстрактних моделей системи, використовуючи формальні мови [6]. Це забезпечує перевірку відповідності системи визначеним вимогам на ранніх етапах проєктування, знижуючи витрати на усунення помилок після впровадження. Формальні підходи, як-от перевірка моделей, дозволяють зосередитися на ключових аспектах системи, використовуючи алгебраїчні методи або алгоритми диспетчерського керування [7, 8]. Перевірка покриття гарантує, що всі можливі шляхи виконання та сценарії використання системи були належним чином протестовані. Це дозволяє виявляти недокументовані або нефункціонуючі частини коду, підвищуючи надійність і відповідність системи технічним вимогам. У галузі автоматизації важливо досягати повного покриття для перевірки коректної реакції системи на критичні помилки, такі як вихід із ладу сенсорів чи неправильні зовнішні сигнали [9].

Постановка завдання. Формулювання цілей статті – розробка, аналіз та удосконалення методів зменшення ризиків і помилок у роботі інтелектуальних автоматизованих систем, які використовуються в нафтогазовій галузі, шляхом впровадження ефективних підходів до тестування, верифікації та перевірки покриття коду з метою забезпечення їхньої надійності, функціональності та відповідності галузевим стандартам.

Виклад основного матеріалу. Верифікація інтелектуальних автоматизованих систем (ІАС) є критичним процесом, що забезпечує відповідність компонентів і підсистем проектним вимогам. У цьому контексті застосовуються як формальні методи, так і підходи тестування, що дозволяють максимально точно перевіряти системи. Одним із ключових аспектів є побудова моделі поведінки, яка складається з автоматичних переходів та операцій, що включають формальні та неформальні елементи. Цей підхід дозволяє використовувати формальні методи на етапі планування моделі, а також виконувати перевірку поточної моделі з урахуванням її драйверів, інтерфейсів, симуляцій тощо.

Зокрема, у розробці ІАС застосовуються інструменти та мови програмування, орієнтовані на автоматизацію. Наприклад, операція сканування вікна може бути реалізована за допомогою мови ROS (Robot Operating System). Приклад коду для виконання такої операції подано нижче:

```
operation:scan_box
deadline:10seconds
pre:start_scan_box    ->precondition
g:scan_req_state==initial&&->planningguard
scan_req_trigger==false&&
box_is_scanned==false
gr:true->runningguard
a:[scan_req_trigger<-true]   ->planningactions
ar:[] ->runningactions
```

```
post:complete_scan_box        ->postcondition
g:true ->planningguard
gr:scan_req_state==succeeded ->runningguard
a:[scan_req_state<-initial,  ->planningactions
scan_req_trigger<-false,
box_is_scanned<-true]
ar:[] ->runningactions
```

Цей приклад демонструє використання формального опису умов та дій для виконання конкретної операції в IAC. Такі моделі дозволяють детально описувати поведінку системи та забезпечують гнучкість у використанні як для симуляцій, так і для реального впровадження.

Формальні методи у верифікації інтелектуальних автоматизованих систем (IAC) дозволяють забезпечити відповідність системи визначеним специфікаціям і виявити можливі недоліки на ранніх етапах. Одними з найважливіших властивостей, що перевіряються, є властивості безпеки та властивості життєздатності.

- Властивості безпеки гарантують, що жодна небажана подія не станеться, наприклад, уникнення одночасного доступу до спільної зони або запобігання досягненню заборонених станів.
- Властивості життєздатності, навпаки, забезпечують, що система врешті-решт досягне бажаного цільового стану, наприклад, виконає задане завдання без зупинок через взаємоблокування [10].

Специфікації безпеки мають обмежену кількість контрприкладів, у той час як специфікації життєздатності – необмежену.

Окрім перевірки відповідності моделі специфікаціям, можливо застосовувати підхід синтезу, що дозволяє автоматично генерувати правила керування. Наприклад: теорія наглядового контролю [5] використовується для обчислення додаткових обмежень, що запобігають потраплянню системи до небажаних станів; техніка вилучення захисту [11] вдосконалює моделі планування, гарантуючи безпечність і відповідність високорівневим специфікаціям. Інший формальний підхід, перевірка моделі [12, 13], використовується для перевірки відповідності моделі заданим властивостям шляхом дослідження простору станів. Тимчасові властивості формулюються у термінах часової логіки, зокрема: лінійна часова логіка (LTL) включає оператори, такі як:

- o "наступний стан" (○),
- o "завжди" (□),
- o "зрештою" (◇),
- o "до" (U).

Наприклад, формула: □((scan_req_trigger ∧ ¬box_is_scanned) → ◇box_is_scanned) означає, що якщо сканування запущено, а коробку ще не просканировано, то врешті-решт коробку обов'язково буде просканировано.

Щоб скористатися перевагами методів розв'язання задачі задовільності пропозицій, модель і специфікації можна сформулювати як задачу з обмеженим розміром. До такого формулювання можна застосувати метод перевірки обмеженої моделі [14], де границя визначає, за скільки кроків від початкового стану шукати контрприклади. Подібно до ітераційного кодування переходів, скасовані специфікації лінійної часової логіки кодуються до межі, яка представлена поточною ітерацією. Якщо задача розв'язується, це означає, що специфікація була порушена, і отримане присвоєння може бути використане для реконструкції контрприкладу.

Слабкою стороною таких систем моделювання шляхом розділення поведінки планування та виконання є те, що не забезпечується загального способу уникнення тупикових ситуацій під час виконання. Хоча на моделі планування можна виконати вилучення захисту та перевірку моделі, перевірка працюючої моделі, а також зв'язку, інтерфейсів, драйверів тощо залежить саме від дій тестування.

Модульне тестування. Щоб мати можливість переконатися, що певний код поводитиметься так, як це було задумано розробником, звичайною практикою є тестування такого коду за допомогою написаного вручну модульних тестів [15]. Такі тести призначені для верифікації чи виявлення хибності коду для обраного та повністю визначеного вузла набору вхідних даних, а також перевірки раніше відомих проблемних наборів вхідних даних, які спричиняли помилки в минулому.

У методології тест-орієнтованої розробки модульні тести зазвичай пишуться перед фактичним кодом, що означає, що тести можуть бути невдалими, доки розробники не реалізують код правильно. Кожний модуль тестується незалежно в ізольованому середовищі, щоб переконатися у відсутності залежностей у коді.

Модульне тестування зосереджується виключно на аспектах, які є важливими для блоку, який досліджується. Цей підхід надає розробнику можливість вносити зміни у вихідний код, не впливаючи на інші модулі чи загальну функціональність програми. Наприклад, під час розробки IAC доцільно провести наступне модульне тестування: симуляції (симуляція отримує команди

та моделює поведінку ресурсу, як очікувалося); функції (функції та алгоритми, що керують ІАС, працюють як очікувалося); комунікація (при обробленні ресурсів їхні відповідні інтерфейси та апаратне забезпечення обмінюються інформацією, як очікувалося, використовуючи правильні типи повідомлень, обробка всіх полів повідомлень, обробка команд та вчасна відповідь тощо); драйвери (драйвери ресурсів здатні керувати обладнанням, як очікувалося).

Для модульного тестування поведінки симуляторів, інтерфейсів і драйверів під час розробки ІАС пропонується створити та використовувати прості фіктивні вузли. Ці вузли дозволяють тестувати конкретні команди та перевіряти очікувані відповіді від симуляторів, інтерфейсів і драйверів. Якщо їх поведінка відповідає очікуваним результатам для перевірених вхідних даних, тестування можна продовжувати. В іншому випадку треба змінювати компоненти, поки не буде досягнена бажана продуктивність.

Інтеграційне тестування. Коли кожен блок у системі буде перевірено в задовільній кількості разів, можна переходити до оцінки більших конфігурацій системи та взаємодії компонентів за допомогою інтеграційного тестування. Інтеграційне тестування виконується поетапно, коли компоненти поступово інтегруються, а потім тестуються як група. В ІАС інтеграційне тестування виконується під час віртуального введення в експлуатацію, де цифровий двійник (який по суті є віртуальним представленням відповідного фізичного об'єкта) забезпечує спільну основу для тестування зв'язку, контролерів, симуляторів і драйверів для всіх ресурсів. Після незалежної перевірки таких блоків їх взаємодія та сукупна функціональність перевіряються разом шляхом інтеграції контролера і моделі поведінки та тестування конкретних сценаріїв.

Нарешті, повна модель включається в тест, який містить завантажену поточну модель та автоматичні переходи. Такі інтеграційні тести потенційно виявлять, чи щось поводиться неправильно в конкретному випадку, визначеному користувачем.

Тестування на основі властивостей. На відміну від модульного тестування, яке перевіряє систему на окремі тестові випадки, та інтеграційного тестування, яке перевіряє взаємодію одиниць в окремих випадках сценарію, тестування на основі властивостей [16] перевіряє відповідності властивостей нефункціональним вимогам. Коли знайдено вхід, який порушує властивість, можна використати такі методи, як скорочення, щоб автоматично зменшити його до мінімального контрприкладу. На практиці такий контрприклад є дуже корисним, оскільки він прямо вказує на причину та яким чином властивість порушено, надаючи розробникам точну інформацію про те, як змінити програму.

Природа такого тестування зазвичай є випадковою [17] і без знання попередніх невдалих тестових прикладів або початкових значень таке тестування може пропустити конкретні невдалі крайні випадки. Крім того, тестування спостерігає лише за кінцевим набором виконань кінцевої програми, оскільки зазвичай дуже дорого або навіть неможливо перевірити код для всіх можливих вхідних значень. Таким чином, тестування на основі властивостей найкраще використовувати як доповнення до традиційного модульного тестування.

Щоб перевірити властивості ІАС, варто почати з визначення певних властивостей, які мають зберігатися під час виконання таких тестів, наприклад:

1. Якщо мета полягає в тому, щоб об'єкт сканувався, то врешті об'єкт має бути відскановано.

2. Якщо сканування тричі поспіль не вдається, сканування слід перервати, інакше сканування об'єкта відбувається повторно.

3. Якщо загалом сканування не вдається п'ять разів, сканування слід припинити, інакше об'єкт сканувати повторно.

Тестування покриття. Вимірювання структурної охоплюваності передбачає кількісну оцінку адекватності процесу тестування та надання розуміння повноти набору тестів. Цього можна досягти, визначивши набір показників покриття, які вказують на ступінь використання системи під час тестування. Наприклад, під час процесу тестування системи на заданий набір вимог можна відслідковувати та кількісно оцінювати частоту та ступінь застосування моделі поведінки. Ця оцінка може запропонувати цінну інформацію про те, як оптимізувати початковий набір тестів і покращити загальну охоплюваність. Використовуючи цей відгук для вдосконалення тестування, можна гарантувати, що система всебічно перевірена на відповідність необхідним стандартам.

Відомий критерій модифікованого покриття умов/рішень [18] не варто безпосередньо застосувати для оцінки охоплення моделей поведінки. Тому ми зосереджуємося на програмі виконання операцій і складаємо огляд різних станів виконання операцій (рис. 1):

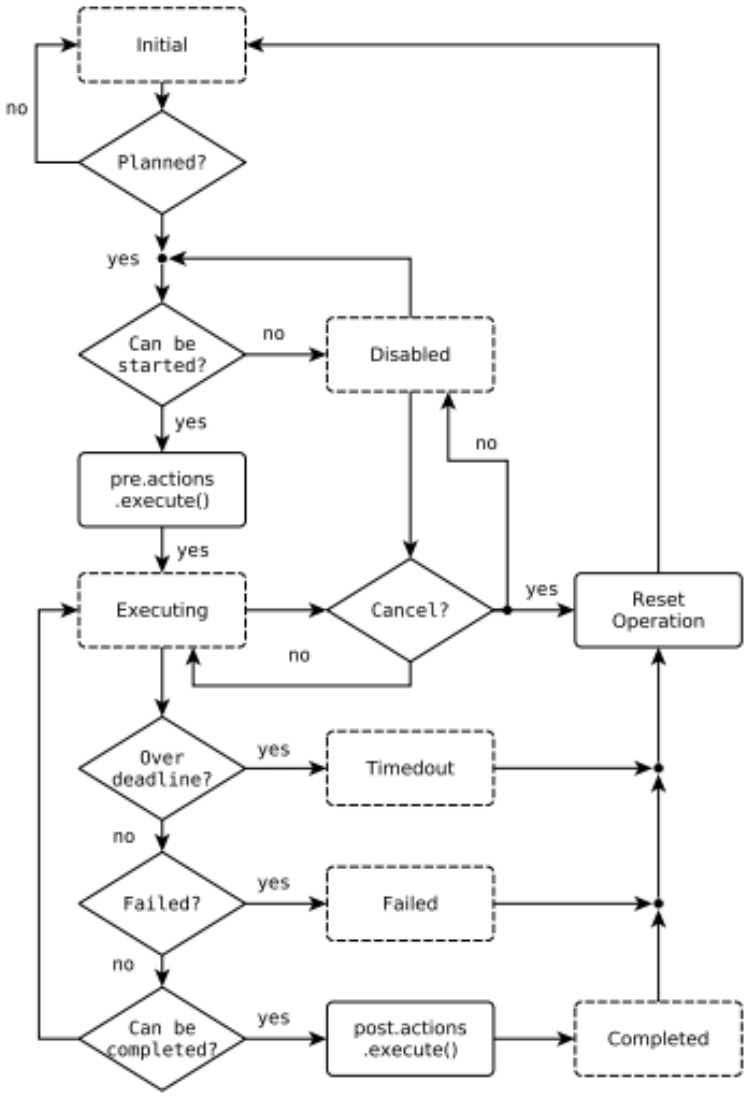


Рис. 1. Операції та стани під час виконання програми

- *Initial: операція не є наступною згідно плану.*
- *Disabled: операція є наступною в плані для виконання, але її захист попередніх умов ще не ввімкнено.*
- *Executing: захист попередніх умов увімкнено, дії передумови виконуються.*
- *Timedout: операція перебувала в стані виконання більше часу, ніж дозволяє її кінцевий термін*
- *Failed: операція не виконана через помилку.*
- *Completed: захист постумови ввімкнено, і дії післяумови виконуються. Операція успішно завершена.*

Таким чином, можна визначати критерії структурної здатності покриття IAC для набору тестів наступним чином. Кожна запланована операція в моделі поведінки принаймні один раз перебувала у стані Disabled, Executing, Timedout, Failed та Completed. Кожна операція була включена в план принаймні один раз. Кожен автоматичний перехід виконано принаймні один раз.

Виконання цих критеріїв для набору вимог гарантує, що модель поведінки була здійснена та може використовуватися як перевірка. Як і у випадку з критерієм модифікованого покриття умов/рішень, відповідність вимогам цього критерію не гарантує відсутності дефектів. Однак невиконання цього критерію вказує на те, що певні частини моделі не були достатньо використані, висвітлюючи потенційні проблемні області.

Покращення здатності до покриття є ітеративним процесом. Якщо критерії не відповідають, необхідно повернутися до моделі та визначити пропущені частини, а потім створити спеціальні тестові випадки для їх покриття. Крім того, тестувальнику можна дозволити впливати на вузли моделювання, щоб швидше охопити пропущені аспекти. Після додаткових тестів можна повторно

оцінити здатність до покриття та повторити процес, доки не буде досягнуто бажаного рівня покриття.

Покращення покриття є ітеративним процесом. Коли критерії не відповідають, необхідно повернутися до моделі та визначити пропущені частини, а потім створити спеціальні тестові випадки для їх покриття. Крім того, тестувальнику можна дозволити впливати на вузли симуляції, щоб швидше охопити пропущені аспекти. Після додаткових тестів можна повторно оцінити рівень покриття та повторити процес, доки бажаного рівня покриття не буде досягнуто.

Висновки. Результати дослідження підтверджують важливість інтеграції формальних методів і тестування для забезпечення надійності та функціональності ІАС. Формальні методи дозволяють виявити критичні помилки на етапі моделювання, тоді як тестування, зокрема модульне та інтеграційне, забезпечує перевірку коректності роботи системи в реальних умовах. Оцінка покриття допоможе оптимізувати тестові ресурси та підвищити ефективність тестування. Застосування запропонованих підходів сприяє мінімізації ризиків аварій та забезпечує безперебійність функціонування ІАС.

Список літератури:

1.Cai, Xia & Lyu, Michael. The effect of code coverage on fault detection under different testing profiles. *ACM Sigsoft Software Engineering Notes*. 2005. № 30(4). P.1-7. URL: https://doi.org/10.1145/1082983.1083288 (дата звернення: 28.01.2025).

2. Hametner R., Kormann B., Vogel-Heuser B., Winkler D., Zoitl A. Test case generation approach for industrial automation systems. *5th International Conference on Automation, Robotics and Applications*. 2011. P. 57–62.

3. Winkler D., Hametner R., Östreicher T., Biffl S. A framework for automated testing of automation systems. *IEEE 15th Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2010)*. 2010. P. 1–4.

4. Clarke E. M., Emerson E. A., Sifakis J. Model checking: Algorithmic verification and debugging. *Communications of the ACM*. 2000. № 52 (11). P.74–84, 200.

5. Ramadge P. J. Wonham W. M. Supervisory control of a class of discrete event processes. *SIAM J. Control Optim*. 1987. vol. 25. no. 1. P. 206–230.

6. Orso A., Rothermel G. Software testing: A research travelogue (2000–2014). *Future of Software Engineering Proceedings*. 2014. P. 117–132.

7. Buzhinsky I., Pang C., Vyatkin V. Formal modeling of testing software for cyber-physical automation systems. *5 IEEE Trustcom/BigDataSE/ISPA, IEEE*. 2015. Vol. 3. P. 301–305.

8. Zander J., Schieferdecker I., Mosterman P. J. Model-based testing for embedded systems. CRC press, 2017. 122 p.

9. Rival X., Yi K. Introduction to static analysis: an abstract interpretation perspective. Mit Press, 2020. 320 p.

10. Sistla A. Safety, liveness and fairness in temporal logic. *Formal Aspects of Computing*. 1999. vol. 6. URL: https://surl.li/xdvnkm (дата звернення: 28.01.2025).

11. Dahl M., Bengtsson K., Fabian M., Falkman P. Guard extraction for modeling and control of a collaborative assembly station. *IFACPapers On Line*. 2020.Vol. 53. No. 4. P. 223–228.

12. Grumberg O., Clarke E., Peled D. Model checking. MIT Press, 1999. 314 p.

13. Pnueli A. The temporal logic of programs. *18th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*. 1977. P. 46–57.

14. Biere A., Cimatti A., Clarke E., Zhu Y. Symbolic model checking without bdds. *International conference on tools and algorithms for the construction and analysis of systems*. 1999. P. 193–207.

15. Runeson P. A survey of unit testing practices. *IEEE software*. 2006. vol. 23. no. 4. P. 22–29.

16. Fink G., Bishop M. Property-based testing: A new approach to testing for assurance. *SIGSOFT Softw. Eng. Notes.* 1997. vol. 22. no. 4. P. 74–80.

17. Claessen K., Hughes J. Quickcheck: A lightweight tool for random testing of haskell programs. *SIGPLAN Not*. 2000. Vol. 35. No. 9. P. 268–279.

18. Hayhurst K., Veerhusen D. A practical approach to modified condition/decision coverage. *Digital Avionics Systems Conference (Cat. No.01CH37219)*: 20th DASC. 2001. Vol. 1. 1B2/1–1B2/10.

Kornuta V.A., Merenko B.I., Katamay Yu.V., Dmytriv I.Ya., Ivantsiv N.T., Dyachuk A.V. METHODS OF PROTECTING INTELLIGENT AUTOMATED SYSTEMS FROM ERRORS IN THE OIL AND GAS INDUSTRY

The article discusses modern approaches to reducing risks and errors in the operation of intelligent automated systems (IAS) used in the oil and gas industry. The main focus is on the use of testing, verification and code coverage analysis as effective tools to ensure the reliability and compliance of the system with industry safety standards. Verification allows identifying errors at the software design and development stage,

ensuring that the system's algorithms, code and logic meet the design requirements. Formal methods, such as model checking and control rule synthesis, are used to confirm the correctness of the system and optimise the development process. Testing of all possible scenarios of system operation is ensured, allowing identification of non-functional or undocumented parts of the code. The effectiveness of unit and integration testing is also investigated, which allows to ensure uninterrupted operation of the system in extreme conditions and prevent emergencies. Attention is paid to property-based testing, which addresses compliance with non-functional requirements and identifies critical checks that may go unnoticed by other types of testing. The paper also describes approaches to modelling the behaviour of automated systems using formal languages and modeling techniques that allow for checking defects at the planning stages. The advantages of using limited model checking, which simplifies the search for counterexamples, are considered. The proposed recommendations are aimed at optimising test scenarios, increasing the structural closure of the system and using tools to automate the verification process. Such approaches help to reduce development and testing costs and ensure that IAS complies with the modern standard.

Key words: *oil and gas industry, intelligent automated systems, testing, verification, formal methods.*

УДК 004.415.2
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/19

Коротенко Г.М.
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Соколова Н.О.
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Ширін А.Л.
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

НАВЧАННЯ В ЗАКЛАДАХ ЗАГАЛЬНОЇ СЕРЕДНЬОЇ ОСВІТИ ОСНОВ ПРОГРАМУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МОВИ PYTHON

Поточним часом, вектор спрямованості щодо розвитку у учнів уявлень застосування навичок алгоритмічного мислення все більше ускладнюється у зв'язку з різкою зміною прикладних завдань, які повинні вирішувати сучасні спеціалісти у ІТ-сфері. Окрім суто прикладних задач, пов'язаних з комп'ютерними або обчислювальними експериментами з цифровими двійниками та іншими цифровими моделями, надзвичайно зростає обсяг різноманітних даних різної природи. Такі дані в першу чергу стосуються наскрізьних технологій і, у тому числі, завдань, пов'язаних з використанням моделей і засобів штучного інтелекту. Зрозуміло, що надання відповідних ІТ-компетентностей майбутнім студентаи і фахівцям цифрових технологій є нагальною місією сучасної школи. Але тут треба мати на увазі, що не всі учні в майбутньому будуть професійними програмістами. Таким чином, виникає комплекс пов'язаних поміж собою завдань, щодо формування теоретичних, практичних, технологічних, психологічних та деяких інших комплексних процедур, спрямованих на вирішення виникаючих проблем. На тлі збільшення обсягів проблем, що стрімко ускладнюються, також вагомим елементом поліпшення методичних підходів щодо підвищення рівня навчання і учнів, і педагогічних працівників, які ведуть навчальний процес, є обрання відповідної мови програмування та її організаційного оточення.

В роботі доведено, що поступове, підкриплене відповідними теоретичними і практичними (у тому числі, комп'ютерними) засобами засвоєння основ програмування не тільки можливе, а й необхдне. Згідно аналізу сучасних підручників з інформатики для сердньої школи можна резюмувати, що програмування як таке практично відсутнє у практичних завданнях. Таким чином, вчителі повинні самі обирати: мову програмування, методи викладання, засоби підтримки навчального процесу, відповідний програмний засіб та його версію.

У статті наведено приклади можливих напрямів застосування найбільш поширеної та простої у вивченні мультипарадигмальної, високорівневої мови програмування Python загального призначення з динамічною строгою типізацією та автоматичним управлінням пам'яттю, орієнтованою на підвищення продуктивності розробника, спрощення читання коду та поліпшення його якості, а також на забезпечення переносимості написаних з її застосуванням програм.

Ключові слова: *програмний код, мови програмування, алгоритми, навчання, мова програмування Python, структурне програмування.*

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток елементної бази та програмного забезпечення комп'ютингу створюють безліч нових технологічних напрямків застосування комп'ютерних засобів. Так в даний час існують і розвиваються інформаційні, цифрові та наскрізні технології обробки різноманітних даних, а також безліч різнотипних платформ, у тому числі цифрових, для їх підтримки. Це, безумовно, викликає необхідність навчання в закладах загальної середньої освіти основ програмування. Повна загальна середня освіта має три рівні освіти: початкова освіта тривалістю чотири роки; базова середня освіта тривалістю п'ять років; профільна середня освіта тривалістю два роки. На етапі початкової освіти добре себе зарекомендував язик програмування Scratch. Це середовище та інтерпретована динамічна візуальна мова програмування, у якій код створюється шляхом маніпулювання графічними блоками. Середовище орієнтовано, в першу чергу, на дітей та початкове знайомство з основними концепціями та ідеями програмування. Завдяки динамічності, вона дає змогу змінювати код навіть під час виконання. Мова має за

мету навчити дітей поняттю програмування і дає можливості створювати ігри, анімації чи музику. Користувачі можуть створювати онлайн-проекти, ними можна обмінюватися всередині міжнародної спільноти, яка існує в мережі Інтернет. Середовище програмування можна безкоштовно завантажити і вільно використовувати у шкільній чи позашкільній освіті [1].

На етапах базової та профільної середньої освіти потрібно вивчати вже одну з мов програмування високого рівня, тобто C++, C#, Java, JavaScript, Python та ін. [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Базовий нормативний документ для організації освітнього процесу Нової української школи (НУШ) (Держстандарт) визначає 9 освітніх галузей, які мають розвивати природні здібності, інтереси та обдарування учнів, формувати компетентності, необхідні для їх соціалізації та самореалізації, виховувати громадянина з відповідальною життєвою позицією [3].

У Держстандарті для кожної освітньої галузі визначено мету, компетентнісний потенціал (перелік умінь та ставлень й базові знання), обов'язкові результати навчання учнів та орієнтири для їхнього оцінювання.

Метою інформатичної освітньої галузі є «розвиток особистості учня, здатного використовувати цифрові інструменти і технології для розв'язання проблем, розвитку, творчого самовираження, забезпечення власного і суспільного добробуту, критично мислити, безпечно та відповідально діяти в інформаційному суспільстві» (стаття 18 ДСБСО [3]).

Інформатична освітня галузь стала однією з лідерів серед навчальних дисциплін в школі. За обсягом годин вона поступається лише математиці та українській мові. І це є нагальною вимогою часу. Її розробники формулюють вимоги до обов'язкових результатів навчання учнів у вигляді чотирьох груп умінь, друга з яких це – створення інформаційних продуктів і програм для ефективного розв'язання задач/проблем, творчого самовираження індивідуально та у співпраці з іншими особами за допомогою цифрових пристроїв чи без них, а саме: «Розробка та реалізація алгоритмів» (п. 2.1) та «Створення та налагодження програмних проєктів» (п. 2.2) (додаток 14 до ДСБСО [3]). Є правильним, що всередині інформатики збільшено кількість годин на змістову лінію алгоритмізації та програмування [4].

Держстандартом передбачено, що школярі мають навчитися розробляти та коригувати алгоритми для розв'язання задач. Орієнтирами для оцінювання результатів навчання є сформованість таких знань, умінь та навичок школярів [3]:

- складання лінійних, розгалужених і циклічних алгоритмів для розв'язання задач;
- представлення алгоритму одним чи кількома способами;
- поєднання базових структур для розв'язання задачі;
- пропонування та використання способів перевірки коректності алгоритму;
- пошук, пояснення та пропонування варіантів виправлення простих логічних помилок;
- формулювання висновку щодо відповідності алгоритму для розв'язання задачі.

Заклад освіти з урахуванням особливостей технічного забезпечення, кадрового складу, контингенту, освітніх пріоритетів учнівства тощо може обрати різні варіанти викладання курсу інформатики, створюючи власну навчальну програму на основі модельної [5]. У модельній навчальній програмі авторські колективи пропонують послідовність вивчення тем, зміст і види навчальної діяльності, які є орієнтовними. Тому з модельної навчальної програми вчитель / учителька до кожної теми навчальної програми добирає з-поміж запропонованих або ж додає ті елементи змісту й способи діяльності, що в умовах певного навчального закладу й класу є найоптимальнішими для кожного учня / учениці та для учнівської спільноти класу.

Заклад освіти обирає свій варіант викладання курсу інформатики, враховуючи свої технічні можливості, кадровий склад, контингент учнів та освітні пріоритети [5]. На основі модельної навчальної програми, розробленою авторським колективом досвідчених та визнаних фахівців-методистів, яка пропонує послідовність вивчення тем, зміст та види навчальної діяльності (рис. 1), заклад освіти створює власну навчальну програму [6]. Вчитель може обрати запропоновані елементи з модельної програми або додати власні, що найкраще підходять для конкретного навчального закладу та класу, визначаючи послідовність та орієнтовний час вивчення тем для певного класу.

У роботах [8, 9] вказується на те, що у середній школі потрібно вивчати мову програмуваня Java. Окрім того у роботі [4] пропонується наступна схема навчання програмуванню:

1. Scratch-програмування (2–4 класи);
2. Основи структурного (алгоритмічного) програмування (5 клас);
3. Ознайомлення з об'єктним програмуванням (6 клас);

АВТОРИ: Бондаренко О. О., Ластовецький В. В., Пилипчук О. П., Шестопалов Є. А.	АВТОРИ: Морзе Н. В., Барна О. В.	АВТОРИ: Пасічник О. В., Козак Л. З., Ворожбит А. В.
Служби інтернету	Інформація, повідомлення, дані, знання. Інформаційні процеси	Персональний цифровий простір
Комп'ютерна анімація	Електронні сервіси. Електронна пошта	Цифрове середовище для навчання та роботи
Моделі та моделювання	Векторна графіка	Візуальний контент
Опрацювання табличних даних	Текстовий процесор	Тексти та публікації
Алгоритми та програми	Програми для роботи з поліграфічною продукцією	Медіа-дизайн
Практикум з використання інформаційних технологій	Комп'ютерна анімація	Графічне програмування

АВТОРИ: Завадський І. О., Коршунова О. В., Твердохліб І. А.	АВТОРИ: Громко Г.Ю., Шевчук П.Г, Ковбаса В.М.	АВТОРИ: Ривкінд Й. Я., Лисенко Т. І., Чернікова Л. А., Шакотько В. В.
Цифрові інструменти для навчання	Інформаційні процеси та системи	Пошук в Інтернеті. Електронна пошта. Хмарні сервіси
Текстовий процесор. Основи верстки	Комунікаційні технології та мережі	Алгоритми та програми
Моделювання в електронних таблицях	Організація власного інформаційного середовища	Комп'ютерні презентації
Алгоритми та програми	Комп'ютерна графіка та анімація	Об'єкти мультимедіа
	Опрацювання табличних даних	Комп'ютерна анімація
	Основи програмування	Практикум з використання інформаційних технологій
	Захист та взаємодія в цифровому просторі	

Рис. 1. Порівняння модельних програм інформатичної освітньої галузі для 7-9 класів НУШ [7]

4. Ознайомлення із програмуванням на Android (7 клас);

5. Основи об'єктного програмування (8 клас);

6. Основи функціонального програмування (9 клас).

На погляд авторів, такий підхід може тільки злякати більшість школярів, оскільки, згідно дослідженню програми IREX «Мріємо та діємо», приблизно 52% підлітків віком 13–15 років уже вирішили, ким мріють стати в дорослому віці: зокрема, хочуть стати програмістами (22%), лікарями (13%) і дизайнерами (9%) [9]. З іншого боку, включення у розгляд та намагання на початкових кроках охопити весь комплекс широкого спектра суто «програмістських» понять, включаючи і такі абстракції високого рівня як класи, може суттєво ускладнити освоєння самих принципів і основ програмування, не тільки учням, але й викладачам шкіл. Тому, на наш погляд, треба зосередитись на таких коцептуальних засадах:

1. Кодування допомагає дітям розвивати впевненість.

2. Кодування надихає дітей дивитися на світ інакше (і логічно).

3. Кодування дозволяє дітям досліджувати свою творчість.

4. Кодування покращує навички дітей розповідати історії.

5. Кодування може сприяти покращенню кар'єрних можливостей у міру дорослішання [10].

Постановка завдання. Метою статті є обґрунтування вибору мови Python як засобу навчання учнів основам програмування та методики їх освоєння.

Виклад основного матеріалу. Сьогодні жодна галузь людського суспільства, чи медицина, чи освіта, чи економіка, чи транспортний напрямок не обходиться без комп'ютерних технологій. Тому дуже важливо починати вивчення програмування з мови яка знаходиться в тренді галузі комп'ютингу. Згідно рейтингу PYPL (PopularitY of Programming Language – Популярність мов програмування) [11] перші три позиції займають мови програмування Python, Java та JavaScript (рис. 2).

Якщо казати про мову JavaScript, то це мова програмування та основна технологія Інтернету, яку можна поставити у один ряз з мовами HTML

Worldwide, Sept 2024 :

Rank	Change	Language	Share	1-year trend
1		Python	29.66 %	+1.6 %
2		Java	15.64 %	-0.2 %
3		JavaScript	8.3 %	-1.0 %

Рис. 2. Найпопулярніші мови програмування серед IT-спеціалістів у 2024 згідно рейтингу PYPL

і CSS. 99% веб-сайтів використовують JavaScript на стороні клієнта для формування функцій поведінки веб-сторінки відповідно до зовнішніх запитів [12].

Щоб порівняти Python та Java, що у 2024 році стабільно займають перші позиції практично усіх відомих рейтингів, зробимо наступне. Звернемось до сайту “Hello World” In 30 Different Languages («Hello World» 30 різними мовами) [13].

Згідно матеріалів цього сайту, щоб вивести рядок тексту «Hello World» мовою Python нам буде потрібен тільки один рядок:

```
print("Hello World")
```

А от, щоб вивести один такий текстовий рядок мовою Java, вже потрібно застосувати шість рядків операторів цієї мови:

```
import java.io.*;

class GFG {
    public static void main (String[] args) {
       System.out.println("Hello World");
    }
}
```

Річ у тому, що Java – це високорівнева об’єктно-орієнтована мова програмування на основі класів [14]. Зазвичай, об'єктно орієнтоване програмування пов'язане зі створенням «об'єктів», які є екземплярами класів (і це, на перших кроках засвоєння основ програмування для початківців – учнів та вчителів (педагогів), може бути досить неочевидним). Згідно основам об’єктно-орієнтованого програмування (ООП) створені програмістом об'єкти мають атрибути (дані) та методи (функції), які працюють із даними, що обробляються. Ключові концепції ООП включають інкапсуляцію (об'єднання даних та методів), успадкування (створення нових класів з існуючих) та поліморфізм (використання методів різними способами для різних об'єктів) [15]. В роботі [16] вказується, що розуміння об'єктно-орієнтованих концепцій завжди є складним завданням для студентів (!). Викладачам також важко викладати ці концепції. Тому, на погляд авторів, починати вивчення програмування з включення у розгляд достатньо складних компонентів парадигми ООП не зовсім доцільно.

Процедурне програмування – це метод написання програмного забезпечення (ПЗ), який заснований на послідовності інструкцій або кроків, які слідують один за одним для виконання завдання. Ви можете думати про це як про рецепт, у якому кожен крок потрібно виконувати в певному порядку, щоб досягти бажаного результату. Ця парадигма зосереджена навколо написання функцій або процедур, які виконують операції з даними. Процедурний код, як правило, легший для розуміння багатьма, оскільки він простий і лінійний [15]. Мова Python підтримує декілька парадигм програмування, включаючи процедурне, об’єктно-орієнтоване та функціональне програмування [17]. Це дозволяє починати вивчення основ програмування з процедурного програмування як найбільш корисного для освоєння основних принципів алгоритмізації і кодування.

Ще однією з важливих рис мови Python є так зване «Правило поза грою» [18]. Це правило описує синтаксис мови комп’ютерного програмування, у котрій межі блоку коду визначаються за допомогою відступу на відміну від Java, у якій блок визначається за допомогою фігурних дужок «{}». При наявності декількох вкладених блоків відстежування дужок складає певну проблему, як це можна побачити на вищенаведеному прикладі виведення простого текстового рядка мовою Java.

Якщо казати про галузі застосування мови Python, то для розробників тут відкривається дуже широкий простір у сферах застосування сучасних цифрових технологій [19]:

1. ШІ (штучний інтелект) і машинне навчання;
2. Аналітика даних;
3. Візуалізація даних;
4. Програмування додатків;
5. Веб-розробка;
6. Розробка ігор;
7. Розробка мов програмування;
8. Фінанси;
9. SEO (search engine optimisation – пошукова оптимізація);
10. Дизайн.

Тут треба додати, що Python має більш ніж 137 000 бібліотек. Ці бібліотеки надають неосяжні можливості повторного використання програмного коду, що, з одного боку, суттєво прискорює створення програм, а з іншого – дозволяє швидко долучитися початківцям до вирішення складних практичних задач. Серед досить широкого кола цих програмних засобів, що розповсюджуються з відкритим кодом, найбільш поширеними є наступні десять [20].

1. Pandas (обробка та аналіз широкого кола типів даних).
2. NumPy (виконання наукових бчислень з великими матрицями та багатовимірними даними).
3. Keras (експериментування з усіма типами глибоких нейронних мереж).
4. TensorFlow (велика кількість чисельних методів для роботи у алгоритмах глибокого навчання та машинного навчання).
5. Scikit Learn (наявність засобів для виконання великої кількості алгоритмів з контрольованим або неконтрольованим навчанням).
6. Eli5 (засоби для уточнення прогнозів при дослідженні процесів машинного навчання).
7. SciPy (засоби для наукових досліджень, обробки даних і високопродуктивних обчислень).
8. PyTorch (комплекс методів обробки природньої мови з використанням графічних процесорів).
9. LightGBM (пакет машинного навчання для розробки нових алгоритмів шляхом перевизначення простих моделей, таких як дерева рішень).
10. Theano (набір алгоритмів, що дозволяє визначати, оптимізувати та оцінювати математичні вирази для величезних алгоритмів нейронних мереж глибокого навчання (Deep Learning)).

Слід також додати, що багато з вище зазначених пакетів пов'язані поміж собою.

Іншим важливим фактором зниження порогу складності засвоєння даної мови може бути її об'єднання з одним з найпоширеніших додатків обчислювального напряму – Microsoft Excel [21]. Використання цього додатку у практичних заняттях учнів є достатньо поширеним і тому, вивчення мови Python разом з ним, може суттєво розширити можливості включення і дітей, і вчителів у сферу поглиблення знань програмування.

Таким чином, спираючись на процедурну парадигму Python, при вивченні мови пропонується використовувати єдиний підхід з упором на концептуальні поняття. На думку авторів, основну увагу необхідно приділяти поняття вбудованих (базових) та агрегатних типів даних [22].

Наступним пунктом у цьому підході є наголос на структурне програмування, засноване на застосуванні структурної теореми Бома та Джакопіні [23]. За Бомом та Джакопіні для побудови логічної структури програми потрібно три основні складові блоки:

– функціональний блок *СЛІДУВАННЯ*, що включає лінійну послідовність операторів (у тому числі і керуючих) (рис. 3);

– умовний оператор (конструкція прийняття двійкового чи дихотомічного рішення – *РОЗВИЛКА*) (рис. 4);

– конструкція узагальненого циклу *ЦИКЛ* (з параметром, з передумовою, з постумовою тощо) (рис. 5).

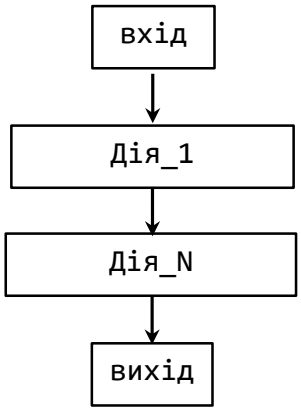


Рис. 3. Лінійна послідовність операторів (*СЛІДУВАННЯ*)

Тоді для будь-якої програми, складеної із зазначених конструкцій, завжди може бути отримано ще й доказ її правильності.

При цьому важливо те, що всі розглянуті блоки мають один вхід і один вихід. Користуючись ними, можна конструювати програми будь-якої складності.

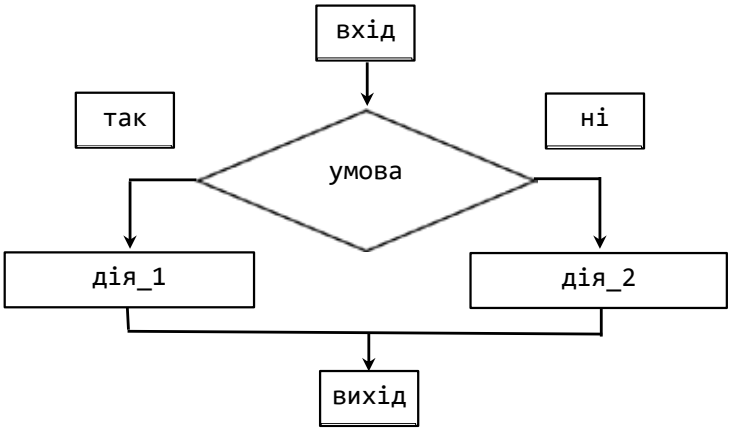


Рис. 4. Керуючий умовний оператор (*РОЗВИЛКА*)

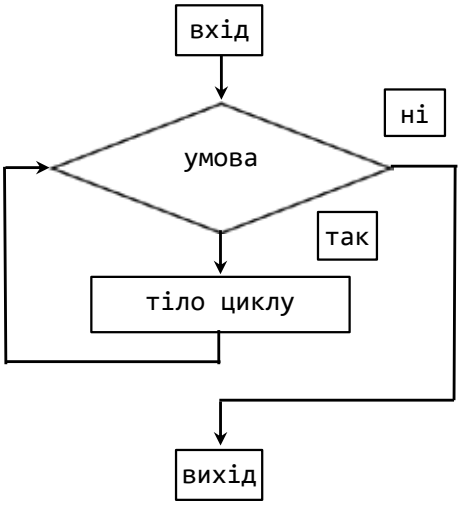


Рис. 5. Керуючий оператор циклу (*ЦИКЛ*)

Крім того, підхід до їхнього вивчення має бути єдиним. Надалі пропонується називати їх керуючими операторами, оскільки вони керують ходом виконання програми.

Так, у Python є три типи умовних керуючих операторів. Керуючий оператор if виконує (вибирає) дію (або групу дій), якщо умова істинна, або пропускає її (їх), якщо умова хибна. Керуючі оператори if…else та if…elif виконують дію (або групу дій), якщо умова є істинною, і виконують іншу дію (або групу дій), якщо умова хибна. Керуючі оператори if…elif та if…elif…else можуть перевіряти декілька умов і відповідають оператору switch у мові C++.

Керуючі оператори циклу for і while не виконують дію (чи групу дій), якщо умова продовження циклу хибна, або потрібну кількість дій, якщо умова істинна.

Таким чином, учень повинен чітко уявляти собі, що програма проектується і конструюється з використанням лінійної послідовності операторів *СЛІДУВАННЯ* і керуючих операторів *РОЗВИЛКА* і *ЦИКЛ*, які мають один вхід і один вихід.

При створенні програм слід використовувати принципи спадної розробки (проектування) програми методом покрокової деталізації. Спадне проектування включає розбиття великої задачі на менші підзадачі, які можуть розглядатися окремо і, у свою чергу, розбиватися на менші підзадачі до з'ясування всіх особливостей основної задачі, що розв'язується.

Основну ідею спадного проектування методом покрокової деталізації добре пояснив Edward Yourdon [24]. Розглянемо її на прикладі будь-якої (довільної) програми, з умовною назвою GLOP. Спочатку спробуємо припустити, що у нас є комп'ютер, який може відразу виконати цю програму. Тоді ми можемо просто написати команду:

GLOP

і все готове! На жаль, поки немає таких комп'ютерів, які б за Вашим бажанням виконували будь-які дії. Тому нам доведеться розбивати завдання на дрібніші елементи, тобто команди які б розумів комп'ютер. Як правило, виконання програми передбачає введення необхідних даних, їх обробку та виведення отриманих результатів. І тут Edward Yourdon упускає важливий момент. Адже перед проектуванням програми потрібно спроектувати для неї структури даних! Тому необхідно переписати нашу програму GLOP у наступному вигляді

Спроектувати структури даних GLOP!

Ввести дані GLOP

Виконати обчислення GLOP

Вивести результати GLOP

При цьому кожен рядок нашої програми ми можемо знову розбивати на простіші операції, доки вони не зможуть бути представленими в операторах мови програмування, що є в нашому розпорядженні (в даному випадку це Python).

Практика викладання показала, що використання блок-схем [25] і псевдокоду [26] дають мало користі оскільки відірвані від програм, тому найкращі результати дають коментарі у програмах. Як показав досвід викладання, процес коментування програми змушує учнів під час її проектування та кодуванні ретельніше продумувати алгоритм та його реалізацію, а згодом – краще розуміти саму програму.

Як приклад, розглянемо програму мовою Python до задачі з роботи [8] з рішення квадратного рівняння *ax^2+bx+c=0* з дійсними коефіцієнтами *a (a≠0), b, c*. Умовимося символом «➲» позначати текст скрипта, який виконується у вікні редактора інтегрованого середовища розробки Python, а символом «➲» – результат роботи цього скрипта у вікні виконання. Тоді текст програми та результати її виконання будуть виглядати, як показано на рис. 6.

Як видно з прикладу, коментарі практично відповідають алгоритму, що унеможливлює неправильне складання коду програми. Тому на чільне місце необхідно ставити освоєння учнями підходів і навичок конструювання програмних одиниць на основі читання, вивчення та розуміння чужого коду – найважливішого компонента командної розробки ПЗ. Обов'язковим є виділення кожного оператора, що управляє, відступами спереду і ззаду, а також наявність коментаря про його призначення безпосередньо перед ним.

Структура та формат коментарів у пропонованих для навчання учнів комп'ютерних програ-

➲
```
# Програма рішення квадратного рівняння
# Імпортуємо модуль math
import math as m  # перейменовуємо модуль в m

# Друкуємо інформацію про програму
print("Програма розв’язує квадратне рівняння виду")
print("a*x^2+b*x+c=0 \n")

# Вводимо коефіцієнти рівняння
a = float(input('Введіть значення a = '))
b = float(input('Введіть значення b = '))
c = float(input('Введіть значення c = '))

D = b * b - 4 * a * c # обчислюємо дискримінант D=b^2-4ac

# Знаходимо корені рівняння згідно значення D
if (D >= 0):  # якщо D більше або рівне 0
    x1 = (-b - m.sqrt(D)) / (2 * a) # обчислюємо корінь x1
    x2 = (-b + m.sqrt(D)) / (2 * a) # обчислюємо корінь x2
    print("Корені рівняння: x1 = ", x1,
          " x2 = ", x2) # виводимо результат
elif (D == 0):  # якщо D рівне 0
    x = -b / (2 * a) # обчислюємо корінь x
    print("Рівняння має єдиний корінь: x = ", x) # виводимо
результат
else:  # у інших випадках
    print("Рівняння не має дійсних коренів!") # виводимо
попередження
```

➲
```
Програма розв’язує квадратне рівняння виду
a*x^2+b*x+c=0

Введіть значення a = 1
Введіть значення b = -8
Введіть значення c = 15
Корені рівняння: x1 =  3.0  x2 =  5.0
```

Рис. 6. Програма для розв’язування квадратного рівняння та результат її роботи

мах мають бути засновані на відомому стандарті PEP 8 [27], котрий роз'яснює основні вимоги до оформлення програми мовою Python:

1. Використовуйте 4 пробіли для відступів замість табуляції.

2. Обмежте довжину рядка 79 символами.

3. Розділяйте функції та класи двома порожніми рядками.

4. Використовуйте порожній рядок навколо операторів привласнення та після блоків функцій та класів.

5. Робіть зрозумілі імена змінних та функцій і таке інше.

Також, на наш погляд було б доцільним для учнів програмувати задачі з математики і фізики для кращого поєднання цих знань з інформатикою. Тим більш, що у навчальній програми з математики (рівень стандарту) для 10–11 класів загальноосвітніх шкіл [28] та фізики [29] однією з ключових є інформаційно-цифрова компетентність!

Висновки. Розглянувши та провівши дослідження сучасних напрямів використання мови Python автори вважають її одною з перспективніших засобів не тільки навчання основам алгоритмізації та програмування, але й ознайомлення учнів з найсучаснішими прикладними напрямами розвитку цифрових технологічних трендів:

– простота мови є одним з головних чинників вважати її однією з доступніших для проникнення до її основ та розширення кола користувачів, включаючи, як учнів різних вікових категорій, так і вчителів різних предметів (математики, фізики, хімії, інформатики тощо);

– стрімкий розвиток поточним часом і широке розповсюдження застосування технологій штучного інтелекту практично в усіх можливих сферах поточного професійного розвитку людини: медицина, бізнес, інженерія, програмування і т.і., розкриває нові напрями застосування мови Python завдяки її спеціалізованим можливостям;

– велика кількість бібліотек (більше 137 000), з якими постачається мова Python, надає багато додаткових можливостей з точки зору як використання, так і вивчення цієї мови;

– велика кількість безкоштовних освітніх курсів, а також масових відкритих онлайн-курсів (MOOC, Massive Open Online Courses) з вивчення мови Python (Python MOOC and Free Online Courses), що надає широких можливостей розширення та поглиблення знань програмування на цій мові не тільки учням, а й вчителям;

– додатковою важливою можливістю при використанні мови є її мобільність, завдяки якої учні можуть створювати програмний код у мобільних пристроях – смартфонах, які є постійними супутниками сучасної молоді, використовуючи безкоштовні онлайн компілятори;

– сучасним важелем зрушення ситуації навколо вивчення мови Python може надати нещодавнє об’єднання можливостей даної мови з популярним і достатньо розповсюдженим компонентом Microsoft Office – Microsoft Excel, який достатньо широко використовується у навчальному процесі завдяки своєї простоти;

– спираючись на процедурну парадигму Python, при вивченні мови пропонується використовувати єдиний підхід з упором на концептуальні поняття, тобто на структурне програмування й принципи спадної розробки (проектування) програми методом покрокової деталізації;

– практика викладання показала, що використання блок-схем і псевдокоду дають мало користі оскільки відірвані від програм, тому найкращі результати дають коментарі у програмах, оскільки процес коментування програми змушує учнів під час її проектування та кодуванні ретельніше продумувати алгоритм та його реалізацію;

– структура та формат коментарів у пропонованих для навчання учнів комп'ютерних програмах мають бути засновані на відомому стандарті PEP 8, котрий роз'яснює основні вимоги до реалізації програми мовою Python;

– також, на наш погляд було б доцільним для учнів програмувати задачі з математики і фізики для кращого поєднання цих знань з інформатикою, для оволодіння інформаційно-цифровою компетентністю.

Подальші дослідження потрібно направити убік створення методичних розробок та посібників, не тільки для учнів, а й вчителів! Бо все описане не можна вмістити у підручник з інформатики, де розглядається багато тем суто інформаційної спрямованості.

Список літератури:

1. Скретч (мова програмування). URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Скретч_(мова_програмування)

2. Мова програмування високого рівня. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Мова_програмування_високого_рівня

3. Державний стандарт базової середньої освіти. URL: https://surl.li/glhimb

4. Вчити програмування треба в школі чи університеті? URL: https://osvita.ua/school/54063/

5. Інформатична освітня галузь. Інструктивно методичні рекомендації щодо викладання навчальних предметів / інтегрованих курсів у закладах загальної середньої освіти у 2024/2025 навчальному році (Розділ 9). Додаток до листа МОН від 30.08.2024 1.1/15776-24

6. Інформатична освітня галузь. Модельні навчальні програми. Інститут модернізації змісту освіти. https://surl.li/bjzejw

7. Громко Г. Методичні рекомендації щодо викладання інформатики у 2024/2025 навчальному році. https://surl.li/cjbbmn

8. Сікора О.В., Кобильник Т.П. Java як засіб навчання учнів основ програмування. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2023. Том 34 (73), № 5. С. 224-230

9. Половина підлітків знає, ким хоче бути в майбутньому. У топі професій – програміст, лікар, дизайнер. URL: https://www.village.com.ua/village/city/city-news/353791-polovina-pidlitkiv-znae-kim-hoche-buti-u-maybutnomu-u-topi-profesiy-programist-likar-dizayner

10. Does Coding Help You Think Logically? URL: https://funtech.co.uk/latest/does-coding-help-you-think-logically

11. PYPL PopularitY of Programming Language. URL: https://pypl.github.io/PYPL.html

12. JavaScript. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/JavaScript

13. "Hello World" In 30 Different Languages. URL: https://www.geeksforgeeks.org/hello-world-in-30-different-languages/

14. Java (programming language). URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Java_(programming_language)

15. What are the differences between procedural and object-oriented programming? URL: https://surl.li/baxeod

16. Difficulties in Understanding Object Oriented Programming Concepts. URL: https://www.researchgate.net/publication/289775172_Difficulties_in_Understanding_Object_Oriented_Programming_Concepts

17. Python (programming language). URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Python_(programming_language)

18. Off-side rule. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Off-side_rule

19. What is Python used for? 10 practical Python uses. URL: https://www.futurelearn.com/info/blog/what-is-python-used-for

20. Top 10 Python Libraries. URL: https://www.interviewbit.com/blog/python-libraries/

21. Felix Zumstein. Python for Excel. A Modern Environmentfor Automation and Data Analysis. O'Reilly Media. 2021. – 275 p.

22. Korotenko G, Korotenko L. Formation of a Programming Languages Stack and a methodology of teaching to students specialized in Computer Science at Technical Universities in the context of interdisciplinarity. Technium Sustainability. Vol. 1, No. 1 (2021): – P. 21 33. Sustainability. Published: 2021-10-07. Retrieved from URL https://techniumscience.com/index.php/sustainability/article/view/4944 DOI: https://doi.org/10.47577/sustainability.v1i1.4944

23. Flow diagrams, turing machines and languages with only two formation rules. URL: https://dl.acm.org/doi/10.1145/355592.365646

24. Yourdon E. Techniques of Program Structure and Design. – Prentice Hall, 1975. – 409 p.

25. Block diagram. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Block_diagram

26. Deitel P., Deitel H. C++11 for Programmers. 2nd Edition. – Prentice Hall, 2013. – 1280 p.

27. PEP 8 – Style Guide for Python Code. URL: https://peps.python.org/pep-0008/

28. МАТЕМАТИКА (рівень стандарту). Програма для 10-11-х класів ЗНЗ. URL: https://osvita.ua/school/program/program-10-11/58878/

29. ФІЗИКА. Навчальні програми для загальноосвітніх навчальних закладів у 10 та 11 класах. URL: https://surl.li/htqoky

Korotenko G.M., Sokolova N.O., Shirin A.L. TEACHING IN GENERAL SECONDARY EDUCATION INSTITUTIONS OF PROGRAMMING BASICS USING THE PYTHON LANGUAGE

Currently, the vector of orientation towards the development of students' ideas about the application of algorithmic thinking skills is becoming increasingly complicated due to the sharp change in applied tasks that modern specialists in the IT sphere must solve. In addition to purely applied tasks related to computer or computational experiments with digital twins and other digital models, the volume of various data of various nature is growing tremendously. Such data primarily concerns end-to-end technologies and, including, tasks related to the use of models and artificial intelligence tools. It is clear that providing relevant IT competencies to future students and specialists in digital technologies is an urgent mission of a modern school. But it must be borne in mind that not all students will be professional programmers in the future. Thus, a complex of interrelated tasks arises regarding the formation of theoretical, practical, technological, psychological and some other complex procedures aimed at solving emerging problems. Against the backdrop of an increasing

volume of rapidly complex problems, an important element of improving methodological approaches to improving the level of learning of both students and teachers conducting the educational process is the choice of an appropriate programming language and its organizational environment.

The work proves that gradual, supported by appropriate theoretical and practical (including computer) means of mastering the basics of programming is not only possible, but also necessary. According to the analysis of modern computer science textbooks for middle school, it can be summarized that programming as such is practically absent from practical tasks. Thus, teachers must choose themselves: programming language, teaching methods, means of supporting the educational process, appropriate software tool and its version.

The article provides examples of possible directions for applying the most widespread and easy-to-learn multi-paradigm, high-level general-purpose programming language Python with dynamic strong typing and automatic memory management, aimed at increasing developer productivity, simplifying code reading and improving its quality, as well as ensuring the portability of programs written using it.

Key words: *program code, programming languages, algorithms, learning, Python programming language, structured programming.*

УДК 630.863
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/20

Ладієва Л.Р.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Корнієнко Б.Я.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пелипенко Н.С.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ЕТАНОЛУ ГІДРОЛІЗОМ ДЕРЕВИНИ

Зростання попиту на біопаливо обумовлене необхідністю зниження викидів парникових газів та залежності від викопних видів палив, які спричиняють негативні екологічні наслідки. Процес гідролізу, зокрема відходів лісової та харчової промисловостей, дозволяє ефективно використовувати відновлювальні ресурси, які раніше вважалися малоцінними, та отримувати з них біоетанол, який є повноцінним екологічно чистим замінником традиційних видів палива. Розвиток технологій у цьому напрямку також сприяє створенню замкнених виробничих циклів і стимулює екологічну модернізацію промислових процесів, що робить дослідження в цій сфері надзвичайно важливими для сталого розвитку. Процес гідролізу можна вважати найперспективнішим способом отримання біоетанолу, оскільки в якості сировини в даному процесі можуть використовуватися дерев'яна тирса чи решткі харчової промисловості, які на даний момент вважаються відходами. Використання цих ресурсів створює можливість не тільки отримувати екологічно чисте паливо, а й створення безвідходних виробництв в харчовій промисловості.

Одним зі способів отримання біоетанолу є метод гідролізу деревини. Даний метод отримання біоетанолу має перевагу над рештою, тому що він може використовувати відновлювальні ресурси та харчові відходи для виробництва якісного пального. Аналіз попередніх робіт показав, що процес виробництва біоетанолу та його математична модель не досліджена в достатній мірі, тому дане дослідження є актуальним. Розроблена математична модель процесу як об'єкту з зосередженими параметрами. В якості керуючого впливу вибрано витрати нагрітої пари. Отримані статичні і динамічна характеристики процесу. При створенні математичної моделі процесу гідролізу виконані математичні розрахунки гідроліз апарату та побудована модель динаміки, що дає змогу нам розв'язувати задачі пошуку оптимального керування. Підвищення ефективності процесу гідролізу з використанням методу математичного моделювання для прогнозування роботи установки в умовах мінливого складу сировини дозволить розробити оптимальну систему керування процесом.

Ключові слова: *математична модель, виробництво етанолу, гідроліз деревини, статична характеристика, динамічна характеристика, перехідна характеристика процесу.*

Постановка проблеми. В наш час виникла глобальна потреба у відновлювальних джерелах енергії, які мають низький вплив на довкілля. Зростання попиту на біопаливо обумовлене необхідністю зниження викидів парникових газів та залежності від викопних видів палив, які спричиняють негативні екологічні наслідки. Процес гідролізу, зокрема відходів лісової та харчової промисловостей, дозволяє ефективно використовувати відновлювальні ресурси, які раніше вважалися малоцінними, та отримувати з них біоетанол, який є повноцінним екологічно чистим замінником традиційних видів палива. Розвиток технологій у цьому напрямку також сприяє створенню замкнених виробничих циклів і стимулює екологічну модернізацію промислових процесів, що робить дослідження в цій сфері надзвичайно важливими для сталого розвитку.

Процес гідролізу можна вважати найперспективнішим способом отримання біоетанолу, оскільки в якості сировини в даному процесі можуть використовуватися дерев'яна тирса чи

решткі харчової промисловості, які на даний момент вважаються відходами. Використання цих ресурсів створює можливість не тільки отримувати екологічно чисте паливо, а й створення безвідходних виробництв в харчовій промисловості. Тому дослідження процесу виробництва біоетанолу гідролізом деревини – надзвичайно актуальне.

Процес гідролізу деревини відбувається в спеціальному гідроліз-апараті. Гідроліз-апарат – це циліндричний сталевий апарат, який футерований з середини кислотостійким матеріалом. Сировина у вигляді дерев'яної тирси завантажується в гідроліз-апарат, після чого розпочинається процес.

В апарат через спеціальний зрошувальний прилад подається підігріта до 373 К сульфатна кислота концентрацією 0.5 %. Оскільки за звичайної температури гідроліз відбувається дуже повільно, тому в гідроліз-апараті підтримується температура 448.458 К. Для підтримки температури до гідроліз-апарату надходить підігріта пара під тиском 1.1,2 МПа. Гідролізат неперервно виводиться з нижньої частини апарата через спеціальний фільтраційний прилад. Цей прилад – це перфоровані мідні трубки, які не пропускають лігнін.

Гідроліз-апарат працює в циклі від завантаження до вивантаження декілька годин. Після відпрацювання гідроліз-апарату весь лігнін видавлюють в збирач лігніну, позначений номером 4, після чого гідроліз-апарат промивають і готують до нового завантаження [4].

Головним контуром керування гідроліз-апаратом є підтримання концентрації моносахаридів шляхом зміни витрати нагрітої пари, яка регулює температуру в гідроліз-апараті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Деякі дослідження спрямовані на опис сучасних методів виробництва етанолу шляхом гідролізу деревини, висвітлюються різні підходи до кислотного та ферментативного гідролізу [1], чи аналізується кінетика кислотного гідролізу деревини [2-6]. Однак більшість досліджень зосереджуються на моделюванні кінетики реакції гідролізу деревини [7-12].

Створення автоматизованих систем керування вимагає розробки та дослідження математичної моделі динаміки, яка дозволить досягти цілей керування, розробки алгоритмів керування процесом гідролізу та розв'язку задач оптимізації [13-16].

Аналіз публікацій показав, що дослідження процесу гідролізу в основному направлені на техніку експериментальних досліджень процесу гідролізу та його кінетики [17-20]. Для керування процесом необхідно виконати розробку математичної моделі динаміки процесу гідролізу.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення рівня моносахаридів в кінцевому продукті гідролізу – гідролізаті, оскільки саме концентрація моносахаридів впливає на якість біоетанолу. Для цього потрібно розробити і дослідити математичну модель процесу гідролізу в гідроліз-апараті.

Виклад основного матеріалу. Основною перевагою методу гідролізу у виробництві етанолу – полягає в тому, що ми можемо контролювати кількість моносахаридів та полісахаридів в гідролізаті, що є надзвичайно важливо для подальшого виробництва біоетанолу. Реакція гідролізу починається при додаванні сульфатної кислоти та є ендотермічною, однак за звичайних умов процес відбувається надзвичайно повільно. Каталізатором даного процесу є температура, яка пришвидшує процес, а для регулювання температури використовується нагріта пара. В якості керуючого впливу використовується нагріта пара. При розробці математичної моделі процесу необхідно врахувати ряд факторів, як: температура та концентрація сульфатної кислоти, температура сировини, об'єм гідроліз апарату.

На рисунку 1 наведемо розрахункову схему гідроліз-апарату:

Розроблена математична модель гідроліз апарат у виробництві біоетанолу гідролізом деревини. Під час створення математичної моделі прийняті наступні припущення:

1. Тиск не впливає на температуру в гідроліз-апараті.

2. Відсутність втрат тепла в навколишнє середовище.

3. В гідроліз-апараті ідеальні умови.

Запишемо в таблицю 1 основні параметри для розрахунку статичних та динамічних характеристик:

1) Складемо рівняння теплового балансу для гідроліз-апарату, використовуючи структурно-параметричну схему гідроліз-апарату, яка зображена на рисунку 1:

$$F_p \cdot c_p \cdot \theta_p + F_k \cdot c_k \cdot \theta_k + F_c \cdot r - \\ -F_m \cdot c_m \cdot \theta_m - F_l \cdot c_l \cdot \theta_m = 0 \quad (1)$$

де r – прихована теплота пароутворення.

З даного рівняння теплового балансу складемо рівняння статики для каналу «витрати пари – температура гідролізату»:

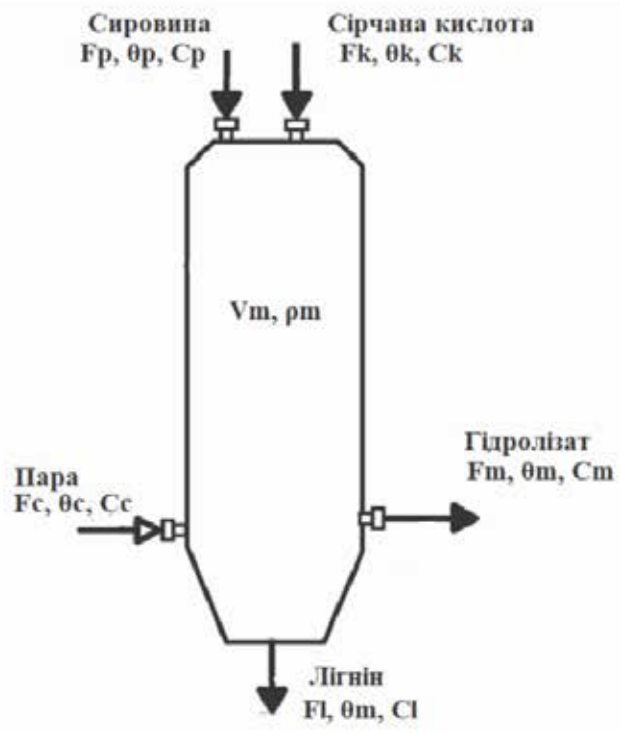


Рис. 1. Структурно-параметрична схема гідроліз-апарату

F_p – витрата сировини, кг/с; θ_p – температура сировини, °К; C_p – питома теплоємність сировини, Дж/(кг °К); F_k – витрата розбавленої сульфатної кислоти, кг/с; θ_k – температура розбавленої сульфатної кислоти, °К; C_k – питома теплоємність розбавленої сульфатної кислоти, Дж/(кг °К); F_c – витрата підігрітої пари, кг/с; θ_c – температура підігрітої пари, °К; C_c – питома теплоємність підігрітої пари, Дж/(кг °К); F_l – витрата лігніну, кг/с; C_l – питома теплоємність лігніну, Дж/(кг °К); F_m – витрата гідролізату, кг/с; θ_m – температура гідролізату, °К; C_m – питома теплоємність гідролізату, Дж/(кг °К); V_m – об'єм гідроліз-апарату, м^3; ρ_m – густина гідролізату, кг/м^3.

$$\theta_m = \frac{F_p \cdot c_p \cdot \theta_p + F_k \cdot c_k \cdot \theta_k + F_c \cdot r}{F_m \cdot c_m + F_l \cdot c_l} \qquad (2)$$

Використовуючи дані, які були отримані з виробництва, підставимо параметри в рівняння статики для каналу «Витрата пари – температура гідролізату». Побудуємо статичну характеристику за каналом «F_c – θ_m» та зобразимо її на рисунку рисунку 2.

З рисунку 2 можна зробити висновок, що температура в гідроліз-апараті лінійно залежна від витрати нагрітої пари. Збільшення витрати пари призводить до збільшення температури в гідроліз-апараті і оптимальна температура для процесу гідролізу, а саме 448 °К, в гідроліз-апараті встановлюється при витраті пари 0,5 кілограм в секунду.

2) Складемо матеріальний баланс по акумулюючій ємності реакційної маси моносахаридів.

$$-F_m \cdot X_m + V_m \cdot \rho_m \cdot w = 0 \qquad (3)$$

де $w = (\frac{M_m}{M_p}) \cdot A_k \cdot e^{(\frac{-E}{R \cdot \theta_m})} \cdot X_{p1}$ – швидкість хімічної реакції взята з рівняння Арреніуса, моль/с, де M_m – молярна маса моносахаридів, моль; M_p – молярна маса полісахаридів, моль; E – енергія активації реакції, Дж/моль; R – універсальна газова стала Дж/(моль*К); Ak – предекспоненціальний множник реакції, 1/ с; Xm – концентрація моносахаридів; $X_{p1} = (\frac{F_c}{F_m} \cdot X_p - \frac{M_m}{M_p} \cdot X_m)$ – концентрація полісахаридів, %.

З матеріального балансу виведемо рівняння статики для каналу «витрата пари – концентрація моносахаридів»:

Таблиця 1

№ п/п	Назва параметру	Позначення	Значення	Одиниці виміру
1	Витрата сировини	F_p	0,25	кг/с
2	Витрата сульфатної кислоти	F_k	0,25	кг/с
3	Витрата пари	F_c	0.5	кг/с
4	Витрата лігніну	F_l	0,125	кг/с
5	Витрата гідролізату	F_m	0,375	кг/с
6	Об'єм гідроліз-апарата	V_m	0.045	м^3
7	Температура сировини	θ_p	293	°К
8	Температура кислоти	θ_k	413	°К
9	Температура пари	θ_c	460	°К
10	Температура гідролізату	θ_m	453	°К
11	Питома теплоємність сировини	c_p	2500	Дж/(кг*К)
12	Питома теплоємність сульфатної кислоти	c_k	4180	Дж/(кг*К)
13	Питома теплоємність пари	c_c	1780	Дж/(кг*К)
14	Питома теплоємність гідролізату	c_m	3800	Дж/(кг*К)
15	Питома теплоємність	c_l	1300	Дж/(кг*К)
16	Густина гідролізату	ρ_m	1554	кг/м^3

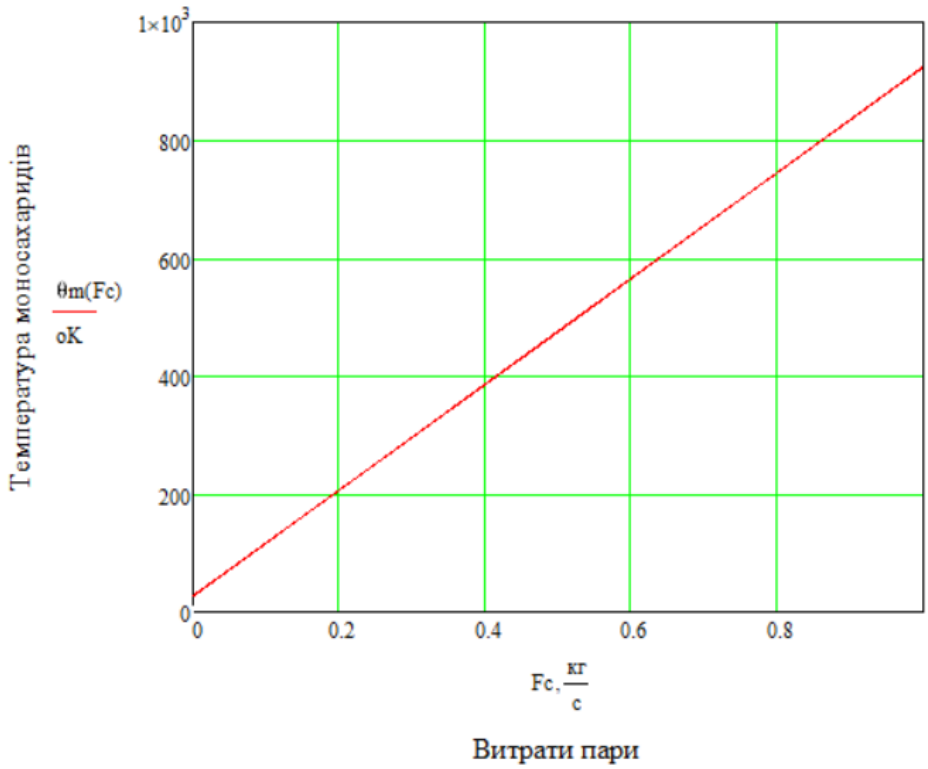


Рис. 2. Статична характеристика за каналом «витрати пари на вході – температура гідролізату»

$$X_m = \frac{V_m \cdot \rho_m \cdot (\frac{M_m}{M_p}) \cdot A_k \cdot e^{(\frac{-E}{R \cdot \theta_m})} \cdot (\frac{F_c}{F_m}) \cdot X_p}{F_m + V_m \cdot \rho_m \cdot (\frac{M_m}{M_p})^2 \cdot A_k \cdot e^{(\frac{-E}{R \cdot \theta_m})}} \quad (4)$$

Використовуючи значення параметрів, які були отримані на виробництві, побудуємо статичну характеристику для каналу «витрата пари -> концентрація моносахаридів» на рисунку 3.

З побудованого графіку можна зробити висновок, що концентрація моносахаридів зростає при зростанні витрати пари, але потім настає момент, коли при збільшенні витрати пари концентрація моносахаридів збільшується незначно.

3) Проведемо моделювання динамічного режиму роботи об'єкта. Виведемо рівняння динаміки теплового балансу процесу гідролізу:

$$F_p \cdot c_p \cdot \theta_m + F_k \cdot c_k \cdot \theta_k + F_c \cdot i_c \text{"} - (\frac{F_p \cdot (1 - X_p) + F_k + F_c}{1 - \frac{M_p}{M_m}} \cdot c_m \cdot \theta_m - (-\frac{M_p}{M_m} \cdot F_m \cdot X_m + F_p \cdot X_p) \cdot c_l \cdot \theta_m) = V_m \cdot \rho_m \cdot c_m \frac{d\theta_m}{dt} \quad (5)$$

4) Виведемо рівняння динаміки матеріального балансу процесу гідролізу:

$$-F_m \cdot X_m + V_m \cdot \rho_m \cdot (\frac{M_m}{M_p}) \cdot A_k \cdot e^{(\frac{-E}{R \cdot \theta_m})} \cdot \cdot (\frac{F_p}{F_m} \cdot X_p - \frac{M_p}{M_m} \cdot X_m) = V_m \cdot \rho_m \frac{dX_m}{dt} \quad (6)$$

Тепер необхідно отримати перехідні характеристики. Для отримання перехідних характеристик проведемо лінеаризацію отриманих рівнянь динаміки.

При невеликих відхиленнях всіх параметрів системи від величини в усталеному стані (нехтуючи малими значеннями вищих порядків членів розкладання ряду Тейлора) лінеаризовані рівняння збереження маси і енергії після перетворень за Лапласом можна представити в наступному вигляді:

$$(T_1 s + 1)\Delta\theta m = k_{11}\Delta Xm + k_1 \Delta Fc$$
$$(T_2 s + 1)\Delta Xm = k_2 \Delta\theta m$$

Виконаємо позначення:

$$k_{11} = -\frac{M_p}{M_m} \cdot F_m \cdot c_l \cdot \theta_m$$

$$k_1 = C_c \cdot \theta_c + r$$

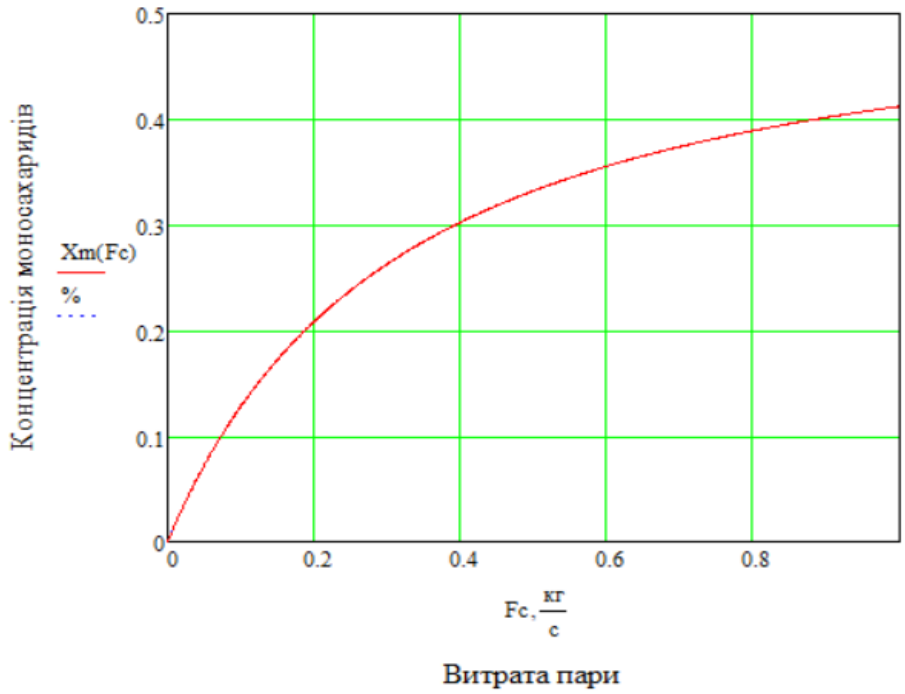


Рис. 3. Статична характеристика за каналом «витрати пари на вході – концентрація моносахаридів»

$$k_2 = V_m \cdot \rho_m \cdot \frac{M_m}{M_p} \cdot A_k \cdot e^{(\frac{-E}{R \cdot \theta_m})} \cdot (\frac{E}{R \cdot \theta_m}) \cdot (\frac{F_p}{F_m} \cdot X_p - \frac{M_p}{M_m} \cdot X_m)$$

$$M = V_m \cdot \rho_m \cdot \frac{M_m}{M_p} \cdot A_k \cdot e^{(\frac{-E}{R \cdot \theta_m})} \cdot (\frac{E}{R \cdot \theta_m}) \cdot (\frac{F_p}{F_m} \cdot X_p - \frac{M_p}{M_m} \cdot X_m)$$

$$N = \frac{F_p \cdot (1 - X_p) + F_k + F_c}{1 - \frac{M_p}{M_m} \cdot X_m} \cdot c_m - (-\frac{M_p}{M_m} \cdot F_m \cdot X_m + F_p \cdot X_p) \cdot c_l$$

Знайдемо значення коефіцієнтів Т1 та Т2:

$$T_1 = \frac{V_m \cdot \rho_m}{M}$$

$$T_2 = \frac{V_m \cdot \rho_m \cdot c_m}{N}$$

Для опису динамічних характеристик математична модель динаміки процесу гідролізу показана у вигляді диференційних рівнянь другого порядку, тобто в просторі станів можна подати у вигляді:

$$\frac{dX}{dt} = A \cdot X + B \cdot U$$

В результаті отримана передатна функція за каналом «витрата пари» -«концентрація моносахаридів»:

$$\frac{dX_m}{dF_c} = W(s) = \frac{b}{a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + 1}$$

Отримана перехідна характеристика процесу гідролізу за каналом «витрата пари» -«концентрація моносахаридів» (Рис. 4).

З рис. 4 видно, що система має аперіодичний характер перехідного процесу. З графіку перехідної характеристики можна побачити, що час перехідного процесу становить приблизно 60 секунд, що для процесу гідролізу вважаэться нормальним. Концентрація моносахаридів повинна лежати в диапазоні 0,25–0,35.

Розрахунки математичної моделі процесу гідролізу були проведені у програмних середовищах MATLAB та MathCad.

Висновки. Одним зі способів отримання біоетанолу є метод гідролізу деревини. Даний метод отримання біоетанолу має перевагу над рештою, тому що він може використовувати відновлювальні ресурси та харчові відходи для виробництва якісного пального.

Аналіз попередніх робіт показав, що процес виробництва біоетанолу та його математична модель не досліджена в достатній мірі, тому дане дослідження є актуальним. Розроблена математична модель процесу як об'єкту з зосередженими параметрами. В якості керуючого впливу вибрано витрати нагрітої пари. Отримані статичні і динамічна характеристики процесу. При створенні математичної моделі процесу гідролізу виконані математичні розрахунки гідроліз апарату та побудована модель динаміки, що дає змогу нам розв'язувати

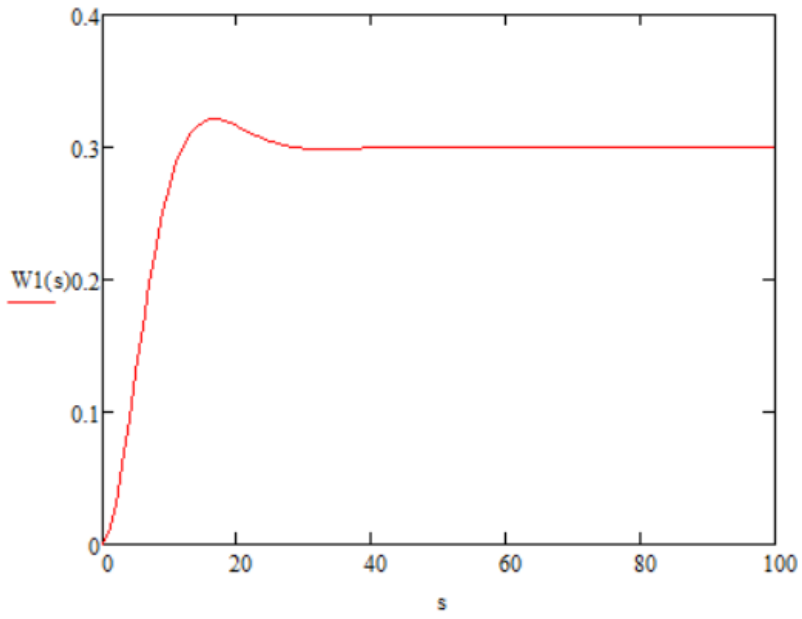


Рис. 4. Перехідна характеристика процесу гідролізу за каналом «Fc – X_m»

задачі пошуку оптимального керування. Підвищення ефективності процесу гідролізу з використанням методу математичного моделювання для прогнозування роботи установки в умовах мінливого складу сировини дозволить розробити оптимальну систему керування процесом.

Список літератури:

1. Baker, A. J., & Jeffries, T. W. *State-of-the-art report on status of wood hydrolysis for ethanol production*. OSTI, 1981. 56 с.

2. Kwarteng, I. K. *Kinetics of acid hydrolysis of hardwood in a continuous plug flow reactor*. OSTI, 1983. 78 с.

3. Conner, A. L., & Lorenz, L. F. *Kinetic modeling of hardwood prehydrolysis. Part III. Water and dilute acetic acid prehydrolysis of southern red oak*. OSTI, 1986. 34 с.

4. Білик, І. П., Погребенник, А. П. *Математичне моделювання процесу кислотного гідролізу деревини в реакторі з перемішуванням*. Науковий вісник НТУУ «КПІ», 2018. 32 с.

5. Сенько, Л. І., Коржов, В. А. *Дослідження кінетики процесу гідролізу в реакторі безперервної дії*. Журнал хімічної технології, 2020. 45 с.

6. Huang, Y., & Chen, W. H. *A kinetic model for hydrolysis of cellulose in a semi-batch reactor: Analysis of temperature effects*. Biochemical Engineering Journal, 2021. 72 с.

7. Мельничук, М. І. *Оптимізаційні підходи до математичного моделювання ферментативних процесів гідролізу білків у харчовій промисловості*. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства, Харків, 2019. 124 с.

8. Галушко, С. С. *Ензиматичний гідроліз та математичне моделювання отримання гідролізатів білків із побічної сировини харчової промисловості*. Східноєвропейський національний університет, Луцьк, 2021. 115 с.

9. Godoy, J., Valbuena, M., Pérez-Correa, J. R., et al. (2018). *A semi-mechanistic model to simulate enzymatic hydrolysis of pretreated lignocellulosic biomass: application to sugarcane bagasse*. Bioresource Technology, 256, 34-42. doi:10.1016/j.biortech.2018.01.154.

10. Ashfaq, M. M., Zholobko, O., Wu, X.-F. *Kinetic Modeling of Cornstalk Cellulose Hydrolysis in Supercritical Water: A Comparative Study of the Effects of Temperature and Residence Time on Derivative Production*. Processes, 11(10), 2023. MDPI. 3030 с.

11. Van Maris, A. J. A., Winkler, R., Verheijen, P. J. T. *Modeling enzymatic hydrolysis of cellulose in lignocellulosic biomass conversion processes*. Biotechnology Advances, 29(4), 2011. Elsevier. 675-681 с.

12. Godoy, J., Valbuena, M., Pérez-Correa, J. R., et al. *A semi-mechanistic model to simulate enzymatic hydrolysis of pretreated lignocellulosic biomass: application to sugarcane bagasse*. Bioresource Technology, 256, 2018. Elsevier. 34-42 с.

13. Kornienko Y.M., Haidai S.S., Sachok R.V., Liubeka A.M., Korniyenko B.Y. Increasing of the heat and mass transfer processes efficiency with the application of non-uniform fluidization. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020. No 15(7). P. 890-900.

14. Korniyenko B., Ladieva L. Mathematical Modeling Dynamics of the Process Dehydration and Granulation in the Fluidized Bed. Advances in Intelligent Systems and Computing. 1247 AISC. 2021. P. 18-30.

15. Корнієнко Б.Я., Галата Л.П. Дослідження імітаційного полігону захисту критичних інформаційних ресурсів методом IRISK. Моделювання та інформаційні технології. 2018. Вип. 83. С. 34-42.

16. Галата Л.П., Корнієнко Б.Я., Заболотний В.В. Математична модель протидії загрозам у системі захисту критичних інформаційних ресурсів. Наукоємні технології. 2019. Том 43. № 3. С. 300-306.

17. Корнієнко Б.Я., Галата Л.П. Оптимізація системи захисту інформації корпоративної мережі. Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. 2019. Випуск 19. С. 56-62.

18. Корнієнко Б. Я., Галата Л. П. Побудова та тестування імітаційного полігону захисту критичних інформаційних ресурсів. Наукоємні технології. 2017. № 4 (36). С. 316–322. doi.org/10.18372/2310-5461.36.12229.

19. Корнієнко Б.Я., Юдін О.К., Снігур О.С. Безпека аутентифікації у web-ресурсах. Захист інформації. 2012. № 1 (54). С. 20 -25. DOI: 10.18372/2410- 7840.14.2056 (ukr).

20. Корнієнко Б. Я. Дослідження моделі взаємодії відкритих систем з погляду інформаційної безпеки. Наукоємні технології. 2012. № 3 (15). С. 83–89, doi.org/10.18372/2310- 5461.15.5120 (ukr).

Ladieva L.R., Korniyenko B.Ya., Pelypenko N.S. MATHEMATICAL MODELING OF ETHANOL PRODUCTION PROCESS BY WOOD HYDROLYSIS

The growing demand for biofuels is due to the need to reduce greenhouse gas emissions and dependence on fossil fuels, which cause negative environmental consequences. The hydrolysis process, in particular waste from the forestry and food industries, allows for the effective use of renewable resources that were previously considered of little value and to obtain bioethanol from them, which is a full-fledged environmentally friendly substitute for traditional fuels. The development of technologies in this direction also contributes to the creation of closed production cycles and stimulates the environmental modernization of industrial processes, which makes research in this area extremely important for sustainable development. The hydrolysis process can be considered the most promising method of obtaining bioethanol, since wood sawdust or residues from the food industry, which are currently considered waste, can be used as raw materials in this process. The use of these resources creates the opportunity not only to obtain environmentally friendly fuel, but also to create waste-free production in the food industry. One of the methods of obtaining bioethanol is the method of wood hydrolysis. This method of bioethanol production has an advantage over the rest, because it can use renewable resources and food waste to produce high-quality fuel. Analysis of previous works showed that the bioethanol production process and its mathematical model have not been studied sufficiently, so this study is relevant. A mathematical model of the process as an object with concentrated parameters has been developed. The flow of heated steam has been chosen as the control influence. Static and dynamic characteristics of the process have been obtained. When creating a mathematical model of the hydrolysis process, mathematical calculations of the hydrolysis apparatus have been performed and a dynamics model has been built, which allows us to solve the problems of finding optimal control. Increasing the efficiency of the hydrolysis process using the mathematical modeling method to predict the operation of the installation under conditions of variable raw material composition will allow developing an optimal process control system.

Key words: *mathematical model, ethanol production, wood hydrolysis, static characteristic, dynamic characteristic, transient characteristic of the process.*

УДК 517.97+514.18
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/21

Легеза В.П.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Нещадим О.М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Дичка А.І.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОДЕЗИЧНИХ ЛІНІЙ НА ЦИЛІНДРИЧНІЙ ПОВЕРХНІ З ЦИКЛОЇДАЛЬНОЮ ТВІРНОЮ

Найкоротший шлях між двома точками на землі називається геодезичною. В перших постановках задач пошук зазначених кривих було здійснено на поверхні землі, звідки і походить їх назва. Земля в таких задачах розглядалася як еліпсоїд обертання або сфероїд. На сьогодні існують дві постановки геодезичних задач: 1). пряма задача щодо знаходження кінцевої точки геодезичної лінії за її початковою точкою, початковим азимутом і довжиною; 2). обернена задача щодо знаходження найкоротшого шляху між двома даними точками на поверхні сфероїда. В переважній низці раніше розв'язаних задач траєкторії геодезичних кривих були визначені на поверхнях, які мають осьову симетрію: еліпсоїд обертання (сфероїд), сфера, прямий круговий циліндр. Для цього було використано числове інтегрування відповідних диференціальних рівнянь другого порядку, які описують форму цих кривих. В сучасних дослідженнях було розроблено нові та вдосконалено старі алгоритми і програмні комплекси стосовно швидкості і, головне, точності обчислень геодезичних кривих.

В цій роботі розглянуто обернену задачу (в другій постановці), тільки замість сфероїда для дослідження було обрано іншу поверхню. Зазначена поверхня є трансцендентною і представляє собою половину розрізаного вздовж горизонтальної площини симетрії горизонтально розташованого циліндра, напрямна якого є циклоїдою, а твірні є паралельними горизонтальній осі. Було поставлено і розв'язано нову задачу варіаційного числення про пошук геодезичних ліній на трансцендентній поверхні. Побудовано функціонал шляху та за допомогою класичних рівнянь Ейлера отримано диференціальне рівняння кривої, яке інтегрується у замкненій формі. Встановлено алгебраїчне рівняння просторової геодезичної кривої у параметричній формі, яке задовольняє задані граничні умови крайової задачі. Проведено числовий експеримент та здійснено візуалізацію отриманих результатів.

Результати запропонованого дослідження доцільно застосувати для розв'язання логістичних та транспортних задач, при проектуванні спортивних об'єктів та атракціонів.

Ключові слова: *геодезична крива, сфероїд, циклоїда, трансцендентна поверхня, варіаційне числення, рівняння Ейлера, крайова задача, логістика.*

Постановка проблеми. Геодезична лінія є узагальненням поняття прямої на викривлені (неевклідові) простори: така лінія для двох близько розташованих точок буде найкоротшою. Зокрема, геодезичними лініями будуть: а). на площині – пряма; б). на сфері – велике коло; в). на еліпсоїді, в загальному випадку, це незамкнена крива, що задається через еліптичні довготу і широту.

Найкоротший шлях між двома точками на землі, яку прийнято розглядати як еліпсоїд обертання (або сфероїд), також називається геодезичною. Зазвичай розглядаються дві постановки геодезичних задач: 1). пряма задача на знаходження кінцевої точки геодезичної лінії за її початковою точкою, початковим азимутом і довжиною; 2). обернена задача знаходження найкоротшого шляху між двома даними точками на поверхні сфероїда. Можна показати, що кожна задача еквівалентна розв'язанню геодезичного трикутника із двома сторонами та їх кутом (азимут у першій точці α_1 у випадку прямої задачі та різницю довгот λ_1 у випадку оберненої задачі). Зазначимо, що переважна частина задач, пов'язаних із пошуком геодезичних кривих, стосується їхнього визна-

чення на поверхнях типу еліпсоїда обертання (сфероїда) та пов'язана з числовим інтегруванням відповідних диференціальних рівнянь, які описують ці криві.

Сучасні роботи в цій області присвячені саме вдосконаленню алгоритмів і програмних комплексів стосовно швидкості і, головне, точності обчислень цих кривих. Цей напрям сучасних досліджень пов'язаний, наприклад, із розв'язанням цілком прагматичної практичної проблеми прокладання найкоротших логістичних маршрутів для літаків під час перельотів навколо земної кулі на далекі відстані.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основи вирішення проблем пошуку геодезичних кривих були закладені Лежандром [1], Оріані [2–4], Бесселем [5], Гельмертом [6] та Гауссом [7]. Бессель вперше розробив процедуру розв'язання геодезичної задачі для еліпсоїда обертання з використанням рядів, а для спрощення аналізу результатів обчислень ним було наведено відповідні таблиці. Спираючись на результати зазначених робіт, Вінценті [8, 9] розробив відповідні алгоритми для розв'язання геодезичних задач, придатних для перших програмованих настільних калькуляторів. Наведено компактні формули для прямих і обернених розв'язків геодезичних будь-якої довжини. Існуючі формули було перероблено для ефективного програмування, щоб заощадити обсяг пам'яті та скоротити час обчислень. Головною особливістю нових формул є використання вкладених рівнянь для еліптичних членів. Обидва розв'язки є ітераційними. Запропоновані алгоритми та програми і до сьогодні широко використовуються в сучасних комп'ютерах.

Суттєве вдосконалення процесів алгоритмізації методики Вінценті з пошуку геодезичних та узагальнення попередніх досліджень інших авторів у цій області знань виконав Рап [10]. Матеріали цієї роботи охоплюють всі аспекти земних і небесних координатних систем та систем відліку в геодезії: від історичних геодезичних даних до сучасних національних і міжнародних систем відліку та перетворень між ними. Робота поділена на дві частини, перша присвячена земним системам відліку, а друга – небесним системам відліку, де остання зосереджена, насамперед, на переході до першої. Детально висвітлено геометрію еліпсоїда обертання, а також астрономічні координати та астрогеодезичні методи.

В роботі Карні [11] наведено осучаснені алгоритми обчислення геодезичних на еліпсоїді обертання. Вони забезпечують точні, надійні та швидкі рішення прямих і обернених геодезичних задач і дозволяють встановлювати диференціальні та інтегральні властивості геодезичних кривих. Точність алгоритмів в [11] була підвищена з метою відповідності стандартній точності більшості потужних комп'ютерів. Ця відносно проста задача була розв'язана за рахунок утримання достатнього числа членів у відповідних відрізках рядів і була реалізована з невеликими обчислювальними витратами. В статті [12] використано гамільтонівське формулювання геодезичних рівнянь для аналізу властивостей їх інтегровності. Зокрема, була проаналізована поведінка геодезичних на поверхнях, визначених сферичними гармоніками. Із залученням теореми Моралеса-Раміса та алгоритму Ковачіча [13] було доведено, що геодезичні рівняння на всіх поверхнях, визначених секторальними гармоніками, не є інтегровними. Щоб продемонструвати порушення регулярного руху, використано перерізи Пуанкаре. В статті [14] наведено загальні поняття і теоретичні підходи до визначення геодезичних кривих на многовидах загального типу. Наведено функціонал довжини кривої, першу і другу варіації цього функціоналу та диференціальне рівняння геодезичної кривої на двовимірній поверхні. В статті [15] досліджується центральна проекція для сфероїда, для якої відповідною характеристикою є те, що великі еліптичні лінії проектуються в прямі. Маючи карту, отриману з центральної проекції, пілот може спланувати великий круговий маршрут, провівши на ньому пряму лінію від початкової точки до пункту призначення. Після встановлення цієї лінії пілоту стає зрозумілим розташування міст і географічних об'єктів на карті.

У статті Рейнсфорда [16] розглядається практичне застосування формул для обчислення довгих ліній на еліпсоїді. Основною метою цього дослідження є усунення звичайно необхідного в таких задачах послідовного наближення. Для оберненої задачі це досягається за допомогою методу Содано [17]. Для прямої задачі використовується адаптація методу, створеного Маккоу [18]. Наведено результати п'яти практичних прикладів, у тому числі двох, які найбільш поширені. Надаються рекомендації з побудови спеціальних таблиць для спрощення обчислень в геодезичних задачах, які найчастіше зустрічаються.

В навчально-наукових замітках [19] міститься детальний вивід рівнянь для розв'язання прямої і оберненої задач про встановлення геодезичних кривих на еліпсоїді. Процедуру виводу цих рівнянь можна назвати методом Бесселя, який

вперше був оприлюднений в його оригінальній статті [5]. Отримані в роботі [19] рівняння мають дещо іншу форму, ніж представлені Бесселем, але вони ведуть безпосередньо до рівнянь, представлених Рейнсфордом [16] і Вінценті [8, 9], та в подальшому до створення методу, подібного до наведеного в роботі Рапа [10]. Розуміння методів, представлених в [19], зокрема обчислення еліптичних інтегралів шляхом розкладання в ряд, дає досліднику уявлення про інші геодезичні розрахунки.

Огляд робіт, опублікованих раніше у даному науковому напрямку, свідчить про те, що варіаційні задачі щодо пошуку геодезичних ліній розглядалися переважно на тілах обертання: на сфері, еліпсоїді обертання (сфероїді), прямому круговому циліндрі, що пояснюється практичною стороною питання (логістика на великих відстанях на поверхні землі). Причому основна увага іншими авторами приділялася числовому розв'язанню відповідних диференціальних рівнянь, оскільки постановки задач не дозволяли визначити рівняння геодезичних кривих в замкненій аналітичній формі.

У цій статті вперше розглядається варіаційна задача про пошук геодезичних ліній на циліндричній трансцендентній поверхні. Трансцендентна поверхня представляє собою горизонтальний циліндр, утворений з двох однакових частин, напрямною кожної з них є циклоїда, а його твірні паралельні горизонтальній осі. Новизна дослідження полягає в тому, що по-перше, ця поверхня не є поверхнею обертання, а до-друге, розв'язок цієї задачі вдається встановити у замкненій аналітичній формі. Практична сторона питання щодо необхідності розгляду геодезичних на таких поверхнях висвітлена в роботі [20], яка присвячена розробці ізохронних поглиначів вимушених коливань низькочастотних динамічних систем.

Постановка завдання. Мета дослідження: на зазначеній вище трансцендентній поверхні методами класичного варіаційного числення визначити рівняння геодезичних ліній в аналітичній формі.

Виклад основного матеріалу. Побудова функціоналу шляху і визначення диференціального рівняння геодезичної кривої. Нагадаємо, що **геодезичною лінією** між двома заданими точками M і N на певній поверхні називається така просторова крива, шлях по якій між точками M і N є **найменшим**.

Введемо просторову систему координат так, як це вказано на рис. 1. Параметричні рівняння трансцендентної напрямної кривої (циклоїди) визначаються двома координатами $y(\theta)$ (ордината) і $z(\theta)$ (апліката) точки на цій кривій:

$$\begin{cases} y(\theta) = R(\theta - \sin\theta); \\ z(\theta) = R(1 + \cos\theta). \end{cases} \qquad (1)$$

де θ – параметр циклоїди, а R – її характеристика; $\theta \in [0; 2\pi]$

Отже, потрібно визначити залежність першої координати – абсциси $x(\theta)$ від параметра θ так, щоб просторова траєкторія між наперед заданими

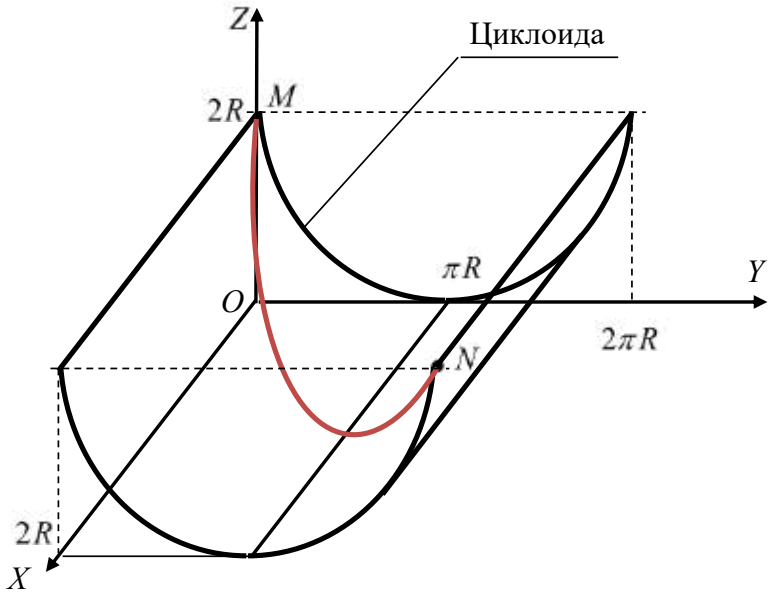


Рис. 1. До пошуку геодезичних на трансцендентній поверхні

на цій поверхні точками M і N мала б найменшу довжину.

Нехай точки, про які було сказано вище, мають наступні координати: $M_{st}(0;0;2R)$ – стартова і $N_f(2R;2\pi R;2R)$ – фінішна. Стартова точка визначається параметром $\theta=0$, а фінішна – $\theta=2\pi$. Ці дані описують граничні умови в нашій майбутній варіаційній задачі: $x(0)=0$, $x(2\pi)=2R$.

Користуючись співвідношеннями (1) запишемо вираз для диференціала довжини дуги ds кривої MN, що лежить на трансцендентній поверхні:

$$ds=\sqrt{1+4R^2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\cdot\left(\theta_x'\right)^2}\,dx\,. \qquad (2)$$

Тепер можна записати функціонал шляху, який потрібно мінімізувати:

$$L(K)=\int\limits_{MN}ds=\int\limits_{MN}\sqrt{1+4R^2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\cdot\left(\theta_x'\right)^2}\,dx\to\min\limits_{K}\,. \qquad (3)$$

Тут через $L(K)$ позначено довжину кривої K, що належить множині довільних кривих $MN=\left\{K(x(\theta),y(\theta),z(\theta))\right\}$, по яких може рухатись матеріальна точка, що лежить на трансцендентній поверхні; θ – параметр, $\theta\in[0,2\pi]$. Саме цей функціонал потрібно мінімізувати, знайшовши потрібну криву із зазначеної множини.

Позначимо підінтегральну функцію у виразі (3) через $F(x,\theta(x),\theta'(x))$. Отже, маємо:

$$F(x,\theta,\theta')=\sqrt{1+4R^2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)(\theta_x')^2}\,. \qquad (4)$$

Для визначення рівняння шуканої кривої використаємо класичне диференціальне рівняння Ейлера [21]:

$$F_\theta'-\frac{d}{dx}\left(F_{\theta'}'\right)=0\,. \qquad (5)$$

Спочатку визначимо відповідні частинні похідні, які входять у рівняння (5). Запишемо F_θ':

$$F_\theta'=R^2\sin\theta\cdot\left(\theta_x'\right)^2\Big/\sqrt{1+4R^2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\left(\theta_x'\right)^2}\,. \qquad (6)$$

Знайдемо $F_{\theta'}'$, використовуючи (4):

$$F_{\theta'}'=4R^2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\cdot\theta_x'\Big/\sqrt{1+4R^2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\left(\theta_x'\right)^2}\,. \qquad (7)$$

Тепер визначимо похідну $\left(F_{\theta'}'\right)_x'$:

$$\frac{d}{dx}\left(F_{\theta'}'\right)=\frac{4R^2\left[\frac{\left(\theta_x'\right)^2}{2}\cdot\sin\theta+\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\cdot\theta_{xx}''+R^2\sin\theta\cdot\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\cdot\left(\theta_x'\right)^4\right]}{\left(1+4R^2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\left(\theta_x'\right)^2\right)^{3/2}} \qquad (8)$$

Підставимо вирази (6) та (8) у рівняння Ейлера (5). В результаті тотожних перетворень, які тут не наводимо, дістанемо диференціальне рівняння другого порядку з відповідними граничними умовами (крайова задача):

$$2\,\mathrm{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right)\theta_{xx}''+\left(\theta_x'\right)^2=0\,;\ x(0)=0\,,\ x(2\pi)=2R\,. \qquad (9)$$

Отримане рівняння інтегрується в замкненій формі. Покажемо це.

Знаходження алгебраїчного рівняння геодезичних ліній.

Для зниження порядку рівняння на одиницю зробимо таку заміну:

$$p(\theta)=\theta_x'\Rightarrow\theta_{xx}''=p'(\theta)\,p(\theta)\,. \qquad (10)$$

Після підстановки нової змінної у рівняння (9) дістанемо диференціальне рівняння першого порядку:

$$2\,\mathrm{tg}\left(\theta/2\right)\cdot p'(\theta)\cdot p(\theta)+p^2(\theta)=0\,. \qquad (11)$$

Тривіальний розв'язок $\theta_x'=p(\theta)=0$ нас не цікавить, бо дає сталий результат:

$$\theta(x)=C_0=const\,.$$

Розглянемо рівняння (11) після скорочення на $p(\theta)\neq0$:

$$2\,\mathrm{tg}\left(\theta/2\right)p'(\theta)+p(\theta)=0\,. \qquad (12)$$

Це є рівняння з відокремлюваними змінними, яке одразу інтегрується:

$$\frac{dp}{p}=-\frac{1}{2}\mathrm{ctg}\left(\frac{\theta}{2}\right)d\theta\Rightarrow\int\frac{dp}{p}=$$

$$-\frac{1}{2}\int\mathrm{ctg}\left(\frac{\theta}{2}\right)d\theta\Rightarrow\ln p=-\ln\left[\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]+\ln C_1.$$

Звідси знайдемо функцію θ_x':

$$p(\theta)=\theta_x'=C_1/\sin\left(\theta/2\right). \qquad (13)$$

Інтегруємо рівняння (12), в результаті дістанемо функцію $x(\theta)$:

$$x(\theta)=\left[C_2-2\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]\Big/C_1\,. \qquad (14)$$

Знайдемо невідомі сталі C_1 та C_2 з граничних умов у рівнянні (9):

$$x(0)=0\Rightarrow C_2=2\,,\ x(2\pi)=2R\Rightarrow C_1=2/R\,. \qquad (15)$$

Тепер розв'язок (13) з використанням (14) набуває такого вигляду:

$$x(\theta)=R\left[1-\cos\left(\theta/2\right)\right]. \qquad (16)$$

Рівняння (16) описує залежність абсциси x точки від параметра θ. Приєднавши отриману функцію $x=x(\theta)$ до рівнянь напрямної кри-

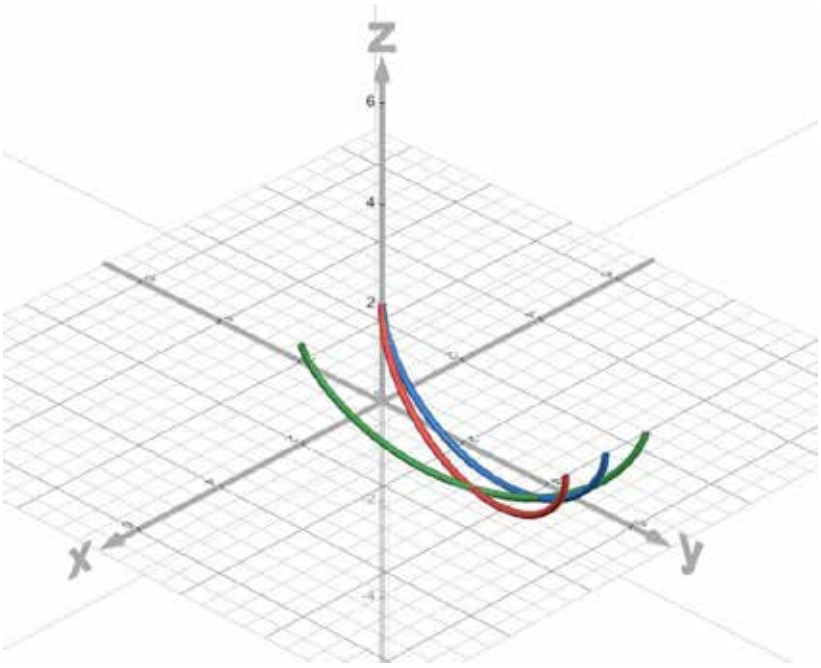


Рис. 2. Візуалізація отриманих результатів

вої (1), повністю визначимо шукану просторову криву в параметричній формі:

$$L_1(\theta) = \left\{ R\left[1-\cos(\theta/2)\right], R(\theta-\sin\theta), R(1+\cos\theta) \right\}, \quad (17)$$

де θ – параметр, $\theta \in [0, 2\pi]$.

Графічна інтерпретація отриманих результатів. За результатами дослідження був проведений числовий експеримент з метою аналізу відповідних геодезичних кривих для трьох пар точок (рис. 2).

Для ілюстрації показані три геодезичних криві, одна з них задана формулою (17) і її графік на рис. 2 має червоний колір. Дві інші криві знайдені аналогічно попередній, але за умови проходження цих геодезичних через дві пари інших заданих точок:

$L_2 : \left\{ M_{st}(0;0;2R), N_f(R, 2\pi R, 2R) \right\}$ – геодезична крива синього кольору;

$L_3 : \left\{ M_{st}(2R;0;2R), N_f(0; 2\pi R; 2R) \right\}$ – геодезична зеленого кольору, ($R = 1$).

Висновки. Розв'язано нову задачу варіаційного числення про пошук геодезичних ліній на трансцендентній поверхні. Поверхня представляє собою горизонтальний циліндр, напрямна якого є циклоїдою, а твірні паралельні горизонтальній осі абсцис. За допомогою класичних рівнянь Ейлера отримано диференціальне рівняння шуканої кривої, яке інтегрується у замкненій формі. Встановлено алгебраїчне рівняння геодезичної у параметричній формі, яке задовольняє задані граничні умови. Проведено числовий експеримент, в результаті якого було продемонстровано ряд графіків геодезичних кривих для трьох пар заданих на трансцендентній поверхні точок.

Результати проведеного дослідження будуть корисними як науковим спеціалістам-теоретикам в області варіаційного числення, так і інженерам-практикам в галузях логістики, спорту, геодезії та картографії.

Список літератури:

1. Legendre A.-M. Analyse des triangles tracées sur la surface d'un sphéroïde. Mém de l'Inst Nat de France, 1806, 1st sem, p.p. 130–161. http://books.google.com/books?id=-d0EAAAAAQAAJ&pg=PA130-IA4

2. Oriani B. Elementi di trigonometria sferoidica, Pt. 1. Mem dell'Ist Naz Ital., (in Italian). 1806, 1(1):118–198. http://books.google.com/books?id=SydFAAAAcAAJ&pg=PA118

3. Oriani B. Elementi di trigonometria sferoidica, Pt. 2. Mem dell'Ist Naz Ital., (in Italian).1808, 2(1):1–58. http://www.archive.org/stream/memoriedellistit21isti#page/1

4. Oriani B. Elementi di trigonometria sferoidica, Pt 3. Mem dell'Ist Naz Ital., (in Italian). 1810, 2(2):1–58. http://www.archive.org/stream/memoriedellistit22isti#page/1

5. Bessel F. W. Über die Berechnung der geographischen Längen und Breiten aus geodätischen Vermessungen. AstronNachr., 1825, 4(86): 241–254. http://adsabs.harvard.edu/abs/1825AN....4.241B

6. Helmert F.R. Die Mathematischen und Physikalischen Theorieen der Höheren Geodäsie, 1880, V.1.Teubner, Leipzig. http://books.google.com/books?id=qt2CAAAAIAAJ

7. Gauss C.F. General Investigations of Curved Surfaces of 1827 and 1825. Princeton university library, 1902. Переклад: James Caddall Morehead, Adam Miller Hiltebeitel. Оцифровано 13 сер. 2008, 126 стор.

8. Vincenty, Thaddeus *(April 1975a)*. Direct and Inverse Solutions of Geodesics on the Ellipsoid with application of nested equations. *Survey Review. XXIII (176):* 88*–93. https://doi.org/*10.1179/sre.1975.23.176.88

9. Vincenty, Thaddeus *(August 1975b)*. Geodetic inverse solution between antipodal points *(Technical report). DMAAC Geodetic Survey Squadron. https://doi.org/*10.5281/zenodo.32999

10. Rapp R.H. Geometric Geodesy, part 2. 1993. Ohio State University Department of Geodetic. Science and Surveying. http://hdl.handle.net/1811/24409

11. Charles F. F. Karney. Algorithms for geodesics. J. Geodesy, 87(1), 43-55 (2013). https://doi.org/10.1007/s00190-012-0578-z

12. Waters Thomas J. Regular and irregular geodesics on spherical harmonic surfaces. arXiv:1112.3231v1 [math.DS], 2011, https://doi.org/10.48550/arXiv.1112.3231

13. Kovacic J. An algorithm for solving second order linear homogeneous differential equations. J. Symb. Comp. (1986), V. 2, No 1, p.p.3-43. https://doi.org/10.1016/S0747-7171(86)80010-4

14. Геодезичні на тривісному еліпсоїді. Вікіпедія. GeographicLib: Geodesics on a triaxial ellipsoid. geographiclib.sourceforge.io.

15. Bowring B.R. The central projection of the spheroid and the surface line. Surv. Rev. 1997, 34 (265): 163–173. https://doi.org/10.1179/sre.1997.34.265.163

16. Rainsford H. F. Long geodesics on the ellipsoid. Bulletin Géodésique. V. 37: 12–22 (1955). https://doi.org/10.1007/BF02527187

17. Sodano E.M. Inverse computation for long lines; a non-iterative method based on the true geodesic. Technical Report No. 7, Aug. (1950).

18. McCAW G.T. Empire Survey Review. Vol. II, 156–163, 346–352, 505–508.

19. Deakin R.E. and Hunter M.N. Geodesics on an ellipsoid – Bessel's Method. School of Mathematical & Geospatial Sciences, RMIT University, GPO Box 2476V, Melbourne, Australia. 3rd edition: July 2023. – 66 p.

20. Legeza V.P., Dychka I.A. Mathematical Modeling of Dynamic Processes in Connected Systems with Isochronic Roller Vibration Absorbers. Kyiv, "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 2024. – 208 p. ISBN 978-966-990-132-3

21. Eltsgolts L.P. Differential Equations and Variational Calculus. University Press of the Pacific. 2003. – 444 p. ISBN 978-141-021-067-8

Leheza V.P., Neshchadym O.M., Dychka A.I. DETERMINATION OF GEODESIC LINES ON A CYLINDRICAL SURFACE WITH A CYCLOIDAL CONSTITUENT

The shortest path between two points on the earth is called a geodesic. In the first set of problems, the search for the specified curves was carried out on the surface of the earth, which is where their name comes from. In such problems, the Earth was considered as an ellipsoid of rotation or a spheroid. Today, there are two sets of geodetic problems: 1). a direct task of finding the end point of a geodesic line by its starting point, initial azimuth and length; 2). the inverse problem of finding the shortest path between two given points on the surface of a spheroid. In the majority of previously solved problems, the trajectories of geodesic curves were determined on surfaces that have axial symmetry: an ellipsoid of rotation (spheroid), a sphere, a straight circular cylinder. For this, the numerical integration of the corresponding second-order differential equations that describe the shape of these curves was used. In modern research, new and improved algorithms and software complexes have been developed in relation to the speed and, most importantly, the accuracy of geodesic curve calculations.

In this work, the inverse problem is considered (in the second formulation), only instead of a spheroid, another surface was chosen for the study. The specified surface is transcendental and represents half of a horizontally located cylinder cut along the horizontal plane of symmetry, the direction of which is a cycloid, and the generators are parallel to the horizontal axis. A new calculus problem of finding geodesic lines on a transcendental surface was set and solved. The path functional is constructed and with the help of Euler's classical equations, the differential equation of the curve is obtained, which is integrated in a closed form. The algebraic equation of the spatial geodesic curve in the parametric form is established, which satisfies the given boundary conditions of the boundary value problem. A numerical experiment was conducted and the obtained results were visualized.

The results of the proposed study should be used to solve logistical and transport problems, in the design of sports facilities and attractions.

Key words: *geodesic curve, spheroid, cycloid, transcendental surface, calculus of variations, Euler equation, boundary value problem, logistics.*

УДК 621.746.2: 004.94
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/22

Маринич І.А.
Криворізький національний університет

Рубан С.А.
Криворізький національний університет

Харламенко В.Ю.
Криворізький національний університет

РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ РІВНЕМ МЕТАЛУ У ПРОМІЖНОМУ КОВШІ МАШИНІ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК НА БАЗІ РІШЕННЯ PHOENIX CONTACT

У сучасній металургійній промисловості значну увагу приділяють вдосконаленню технологічних процесів, спрямованих на підвищення якості продукції, зменшення витрат ресурсів і забезпечення стабільності виробничих операцій. Одним із ключових етапів у технології безперервного розливання заготовок є керування рівнем металу у проміжному ковші, що безпосередньо впливає на якість кінцевої продукції, рівномірність розливання та запобігання виникненню дефектів, а також визначає стабільність подачі металу в кристалізатор та запобігає виникненню дефектів у заготовках. Актуальність дослідження зумовлена зростаючими вимогами до якості металопродукції та необхідністю впровадження сучасних засобів автоматизації в умовах Industry 4.0. Розробка та впровадження систем візуалізації технологічного процесу є важливим кроком у напрямку цифровізації металургійного виробництва, що сприяє підвищенню його конкурентоспроможності. У статті наведено приклад реалізації системи візуалізації системи керування рівнем металу у проміжному ковші машини безперервного розливання заготовок, що забезпечить підвищення ефективності виробничого процесу, зменшення кількості браку, оптимізацію витрат ресурсів та покращення контролю якості продукції. Запропонований підхід базується на використанні сучасних технологій автоматизації та візуалізації, що відповідають концепціям Industry 4.0, і забезпечує інтеграцію системи керування з іншими елементами цифрового виробництва. У якості платформи для реалізації системи візуалізації технологічного процесу обрано ПЛК серії PLCnext від Phoenix Contact, так як в цілому платформа PLCnext є потужним інструментом для автоматизації металургійного виробництва, особливо в умовах переходу до концепції Industry 4.0. Її використання виправдане, якщо підприємство прагне підвищити ефективність, зменшити витрати та інтегрувати сучасні технології в існуючі процеси.

Ключові слова: *автоматизація, кристалізатор, машина безперервного лиття заготовок, проміжний ковш, промисловий контролер, система візуалізації, Industry 4.0, PLCNext, Phoenix Contact.*

Постановка проблеми. Застосування візуалізацій технологічних процесів є важливим інструментом для аналізу, оптимізації та контролю виробничих систем. Використання графічних інтерфейсів, анімацій, тривимірного моделювання та реального моніторингу дає змогу наочно представити складні процеси, виявити критичні точки і вчасно реагувати на можливі проблеми. Візуалізація дозволяє інженерам та операторам краще зрозуміти динаміку технологічних змін, відстежувати параметри в режимі реального часу та оцінювати вплив різних факторів на продуктивність системи. Зокрема, інтеграція таких інструментів у виробничі процеси сприяє підвищенню ефективності, скороченню простоїв обладнання та забезпеченню стабільної якості продукції [1].

Варто відзначити, що на підприємствах криворізького регіону вже склалися певні традиції, і так званий вендор-лист виробників апаратно-програмних засобів є незмінним протягом багатьох років. Так, для металургійного комбінату «АрселорМіттал Кривий Ріг» у вендор-лист постачальників устаткування систем автоматизації входять такі бренди, як Siemens, Schneider Electric та Rockwell Automation (Allen Bradley). Водночас, останнім часом деякі виробники представили достатньо потужні і революційні продукти, які дуже вразили своїми можливостями та

відкритістю під час навчання. У контексті цього, було вирішено розглянути можливість реалізації основного функціоналу системи, зокрема системи візуалізації технологічного процесу керування рівнем металу у проміжному ковші машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), з використанням ПЛК від Phoenix Contact.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробка та впровадження автоматизованих системи керування рівнем металу у проміжному ковші МБЛЗ, що будуть забезпечувати підвищення точності регулювання, стабільність технологічного процесу та якість кінцевого продукту досить актуальна.

В роботі [2] представлено результати досліджень кількісних моделей нестаціонарного потоку та переносу включень у процесі безперервного лиття сталі, а також їх застосування для підвищення розуміння і ефективності видалення частинок включень.

У статті [3] представлено модель передбачувального регулятора з повторювальною дією для компенсації періодичних збурень в промислових процесах. Також представлено симуляційне дослідження, яке охоплює кілька аспектів, пов'язаних із продуктивністю компенсації збурень, налаштуванням параметрів і впливом обмежень.

Метою роботи [4] є підтримання постійного рівня сталі в кристалізаторі шляхом застосування повторювальної структури, що складається з двох регуляторів: узагальненого передбачувального регулятора і повторювального з обмеженнями, для зменшення впливу збурень, таких як здуття, засмічення/прочищення і зміна швидкості лиття на рівень сталі. Тестування регулятора проводиться за допомогою моделювання нелінійної математичної моделі рівня сталі, яка була верифікована з використанням реальних даних сталеливарної промисловості.

Постановка завдання. Основна більшість робіт присвячена саме моделюванню або математичному опису технологічного процесу лиття заготовок. В даній роботі основна увага буде приділена саме розробці системи візуалізації технологічного процесу на базі ПЛК серії PLCnext від Phoenix Contac, так як застосування таких систем має ряд переваг.

Проведений аналіз досвіду використання платформи PLCnext Technology [5] у різних сферах виробництва показав, що дана платформа має багато переваг, які особливо проявляються в складних і динамічних галузях, таких як автоматизація металургійного виробництва.

Нижче наведено основні переваги, а також специфічні аспекти, які можуть бути корисними в металургії [5]:

– відкритість і масштабованість: PLCnext підтримує інтеграцію стороннього програмного забезпечення та стандартних мов програмування (C++, Python, Java і т.д.), поряд із класичними стандартами IEC 61131-3, що дозволяє поєднувати традиційні PLC-технології з сучасними IT-рішеннями;

– інтеграція з хмарними сервісами та IoT: вбудована підтримка хмарних сервісів (наприклад, AWS, Microsoft Azure) та протоколів IoT (MQTT, OPC UA) дає змогу ефективно збирати, аналізувати та обробляти дані, що особливо важливо для побудови «розумного» виробництва відповідно до концепції Industry 4.0;

– висока продуктивність: використання багатоядерних процесорів та операційної системи на базі Linux забезпечує виконання кількох програм одночасно, що дозволяє керувати складними технологічними процесами без втрат продуктивності;

– гнучкість у розробці: надається можливість використовувати різні середовища розробки та інтегрувати сучасні алгоритми (наприклад, штучний інтелект чи машинне навчання) без необхідності обмежуватися лише класичними мовами для ПЛК;

– кібербезпека: платформа відповідає сучасним вимогам до інформаційної безпеки, що є критично важливим для захисту виробничих даних у металургії.

– модульність і підтримка різних протоколів зв'язку: PLCnext легко інтегрується в існуючі системи завдяки підтримці PROFINET, Modbus, OPC UA та інших стандартів, що дозволяє підключати обладнання різних виробників і створювати гнучкі архітектури системи автоматизації.

З урахуванням того, що металургійне виробництво – це складна галузь із високими вимогами до стабільності, продуктивності та безпеки, є цілий ряд аргументів, які вказують на високий потенціал рішень на базі PLCnext Technology.

Водночас, платформа має і ряд недоліків, зокрема в контексті задач створення людиномашинних інтерфейсів. Зокрема, у випадках, коли потрібні дуже складні графічні інтерфейси або специфічні функції (наприклад, 3D-візуалізація), PLCnext Engineer може виявитися менш гнучким у порівнянні з рішеннями від Siemens WinCC [6] або Wonderware [7].

Крім того, варто відзначити і те, що у випадку, якщо компанія не планує використовувати контролери PLCnext, то інтеграція HMI через це ПЗ може бути менш ефективною і не виправдати витрати. Все ж таки проведений аналіз показує, що PLCnext Engineer найбільш ефективний для роботи в межах екосистеми Phoenix Contact. У проєктах із використанням обладнання інших виробників можуть виникати складнощі з інтеграцією.

Але, з урахуванням вище вказаного можна зробити загальний висновок, що в цілому платформа PLCnext є потужним інструментом для автоматизації металургійного виробництва, особливо в умовах переходу до концепції Industry 4.0. Її використання виправдане, якщо підприємство прагне підвищити ефективність, зменшити витрати та інтегрувати сучасні технології в існуючі процеси.

Виклад основного матеріалу. Стопор проміжного ковша може управлятися вручну або в автоматичному замкнутому контурі управління. Автоматичне керування замкнутим контуром використовується для підтримки заданого рівня металу під час процесу лиття.

З метою реалізації кнопки переключення між автоматичним та ручним режимом керування технологічним процесом використано графічний елемент Button, для якого виконано деякі налаштування.

Зокрема, кнопка при активованому автоматичному режимі роботи відображає іконку переключення у ручний режим, і навпаки – при активованому ручному режимі відображає іконку переключення в автоматичний режим. Для цього на першому етапі створено список зображень WorkModeImageList (рис. 1), що містить прив'язку зображень режимів роботи до значень тегів.

Дана дія виконується шляхом того, що на вкладці Components у вікні HMI у пункті Local з використанням контекстного меню обрано пункт Add Image List.

У вікні редагування списку зображень послідовно додані раніше завантажені зображення іконок у векторному форматі svg, що відповідають ручному та автоматичному режимі, та налаштовано їх відображення у залежності від значення тегу AUTO_MODE_INT типу INT, що відповідає за режим роботи системи (рис. 2).

На наступному кроці треба налаштувати анімацію зображення на кнопці переключення між режимами роботи при зміні значення тегу AUTO_MODE_INT. Для цього у властивостях обраної у редакторі кнопки треба перейти на вкладку Dynamics та додати нову анімацію типу Image->Image List, вказати назву пов'язаної змінної

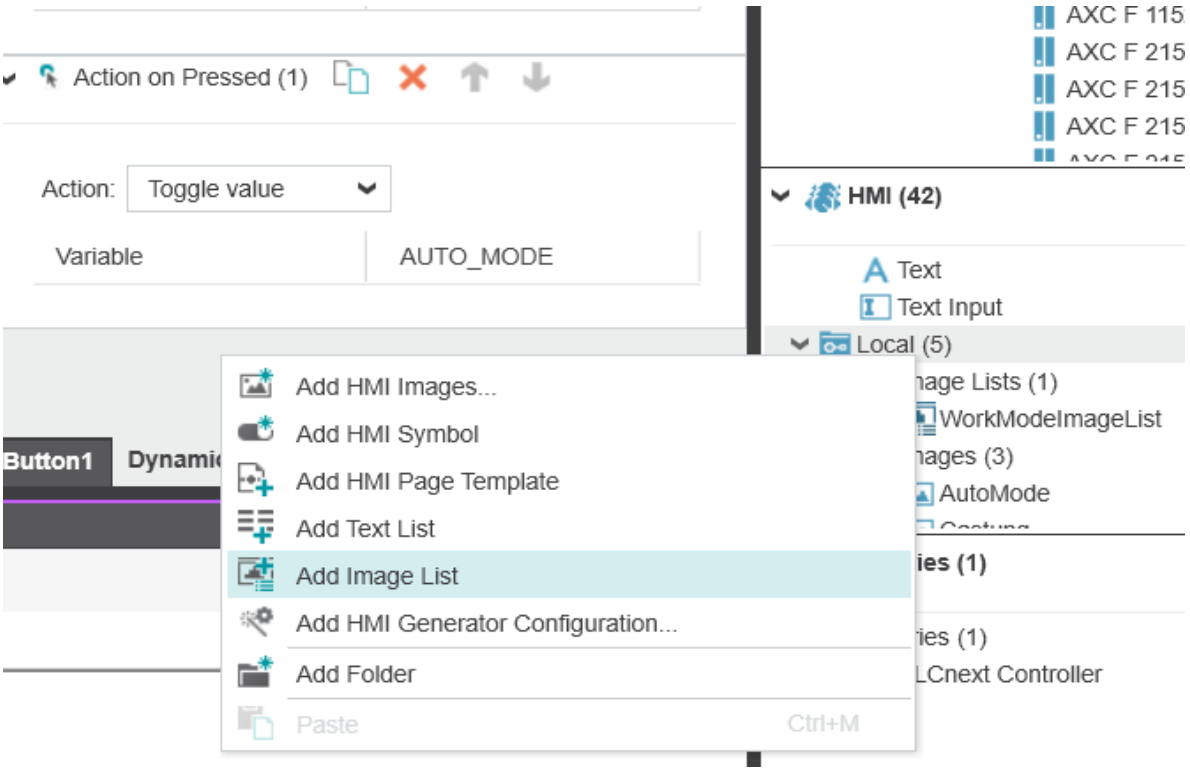


Рис. 1. Вікно додавання списку зображень

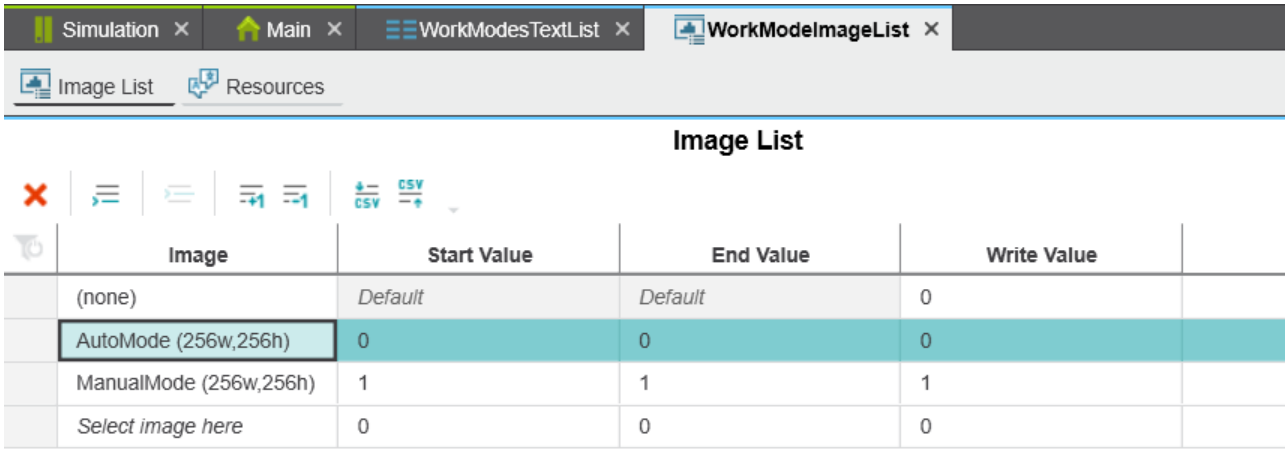


Рис. 2. Вікно редагування списку зображень та встановлення відповідності зображень зі значеннями пов'язаної змінної

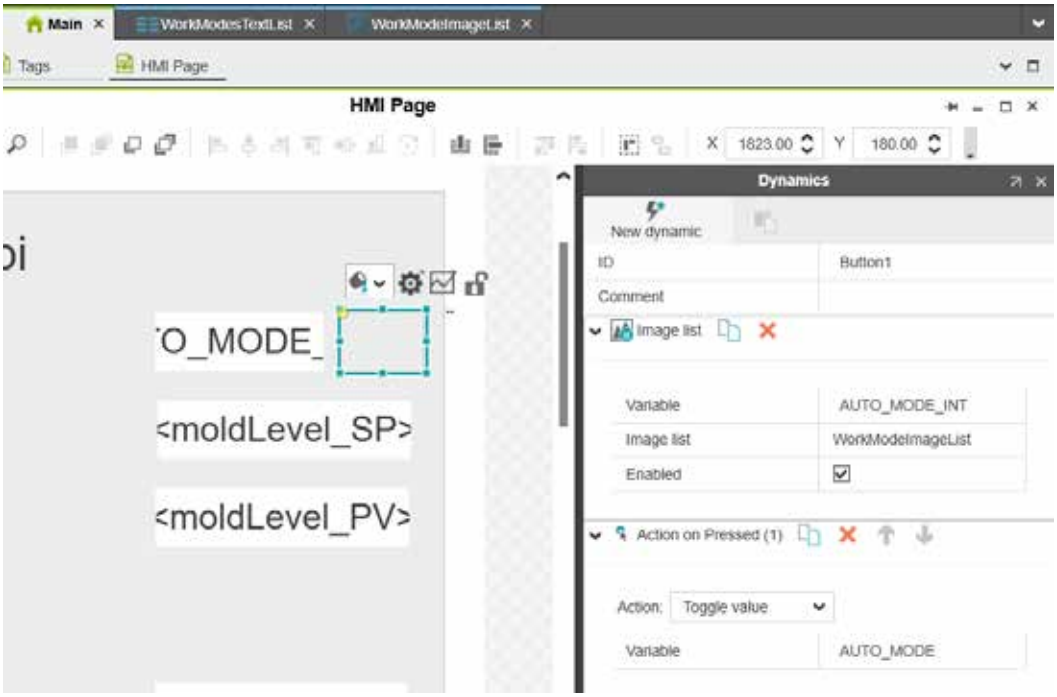


Рис. 3. Налаштування анімації зміни зображення кнопки в залежності від поточного режиму роботи

Variable (для даного випадку AUTO_MODE_INT), та обрати раніше створений список зображень (Image List) WorkModeImageList (рис. 3).

Також для кнопки потрібно прибрати значення властивості Text, а також налаштувати розміщення зображення по центру та заповнення доступного простору з масштабуванням при збереженні пропорцій зображення. Для цього у вікні властивостей кнопки встановлені наступні налаштування (рис. 4).

На рисунку 5 наведено результат тестування зміни зображення при активованому автоматичному режимі (відображається іконка руки -переключення на ручний режим).

Переключення режиму роботи має відбуватися по натисненню на кнопку. З цією метою у вікні властивостей кнопки на вкладці Dynamics (рис. 6) додано анімацію типу Action->Action on Pressed (тобто дія при натисканні на кнопку), і налаштовано виконання дії переключення значення (Toggle value) та указано, для якої саме змінної логічного типу (у нашому випадку це AUTO_MODE).

Для відображення обраного режиму роботи за допомогою тексту також потрібно додати анімацію типу Text->Text List до відповідного графічного примітиву типу Text (рис. 7). Як видно, властивість Список текстів (Text list) прив'язана до об'єкту WorkModesTextList.

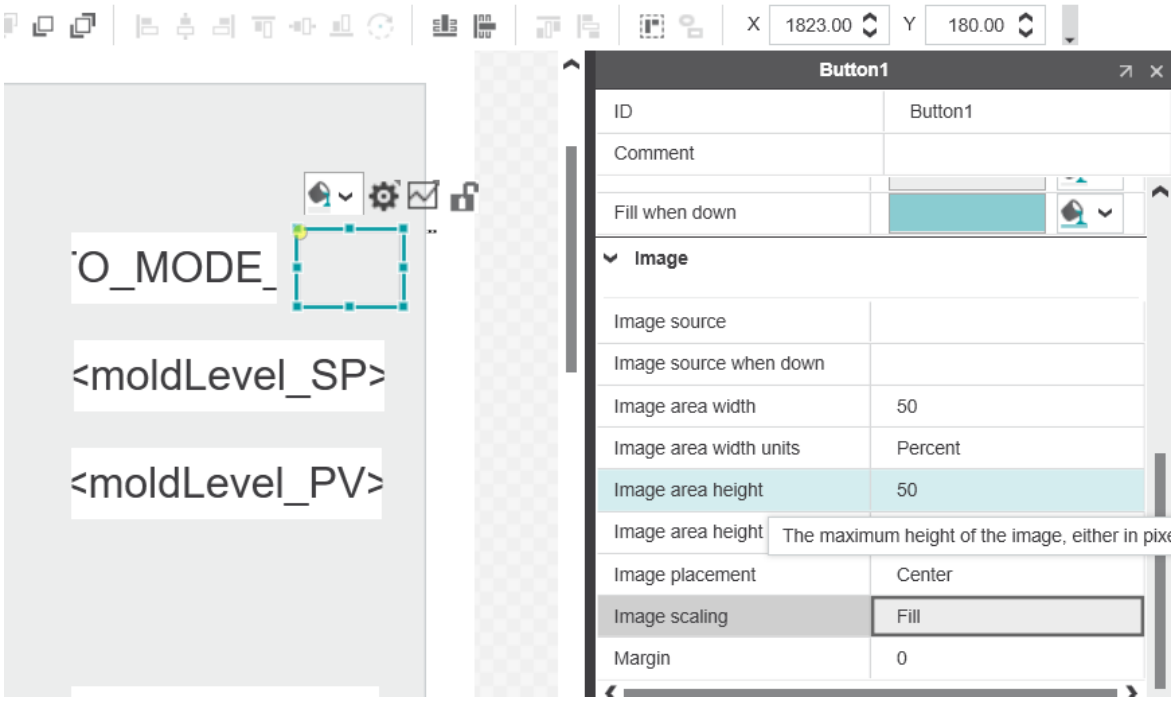


Рис. 4. Основні налаштування кнопки для відображення анімації зміни зображення

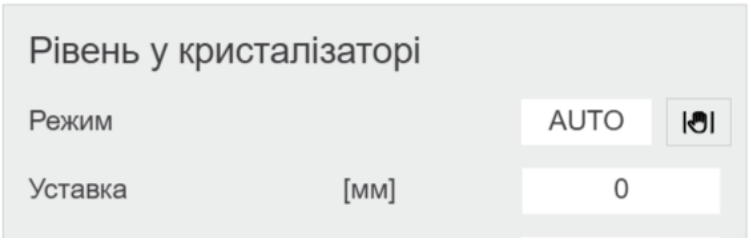


Рис. 5. Результати тестування анімації кнопки при автоматичному режимі роботи

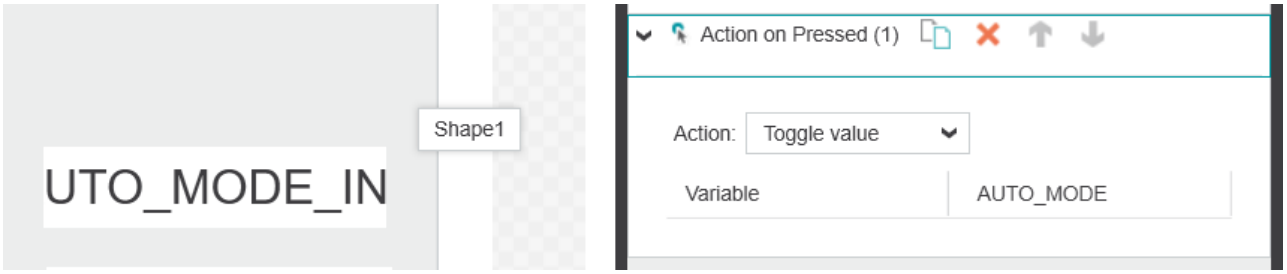


Рис. 6. Пов'язування кнопки з дією переключення значення логічної змінної AUTO_MODE

Для створення списку текстів на вкладці Components у вікні HMI у пункті Local контекстного меню потрібно обрано пункт Add Text List і у вікні, що відкриється, додати текстові значення та значення змінної, які їм відповідають (рис. 8).

Особливістю компонентів, що використовуються для реалізації анімації за списками у PLCnext є те, що вони, зазвичай, прив'язуються до аналогових змінних (наприклад, цілочисельного типу INT). З урахуванням того, що для керування режимом роботи використовується логічна змінна (тип BOOL) AUTO_MODE, у основній програмі в блоці main, що виконується у головному циклі, потрібно виконувати перетворення з логічного типу до цілого. Для цього використовується одна з стандартних функцій конвертації з бібліотеки IEC-61131-3 Data Type Convertions з назвою TO_INT.

На головній сторінці передбачено відображення інтервалу часу від початку розливки

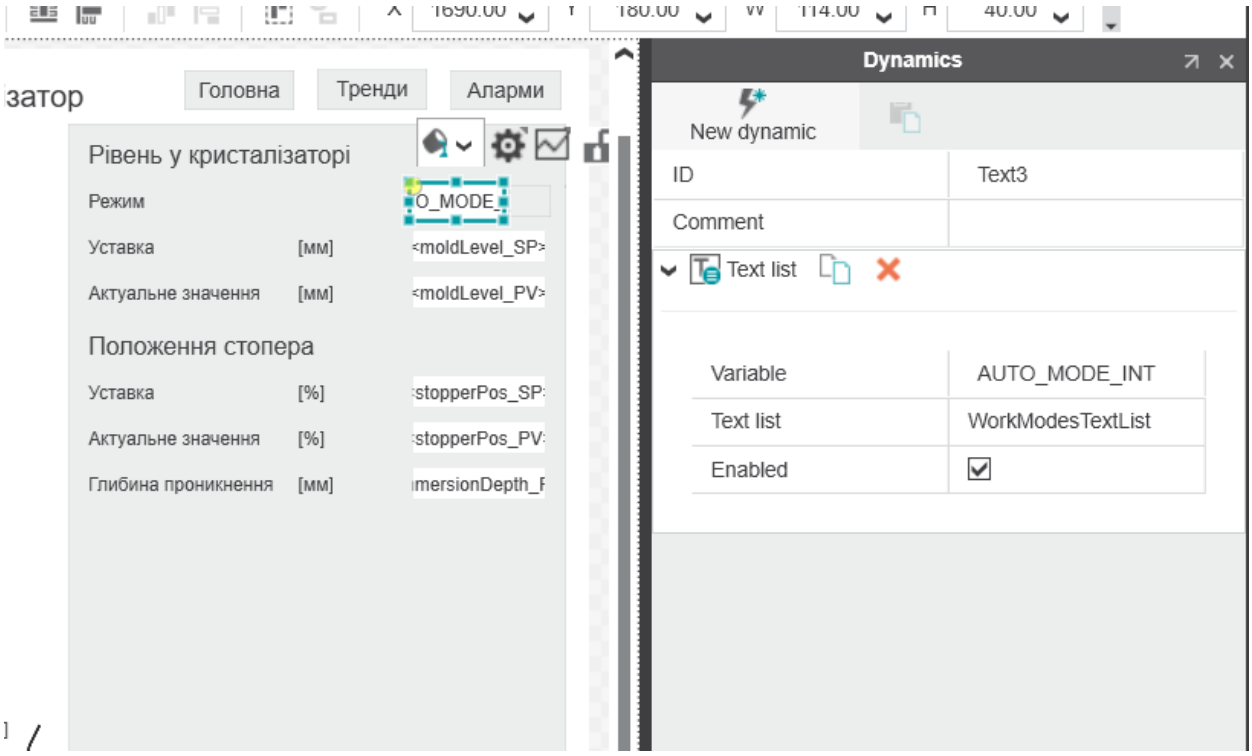


Рис. 7. Налаштування анімації зміни тексту відображення режиму роботи

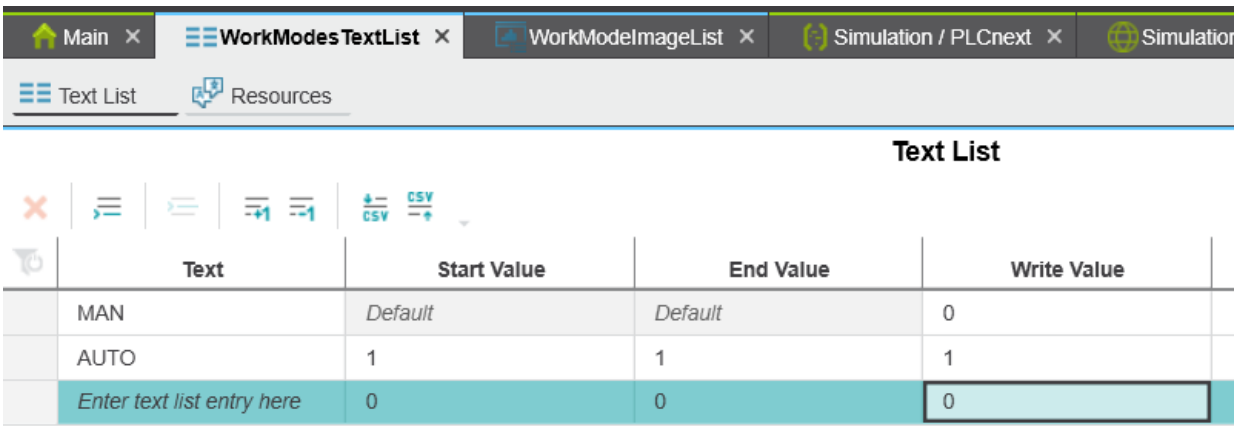


Рис. 8. Вікно редагування списку текстів та встановлення відповідності елементів зі значеннями пов'язаної змінної

металу до поточного моменту часу. Для цього використовується змінна CastTimeLTOD типу даних LTIME_OF_DAY, яка обчислюється на кожному циклі роботи блоку main як різниця між часом початку розливки та поточним часом. Для подальшого відображення на сторінці отримане значення перетворюється у змінну CastTime_Str типу STRING з використанням функції TO_STRING з вказанням потрібного формату відображення значення (у нашому випадку ми відображаємо години, хвилини та секунди за допомогою шаблону `{0:HH:mm:ss}` (рис. 9).

На рисунку 10 наведено сторінку Main системи візуалізації у редакторі HMI-сторінок додатку PLCnext Engineer. Дана сторінка використовується у якості стартової для проєкту (встановлена як Startup Page) і відображається після аутентифікації користувача.

Також на ньому відображається, зокрема, і прив'язка полів до змінних, визначених у блоках коду проєкту, тож можна встановити, які саме параметри будуть відображатися під час роботи системи SCADA у режимі виконання (у runtime).

Перелік основних змінних блоку main програми ПЛК наведено на рисунку 11. Як видно,

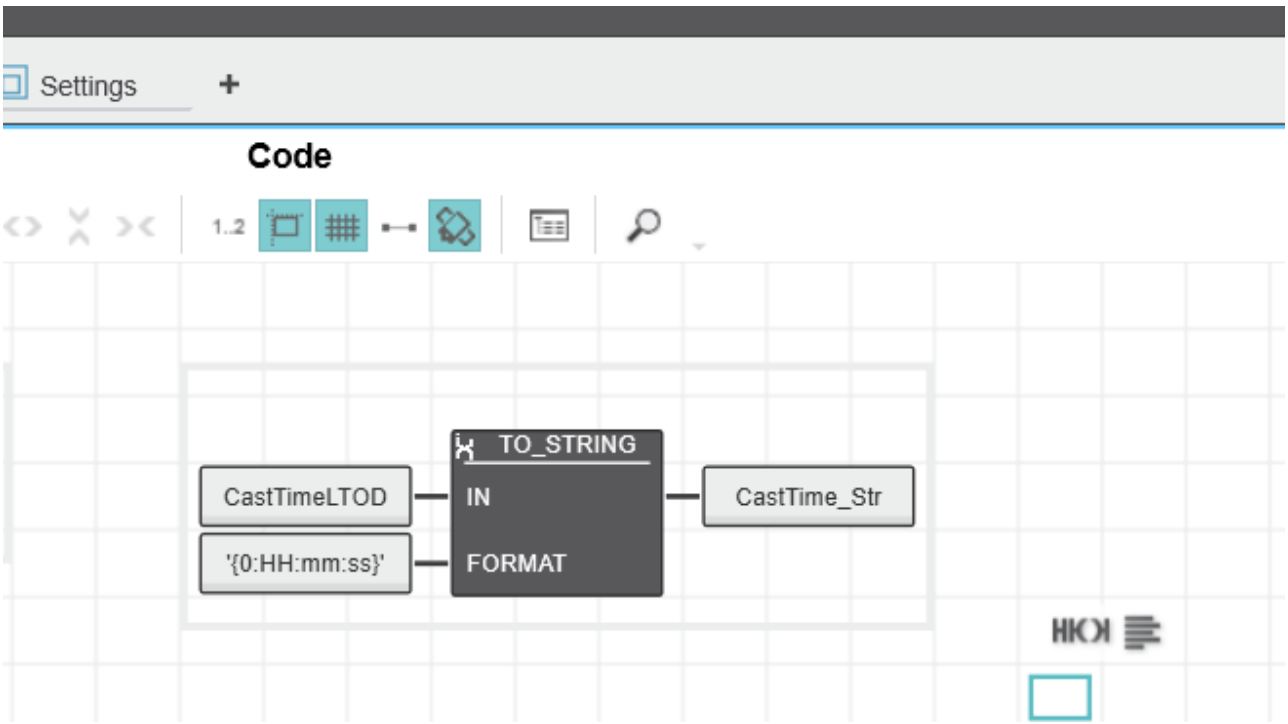


Рис. 9. Блок коду функції main для перетворення змінної, що зберігає час розливки, у рядковий тип для використання у системі візуалізації

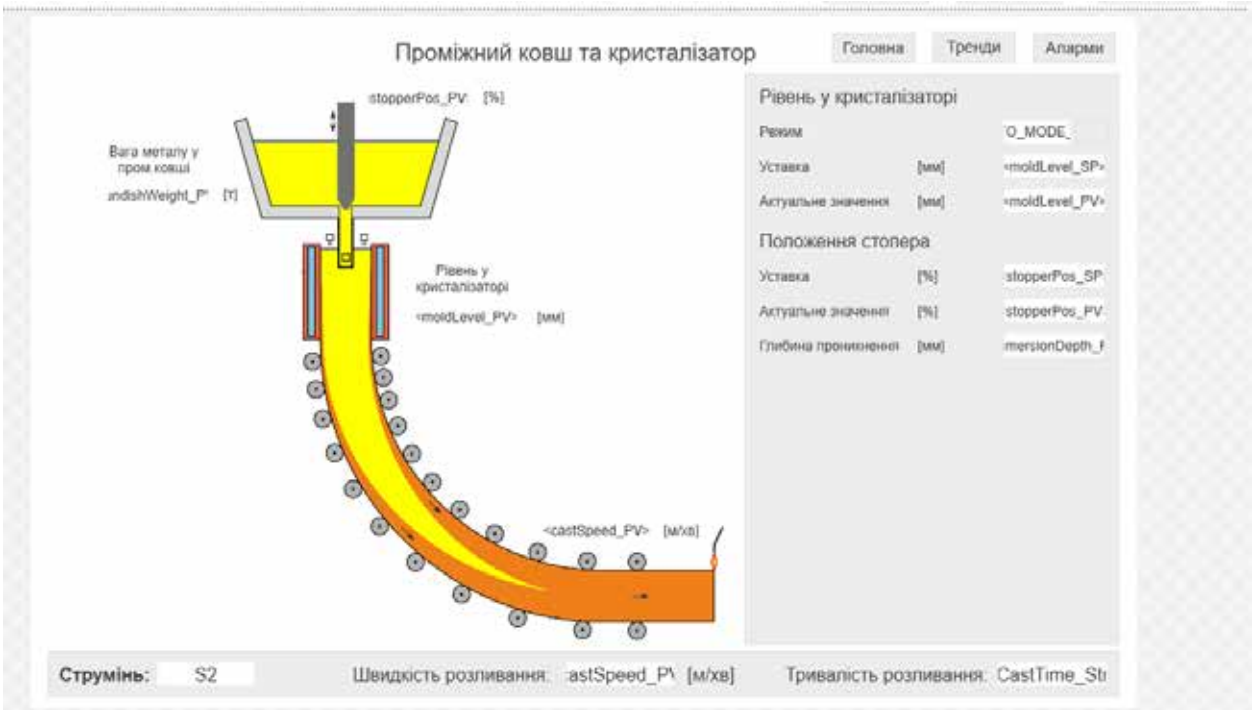
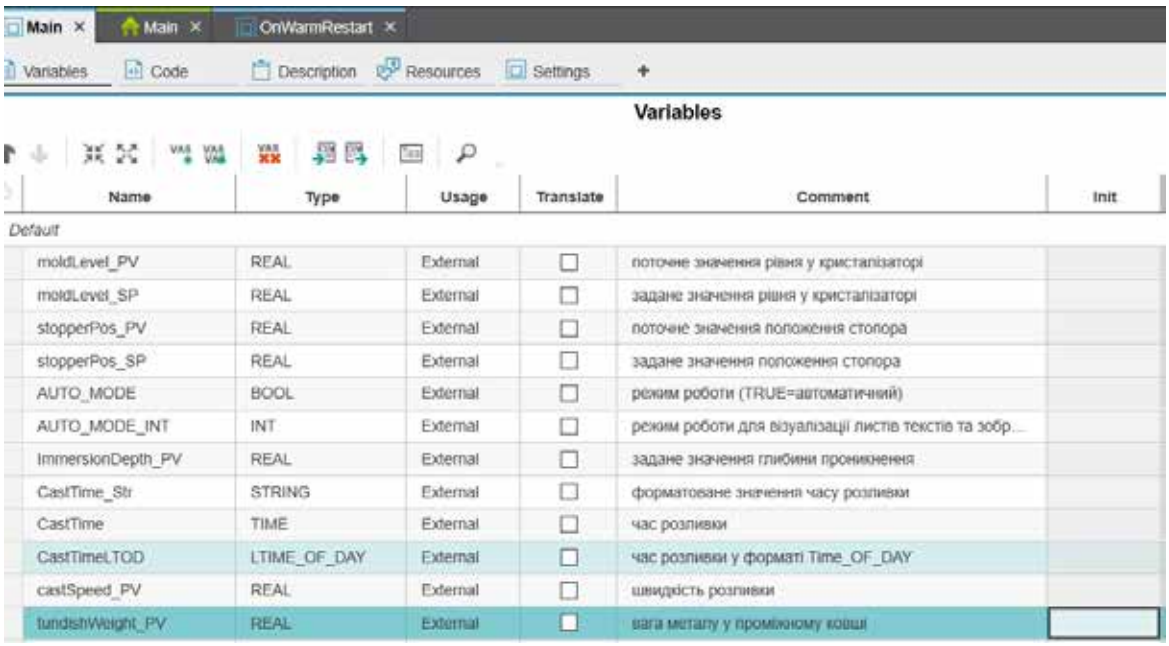


Рис. 10. Сторінка візуалізації стану проміжного ковша та кристалізатора з прив'язкою анімованих змінних

для кожної змінної вказано тип. Також більшість змінних має значення атрибуту Usage External, що дозволяє використовувати даних атрибут не тільки у даному блоці, а і у інших блоках організації програми (POU, program organization unit). У полі Comment задано короткий опис призначення змінної та її ролі у проєкті програмного забезпечення, що спрощує подальшу підтримку коду.

На рисунку 12 наведено зовнішній вигляд запущеного проєкту візуалізації у браузері. Як



Name	Type	Usage	Translate	Comment	Init
Default					
moldLevel_PV	REAL	External	☐	поточне значення рівня у кристалізаторі	
moldLevel_SP	REAL	External	☐	задане значення рівня у кристалізаторі	
stopperPos_PV	REAL	External	☐	поточне значення положення стопора	
stopperPos_SP	REAL	External	☐	задане значення положення стопора	
AUTO_MODE	BOOL	External	☐	режим роботи (TRUE=автоматичний)	
AUTO_MODE_INT	INT	External	☐	режим роботи для візуалізації листів текстів та зобр...	
ImmersionDepth_PV	REAL	External	☐	задане значення глибини проникнення	
CastTime_Str	STRING	External	☐	форматоване значення часу розливки	
CastTime	TIME	External	☐	час розливки	
CastTimeLTOD	LTIME_OF_DAY	External	☐	час розливки у форматі Time_OF_DAY	
castSpeed_PV	REAL	External	☐	швидкість розливки	
tundishWeight_PV	REAL	External	☐	вага металу у проміжному ковші	

Рис. 11. Вкладка Variables з описом основних змінних блоку main програми ПЛК

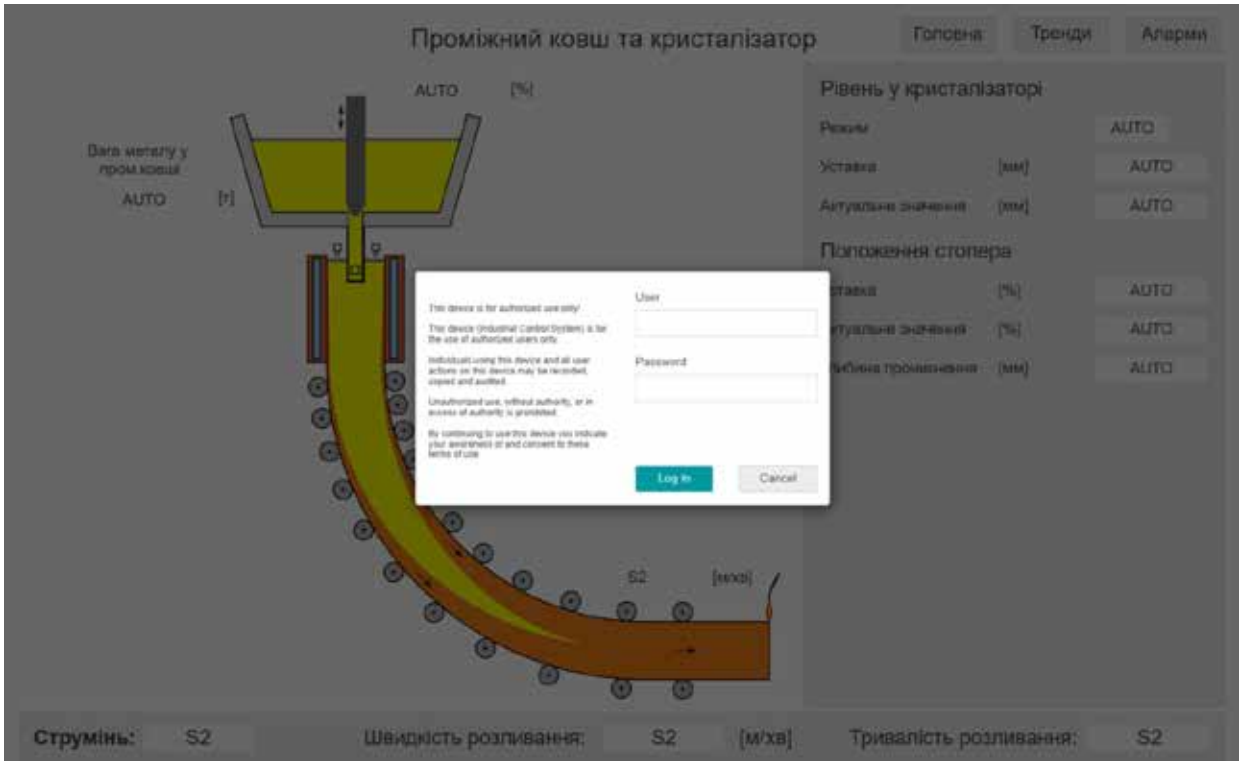


Рис. 12. Вікно авторизації користувача

видно з рисунку, при вході до системи користувачу потрібно ввести свій логін і пароль, за рахунок чого відбувається авторизація користувача та розмежування доступу до функціоналу системи диспетчерського контролю та керування.

Головну сторінку системи візуалізації після входу користувача представлено на рисунку 13.

Як видно, розроблена система дозволяє переглянути основні параметри технологічного процесу, їх уставки та поточні значення, перемикатись між автоматичним та ручним режимом керування стопором проміжного ковшу тощо. Інтерфейс системи розроблявся з урахуванням вимог стандарту ISA-101 та концепції ситуаційної обізнаності оператора.

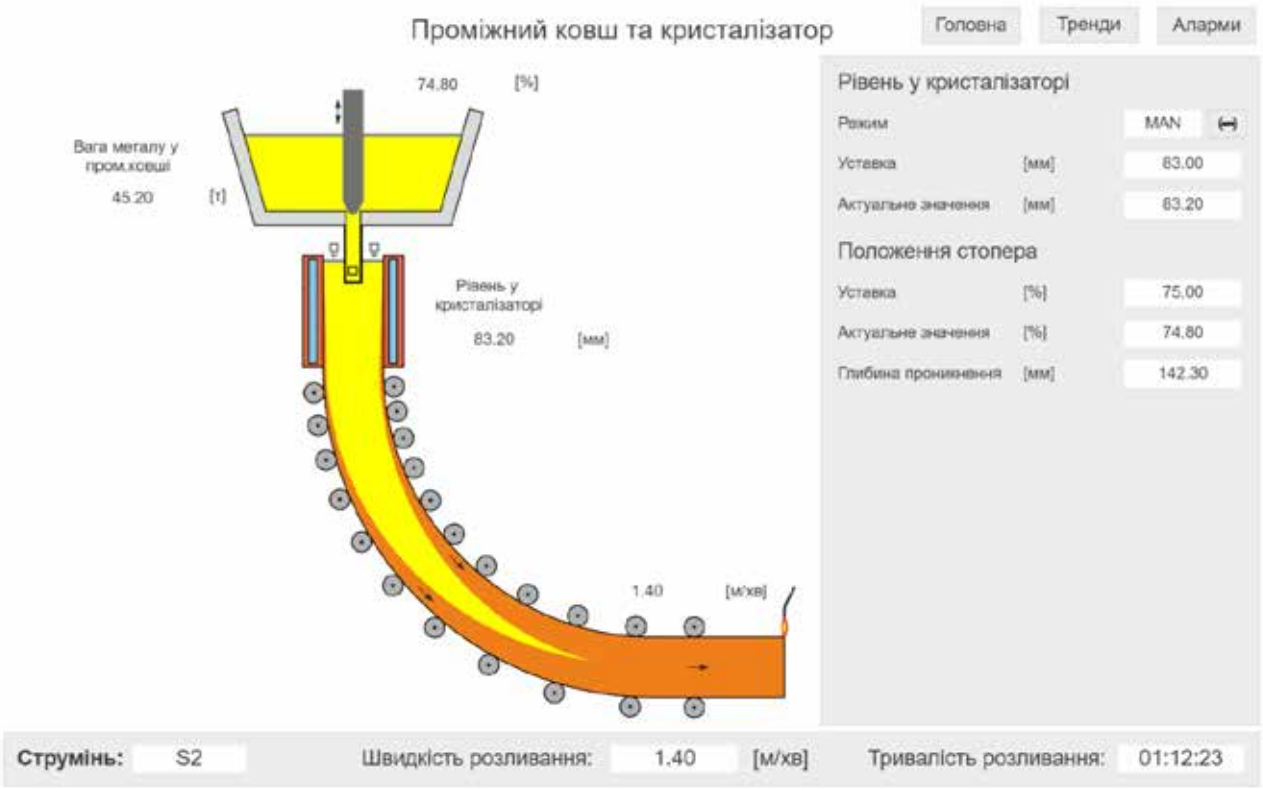


Рис. 13. Головна сторінка розробленої системи візуалізації технологічного процесу керування рівнем у проміжному ковші та кристалізаторі МБЛЗ

Висновки. На основі аналізу основних тенденцій розвитку систем автоматизації металургійного виробництва визначено перспективність застосування платформи PLCnext та програмного забезпечення PLCnext Engineer для реалізації функцій диспетчерського контролю та керування рівнем металу у проміжному ковші МБЛЗ. Головними критеріями вибору даної платформи слугували висока швидкодія, відкритість, підтримка мережевих протоколів та сучасних технологій інтеграції, відповідність тенденціям концепції Industry 4.0.

З використанням інструментального програмного забезпечення PLCnext Engineer розроблено проєкт системи візуалізації процесу керування рівнем металу у проміжному ковші та кристалізаторі МБЛЗ. Проведена практична апробація розробленої системи з використанням симулятора ПЛК показала зручність та ефективність прийнятих проєктних рішень. Водночас, не всі заплановані функції вдалося реалізувати через обмеженість доступних безкоштовно версій ПЛК для симуляції. Це, зокрема, не дало у повній мірі розгорнути та протестувати підсистему тривог (алармів), оскільки сервер алармів доступний лише в останніх версіях процесорних модулів, під яких немає безкоштовних симуляторів.

Список літератури:

1. Архипов В. В. Інформаційні технології в промислових системах. Харків : УкрНТЕІ, 2021. 290 с.

2. Thomas B. G., Yuan Q., Zhang L., Vanka S. P. Flow dynamics and inclusion transport in continuous casting of steel. *NSF design, service, and manufacturing grantees and research conf.* 2003. P.2328 – 2362.

3. Cruz D. M, Normey-Rico J. E, Costa-Castelló R. Repetitive model based predictive controller to reject periodic disturbances. *19th IFAC World Congress Proceedings.* 2014. Vol. 47. № 3. P. 11494–11499. https://doi.org/10.3182/2014 0824-6-ZA-1003.01948

4. Pereira R., Almeida G., Salles J., Cuadros M., Valadão C., Bastos-Filho T. A Model-Based Predictive Controller of the Level of Steel in the Mold with Disturbances Using a Repetitive Structure. *Metals.* 2021. Vol.11. № 9. P.1458. https://doi.org/10.3390/met11091458

5. PLCnext Engineer online help. PLCnext Engineer online help: веб-сайт. URL: https://engineer.plcnext.help (дата звернення: 16.01.2025).

6. SIMATIC STEP 7 Basic/Professional V17 and SIMATIC WinCC V17. Siemens Product Information: веб-сайт. URL: https://www.industry-mobile-support.siemens-info.com/en/article/detail/109798671 (дата звернення: 16.01.2025).

7. AVEVA™ System Platform Get Started 2023 R2. AVEVA Documentation. URL: https://docs.aveva.com/bundle/sp-getstarted-2023-r2/resource/sp-getstarted-2023-r2.pdf (дата звернення: 16.01.2025).

Marynych I.A., Ruban S.A. Kharlamenko V.Yu. IMPLEMENTATION OF A VISUALIZATION SYSTEM FOR THE PROCESS OF CONTROLLING THE METAL LEVEL IN THE TUNDISH OF A CONTINUOUS CASTING MACHINE BASED ON A PHOENIX CONTACT SOLUTION

In the modern metallurgical industry, considerable attention is paid to improving technological processes aimed at enhancing product quality, reducing resource consumption, and ensuring the stability of production operations. One of the key stages in the continuous casting technology is the control of the metal level in the tundish, which directly affects the quality of the final product, casting uniformity, and defect prevention. Additionally, it determines the stability of metal supply to the mold and prevents defects in the billets. The relevance of this study is driven by the increasing demands for metal product quality and the need to implement modern automation tools within the framework of Industry 4.0. The development and implementation of process visualization systems represent an essential step toward the digitalization of metallurgical production, contributing to its competitiveness. The article presents an example of the implementation of a visualization system for controlling the metal level in the tundish of a continuous casting machine, which ensures increased production efficiency, reduced defects, optimized resource consumption, and improved product quality control. The proposed approach is based on the use of modern automation and visualization technologies that align with Industry 4.0 concepts, enabling the integration of the control system with other elements of digital production. The PLCnext series from Phoenix Contact was chosen as the platform for implementing the visualization system of the technological process. Overall, the PLCnext platform is a powerful tool for automating metallurgical production, especially in the transition to Industry 4.0. Its use is justified for enterprises aiming to increase efficiency, reduce costs, and integrate modern technologies into existing processes.

Key words: *automation, mold, continuous casting machine, tundish, industrial controller, visualization system, Industry 4.0, PLCNext, Phoenix Contact.*

УДК 004.42
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/23

Нікітченко М.І.
Національний університет «Одеська політехніка»

ДВОРІВНЕВА АРХІТЕКТУРА UML НА ОСНОВІ ГІБРИДНОГО ФОРМАТУ JSON І XMI

Стаття розкриває гібридний підхід до зберігання UML-моделей, що поєднує офіційний стандарт XMI з легким JSON-представленням. Такий формат дає змогу ефективно працювати з «базовими» елементами (класи, атрибути, операції) у вигляді JSON, а складні поведінкові аспекти (діаграми станів, діяльності тощо) відображати у фрагментах XMI. Запропонована дворівнева схема доповнена модулем валідації, покликаним забезпечити узгодженість між обома рівнями моделі та попередити розсинхронізацію.

У роботі наведено приклади інтеграції з популярними UML-редакторами (StarUML, EnterpriseArchitect, PlantUML) та IDE. Показано, як StarUML може інтерпретувати JSON із вбудованими XMI-вставками, а EnterpriseArchitect – працювати з повноцінним XMI, куди за потреби перетворюються JSON-дані «на льоту». Згадано типову послідовність використання: спочатку для швидких змін та прототипування задіяно «легкий» JSON, а з наростанням складності в модель додаються XMI-фрагменти з детальною поведінкою.

Автор детально обговорює переваги такого підходу. Серед них – прискорене прототипування, збереження формальної точності для складних частин, можливість безболісної генерації коду й здійснення реверс-інжинірингу. При цьому визнається, що дворівнева архітектура є складнішою в реалізації, потребує налаштування конвертерів для зв'язку JSON та XMI й може ускладнювати роботу над моделлю у великих командах, коли зміни паралельно вносяться в обидва формати. Також окремі інструменти не підтримують «частковий» імпорт XMI, що спонукає до створення додаткових модулів чи адаптерів.

У підсумку гібридний формат постає як компромісне рішення: він дає змогу зберігати потрібну деталізацію UML-моделей, не відмовляючись від простоти JSON-редагування. Це особливо актуально в сучасних проектах, що швидко розвиваються й потребують синхронізації між UML-діаграмами, IDE та фактичним кодом. Застосування такого підходу сприяє підвищенню ефективності розробки складних програмних систем, поєднуючи швидкість внесення змін і глибоку специфікацію поведінкових аспектів.

Ключові слова: *гібридний формат, JSON, XMI, інтеграція з IDE, автоматична генерація коду, валідація, розширення UML-інструментів, моделювання програмного забезпечення.*

Постановка завдання. Сучасні програмні системи часто вирізняються підвищеною складністю [1] та розподіленою структурою, що вимагає найефективніших підходів до їхнього проектування, аналізу та супроводу. У зв'язку з цим мова UML (Unified Modeling Language) стає найважливішим інструментом формалізації вимог і візуалізації архітектури [2-3]. У разі збільшення масштабу проектів постає питання оптимального зберігання і редагування UML-моделей, а також забезпечення їхньої інтеграції з різними інструментами розробки, що підкреслюється і в контексті Model-Driven Architecture [4-5]. На практиці істотними факторами виявляються як багатство формального опису, що дає змогу глибоко опрацьовувати аспекти поведінки та взаємодії компонентів, так і зручність швидкого внесення змін. Формати XMI і JSON, згадані раніше у роботі [6], по-різному задовольняють ці критерії: перший забезпечує деталізований опис UML-елементів, а другий спрощує ручне редагування. Однак жоден із них не дає універсального рішення, задовольняючи одночасно потреби у високій формальній точності та гнучкості інтеграції, особливо в умовах сучасних IDE. Звідси виникає завдання пошуку формату, здатного поєднувати формальну потужність XMI з легкістю і наочністю JSON. Актуальність цього завдання визначається безпосередньо потребою в прискоренні темпів розробки та скороченні ризиків, пов'язаних із неповнотою або неузгодженістю проектної документації.

Основна мета цієї роботи полягає в розробці архітектури, що дає змогу одночасно враховувати переваги XMI і JSON під час опису UML-моделей. Передбачається, що створюване рішення спростить процес редагування і, водночас, збереже

високий ступінь відповідності специфікації UML для складних сценаріїв, пов'язаних із поведінкою системи. З урахуванням сформульованої мети виникає необхідність розв'язати низку питань: яким чином структурувати дані, щоб у базових випадках зберігати зручність JSON, а для складних UML-елементів запроваджувати механізми деталізованого опису XMI; як адаптувати цю структуру до вже наявних UML-інструментів і середовищ розробки; а також як забезпечити баланс між формальною виразністю і швидкістю внесення змін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найвідоміші інструменти для роботи з UML-моделями істотно різняться за форматом зберігання, наборами підтримуваних діаграм і рівнем інтеграції із зовнішніми системами.

StarUML застосовує JSON-подібний формат, що полегшує внесення правок, але ускладнює опис складних аспектів поведінки. EnterpriseArchitect, спираючись на XMI, добре масштабується для великих проєктів, проте може бути громіздким у невеликих динамічних командах. PlantUML використовує текстовий синтаксис, що дозволяє швидко генерувати діаграми, але не повністю покриває специфікацію UML. У підсумку кожне з рішень спеціалізується на своєму завданні і не дає універсального балансу між докладним моделюванням і зручністю редагування.

Нижче наведено порівняльну таблицю ключових характеристик трьох популярних рішень (табл. 1).

Тим не менш, на практиці формат XMI часто виявляється великоваговим, тоді як JSON і текстові описи втрачають формальну повноту, особливо під час моделювання поведінки. Додатково IDE вимагають надійної синхронізації UML-моделей із кодом, що ускладнюється за відсутності єдиного стандартизованого представлення всіх аспектів. Усе це вказує на потребу в гібридному підході, що поєднує деталізовану специфікацію і простоту правок, а також враховує щоденну роботу розробників у сучаснихIDE.

Постановка завдання. Інструменти, засновані на XMI, розв'язують задачу перенесення даних між складними системами моделювання, але створюють труднощі в умовах швидких змін. Підходи, що спираються на JSON, вдалі на стадії прототипування, проте обмежені в описі поведінкових діаграм. Потрібен єдиний формат, що дає змогу гнучко керувати моделлю і підтримувати інтеграцію з IDE, не втрачаючи сумісності з великими CASE-засобами.

Для усунення перерахованих обмежень запропоновано гібридний формат, який зберігає базові елементи UML (класи, атрибути, операції) у JSON, який можна прочитати людиною, а розширені аспекти (діаграми станів, діяльності) – у фрагментах, які відповідають структурі XMI. Передбачається, що така архітектура забезпечить зручність редагування і дасть змогу автоматично генерувати формальну специфікацію для взаємодії з великими UML-інструментами.

Ключовими показниками ефективності стануть зручність ручного редагування, сумісність з EnterpriseArchitect і StarUML, а також здатність відображати поведінкові діаграми без втрати даних. Обмеження полягають в ускладненій процедурі парсингу гібридного формату та потенційній необхідності адаптації в IDE, що не підтримують частковий імпорт XMI.

Виклад основного матеріалу. Як уже було викладено в [7], ідея полягає в тому, щоб зберігати просту інформацію в JSON, а складні елементи UML передавати у вигляді XMI-вставок. Нижче наведено приклад, де клас «Example» описується в JSON, а для асоціацій використовується XMI-фрагмент.

Таблиця 1

Порівняння інструментів для роботи з UML

Інструмент	Формат збереження	Основна область використання	Рівень інтеграції	Переваги / обмеження
StarUML	JSON (пропрієтарна структура)	Швидке прототипування та редагування	Базові плагіни для IDE	Простий для читання формат; можлива підтримка редагування скриптів. Обмежено деталізація моделей.
Enterprise Architect	XMI (у різних варіантах)	Великі корпоративні проекти, детальні UML-діаграми	Розширені плагіни та API	Глибока підтримка UML специфікації; широкі можливості реверс-інжинірингу. Важко редагувати вручну.
PlantUML	Текстовий формат (псевдо-UML)	Візуалізація та вбудовування у CI/CD, IDE	Широкі плагіни та додаткові розширення.	Зручний для створення діаграм за текстовими скриптами; слабо підходить для просунутої специфікації UML.

```
{
  "_type": "UMLClass",
  "name": "Example",
  "attributes": [
    {
      "name": "username",
      "type": "String"
    }
  ],
  "complexRelations": "<xmi:Relationxmi:type=
\"uml:Association\" source=\"class1\" target=
\"class2\" />"
}
```

Завдяки цьому JSON залишається зручним для швидкого редагування та візуалізації, а XMI зберігає складні поведінкові діаграми. Щоб уникнути невідповідностей, у системі передбачають два рівні зберігання (JSON і XMI) і модуль валідації. Він стежить, щоб під час змін в одній частині моделі оновлювалися відповідні посилання в іншій.

Для сумісності зі StarUML достатньо доповнювати JSON XMI-вставками. EnterpriseArchitect імпортує та експортує XMI, куди за потреби конвертуються JSON-дані. PlantUML, з його текстовими діаграмами, здебільшого використовує базові структури з JSON і може ігнорувати фрагменти, що не розпізнаються. Завдяки цьому не потрібно переходити цілком на XMI, якщо розробка йде зручно в JSON, але за необхідності доступна повна специфікація UML.

В IDE зазвичай реалізують пряму генерацію коду і зворотне проектування. Гібридний підхід розширює ці можливості: базові елементи (класи і методи) зберігаються в JSON, а детальні поведінкові сценарії – в XMI. Для синхронізації створюють API або конвертер, який відображає зміни IDE в «легкій» частині і, за необхідності, оновлює XMI-фрагменти. Це дає змогу уникнути пошкодження складних діаграм і знижує ризик розсинхронізації, оскільки JSON і XMI обслуговуються паралельно, але пов'язані спільною моделлю.

В основі пропонованої системи лежить дворівнева модель, у якій перший рівень відповідає за роботу з JSON-описами базових UML-елементів, а другий – за зберігання розширених поведінкових конструкцій у форматі XMI. Ці рівні взаємодіють через модуль валідації, що перевіряє узгодженість і взаємозв'язки між сегментами. Поряд із ним вводять модуль інтеграції із зовнішніми застосунками (UML-інструментами та IDE), який забезпечує експорт та імпорт гібридних даних у відповідному для кожного інструменту поданні.

Умовно на схемі (Рис. 1) можна виділити шість функціональних блоків:

1. сховище JSON-даних, що містить інформацію про класи, інтерфейси і прості відносини;

2. сховище XMI-фрагментів, що містить детально описані діаграми станів, діяльності та інші складні елементи;

3. модуль обробки JSON, що виконує операції парсингу та серіалізації базових структур UML-моделі;

4. модуль обробки XMI, що відповідає за розбір і генерацію розгалужених поведінкових діаграм;

5. модуль валідації та синхронізації, що координує взаємодію між JSON- і XMI-рівнями, стежачи за несуперечливістю посилань і відповідністю специфікації UML;

6. модуль інтеграції із зовнішніми інструментами, що за потреби дає змогу трансформувати гібридний формат у «чистий» XMI або в JSON-структури для подальшого використання в StarUML, EnterpriseArchitect, PlantUML і IDE.

На практиці ці блоки являють собою взаємопов'язані компоненти, що працюють поверх загального представлення UML-моделі. Перехід між JSON і XMI здійснюється прозоро для основних сценаріїв, так що користувач або IDE можуть не помічати внутрішньої складної структури. При цьому формально кожне оновлення в одному рівні відображається в другому через механізми синхронізації та валідації.

У процесі роботи системи модулі здійснюють низку послідовних кроків. Коли користувач вносить зміни в структуру діаграми (наприклад, додає новий клас або атрибут), система оновлює JSON-сегмент, оскільки базові елементи зберігаються саме в ньому. Якщо ці зміни зачіпають поведінку (додавання станів або переходів), механізм звертається до XMI-рівня: він або створює нову XMI-структуру для новоствореної поведінки, або коригує вже наявну. Аналогічна схема застосовується під час завантаження моделі із зовнішнього джерела. Якщо імпортується «важкий» XMI-файл, модуль обробки XMI зберігає всі поведінкові діаграми в тому самому форматі, а базові відомості про класи та зв'язки передає в JSON-сегмент, перетворюючи їх на спрощений вигляд.

Роль модуля валідації полягає в тому, щоб під час кожного циклу змін упевнитися, що об'єкти, згадані в XMI, узгоджуються з їхніми «заглушками» в JSON. Наприклад, якщо в поведінко-

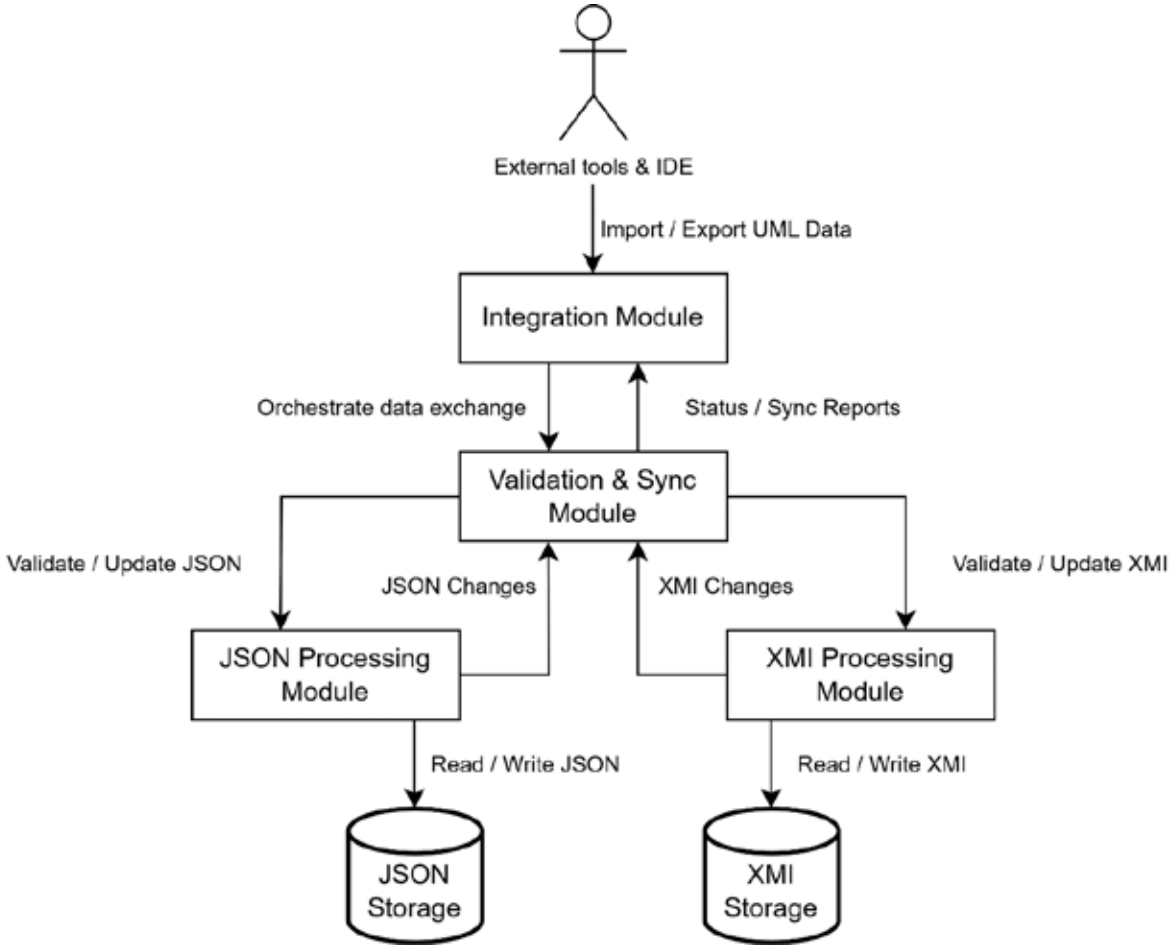


Рис. 1. Архітектурна модель системи

вій діаграмі XMI з'являється новий елемент, що відповідає методу класу, модуль перевіряє, чи є згадка про такий метод у JSON-частині; у разі потреби оновлює його або формує попередження про невідповідність.

На користувацькому рівні система може представлятися єдиним редактором UML-моделей. У графічному інтерфейсі або в текстовому (за використання тих самих PlantUML- або JSON-сумісних інструментів) користувач бачить елементарні структури в зручному для сприйнятті людиною форматі. Детальніші аспекти поведінки можуть відображатися або редагуватися в окремих вкладках або через спеціальні діалогові вікна, які фактично взаємодіють зі сховищем XMI-фрагментів.

Якщо йдеться про інтеграцію з IDE, користувач отримує можливість безпосередньо редагувати класи, методи та атрибути в коді, а система за рахунок внутрішніх конвертерів синхронізує зміни з гібридним форматом. За необхідності IDE може ініціювати звернення до поведінкових діаграм, використовуючи вже механізми XMI-обробки. Такий підхід дає змогу гнучко поєднувати переваги ручного редагування JSON-файлів і точну передачу семантики UML, що істотно полегшує процес проектування і скорочує ризик розбіжностей між моделлю і кодом.

В якості прикладу можна розглянути наступний сценарій використання. У типовій ситуації розробник починає роботу з моделлю в середовищі розробки, де вже встановлено необхідні плагіни для підтримки гібридного формату. Припустимо, що йому необхідно описати простий клас User з полем username і кількома методами. На етапі початкового прототипування модель представлена лише в JSON-файлі, оскільки потрібна тільки базова інформація про структуру класу. Приклад цього опису може мати такий вигляд:

```
{
  "_type": "UMLClass",
  "name": "User",
  "attributes": [
    {"name": "username", "type": "String"}
  ],
```

```
  "operations": [
    {"name": "validateUsername", "returnType":
"boolean"}
  ]
}
```

Розробник продовжує роботу і вирішує додати модель поведінки, що описує стани об'єкта класу User (наприклад, «Неактивний» і «Активний») і перехід «Активувати». У цей момент IDE або спеціалізований UML-редактор додає в проект XMI-фрагмент, що відповідає за реалізацію поведінкової діаграми. З урахуванням принципів гібридного зберігання з'являється додатковий блок, впроваджений у відповідну JSON-структуру, але відповідальний за складні аспекти моделі. Приклад (спрощений фрагмент) може виглядати так:

```
{
  "_type": "UMLClass",
  "name": "User",
  "attributes": [...],
  "operations": [...],
  "behaviorXMI": "<uml:StateMachinexmi:id=\
"sm¹\" name=\"UserStateMachine\">"
                 +
"<regionxmi:type=\"uml:Region\"
xmi:id=\"r1\">"
                 + "<subvertexxmi:type=\"uml:
State\" xmi:id=\"s1\" name=\"Inactive\"/>"
                 + "<subvertexxmi:type=\"uml:
State\" xmi:id=\"s2\" name=\"Active\"/>"
                 + "<transitionxmi:type=\"uml:
Transition\" xmi:id=\"t1\" name=\"Activate\" "
                 + "source=\"s1\"
target=\"s2\"/>"
                 + "</region>"
                 + "</uml:StateMachine>"
}
```

Далі розробник може візуалізувати цю діаграму в інструментах на кшталт StarUML, де JSON-частину відносно легко відобразити як звичну діаграму класів, а вбудований XMI-фрагмент буде інтерпретовано як кінцевий автомат у новій вкладці редактора. Якщо потрібно експортувати отриману модель в EnterpriseArchitect, загальний модуль інтеграції перетворює JSON-сегменти в XMI-опис на рівні класів, зберігаючи детальну інформацію про поведінкову діаграму безпосередньо з XMI-фрагмента. Завдяки такому механізму забезпечується повноцінна підтримка специфікації UML: «легка» частина залишається зручною для ручного редагування, а «важка» служить для формального опису та взаємодії з інструментами, орієнтованими на XMI.

На практиці це означає, що на ранній стадії проектування, коли потрібна тільки базова структура, розробники майже не торкаються XMI-фрагментів і оперують переважно JSON. У міру зростання вимог до функціоналу та ускладнення поведінки системи коду XMI стає більше, і UML-інструменти, які вміють аналізувати детальні діаграми, пропонують додаткові можливості (наприклад, перевірку коректності станів і переходів). Тим часом інтеграція з IDE не страждає: автоматична генерація коду ґрунтується на JSON-описі класів, а складніші елементи синхронізуються завдяки прозорим механізмам конвертації та валідації, вбудованим у гібридну архітектуру.

Таким чином, гібридний формат (JSON + XMI) дає можливість гнучко і формально описувати UML-моделі. На «легкому» рівні JSON забезпечує швидке виправлення та інтеграцію із зовнішніми інструментами, а для детальних поведінкових сценаріїв слугує XMI. Це підвищує продуктивність прототипування і спрощує впровадження в IDE, оскільки базові елементи легко синхронізуються з кодом, тоді як складні діаграми можуть рендеруватися в інструментах, що підтримують XMI.

Однак двоформатна структура ускладнює конфігурацію і вимагає додаткових механізмів валідації. Також не всі засоби допускають часткове читання XMI, що іноді потребуватиме додаткових конвертерів.

Подальше вдосконалення такого підходу передбачає тіснішу інтеграцію з IDE і розширене використання валідаційних механізмів. Бажано, щоб будь-які зміни у вихідному коді та XMI-складовій автоматично узгоджувалися з JSON-описом і навпаки. Додатково варто покращувати способи контролю версій та інструменти візуалізації, щоб користувач міг своєчасно бачити конфлікти та невідповідності.

Висновки. Запропонована гібридна архітектура поєднує зручність JSON із формальною точністю XMI, що особливо корисно під час проектування складних систем, які потребують швидкої ітерації та підтримки повноти UML-специфікації. Дворівнева схема зберігання, доповнена механізмами валідації, дає можливість розвивати систему без втрати деталей. При цьому залишається завдання адаптації гібридного формату до наявних інструментів і IDE.

Незважаючи на технічні складнощі, такий підхід відкриває шлях до більш тісної взаємодії між UML-моделлю і кодом, підтримуючи як прототипування, так і детальне моделювання, і тим самим підвищує ефективність розробки сучасних програмних систем.

Список літератури:

1. Tang A., Liang P., Vliet H. Software Architecture Documentation: The Road Ahead. *Ninth Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture*. 2011. P. 252–255. DOI: 10.1109/WICSA.2011.40.

2. Fowler M. UML Distilled Second Edition A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language, 3rd Edition. Addison-Wesley Professional, 2018. 208 p.

3. Rumbaugh J., Jacobson I., Booch G. The Unified Modeling Language Reference Manual, 2nd Edition. Boston: Addison-Wesley, 2005. Vol. 1. 721 p.

4. Brown, A. Model driven architecture: Principles and practice. *Software and System Modeling 3*. 2004. P. 314–327. DOI: 10.1007/s10270-004-0061-2.

5. Bezivin J., Gerbe O. Towards a precise definition of the OMG/MDA framework. *International Conference on Automated Software Engineering*: materials of 16th annual inter. conf. 2001. P. 273-280. DOI: 10.1109/ASE.2001.989813.

6. Нікітченко М. Управління та редагування UML-документів: структура, інтеграція, автоматизація. *Інформатика. Культура. Техніка*: матеріали X міжнар. наук.-прак. конф. Одеса, 2024. Т. 1. № 1. С. 104-111. DOI: 10.15276/ict.01.2024.15.

7. Нікітченко М. Розвиток і вдосконалення UML-моделей у гібридному форматі. *Традиційні та інноваційні підходи до наукових досліджень*: матеріали VIII міжнар. наук. конф. Дрогобич, 2025. С. 294-296. DOI: 10.62731/mcnd-31.01.2025 (у друці).

Nikitchenko M.I. TWO-TIER UML ARCHITECTURE BASED ON HYBRID JSON AND XMI FORMAT

The article reveals a hybrid approach to storing UML models that combines the official XMI standard with a lightweight JSON representation. This format makes it possible to work efficiently with "basic" elements (classes, attributes, operations) in the form of JSON, and display complex behavioral aspects (state diagrams, activities, etc.) in XMI fragments. The proposed two-level scheme is complemented by a validation module designed to ensure consistency between both levels of the model and prevent out-of-synchronization.

The paper provides examples of integration with popular UML editors (StarUML, Enterprise Architect, PlantUML) and IDEs. It is shown how StarUML can interpret JSON with built-in XMI inserts, and Enterprise Architect can work with full-fledged XMI, where JSON data is converted on the fly if necessary. A typical usage sequence is mentioned: at first, "light" JSON is used for quick changes and prototyping, and as complexity increases, XMI fragments with detailed behavior are added to the model.

The author discusses the advantages of this approach in detail. These include accelerated prototyping, preservation of formal accuracy for complex parts, the possibility of painless code generation, and reverse engineering. At the same time, it is recognized that a two-tier architecture is more difficult to implement, requires setting up converters for JSON and XMI communication, and can make it difficult to work on a model in large teams when changes are made to both formats in parallel. In addition, some tools do not support "partial" XMI import, which requires the creation of additional modules or adapters.

As a result, the hybrid format appears as a compromise solution: it allows you to maintain the necessary detail of UML models without giving up the simplicity of JSON editing. This is especially true in modern, fast-paced projects that require synchronization between UML diagrams, IDEs, and actual code. Using this approach helps to increase the efficiency of developing complex software systems by combining the speed of making changes and deep specification of behavioral aspects.

Key words: *hybrid format, JSON, XMI, integration with IDEs, automatic code generation, validation, extension of UML tools, software modeling.*

УДК 004.415.2
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/24

Олещенко Л.М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ільїн М.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПРОГРАМНИЙ МЕТОД АНАЛІЗУ ПОТОКОВИХ ДАНИХ СОЦІАЛЬНИХ МЕРЕЖ ЗА ДОПОМОГОЮ ГІБРИДНОЇ МОДЕЛІ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

У статті представлено інноваційний підхід до аналізу даних соціальних мереж у реальному часі, використовуючи гібридну модель нейронної мережі довгої короткочасної пам'яті (LSTM). Зосереджуючись на аналізі дописів, пов'язаних з війною в Україні, розроблений метод забезпечує виявлення подій та аналіз тенденцій у динамічному інформаційному середовищі. Запропоноване дослідження пропонує новий рівень програмної обробки текстових даних, включаючи токенізацію, вилучення ключових ознак та використання попередньо натренованих моделей для аналізу контексту.

Реалізація розробленої програмної системи базується на симуляції потокового передавання даних із набору даних "Russia-Ukraine war – Tweets Dataset (65 days)", що імітує динамічний потік дописів з платформи X (Twitter) та містить понад 41 мільйон записів. Такий підхід не лише дозволяє уникнути обмежень, пов'язаних із використанням API X, але й створює контрольоване середовище для тестування моделей. Потік даних обробляється у кілька етапів: від попереднього очищення текстів, видалення шумів (URL-адреси, емоджі, згадки) та токенізації до розпізнавання іменованих сутностей (NER), які виділяють релевантні геополітичні терміни, ключових гравців та локації. Усе це сприяє формуванню числових наборів даних, які використовуються для навчання моделі.

Запропонована гібридна модель поєднує елементи згорткових нейронних мереж (CNN) для виявлення локальних шаблонів у тексті та шарів LSTM для відстеження часових залежностей. Архітектура включає шар вбудовування (embedding layer), який використовує попередньо натреновані векторні представлення слів, шар макс-пулінгу для зменшення розмірності та повнозв'язний шар для об'єднання вивчених шаблонів. Такий підхід забезпечує точніше визначення контексту подій та тенденцій. Результати дослідження демонструють переваги запропонованої моделі перед базовою LSTM. Середня абсолютна похибка (MAE) прогнозування за допомогою гібридної моделі на 20.4% менше, ніж з використанням базової LSTM. Це підтверджує ефективність інтеграції CNN у структуру LSTM, що дозволяє виявляти складніші шаблони текстових даних. Крім того, використання механізмів уваги дозволяє гібридній LSTM адаптуватися до динамічних змін у потоці інформації. Висновки дослідження підкреслюють масштабованість та ефективність розробленого підходу. Hybrid LSTM дозволяє не лише оперативно реагувати на зміни у соціальних настроях, але й забезпечує засоби для аналізу інформаційної безпеки. Виявлення пропагандистських наративів та розуміння поведінки користувачів соціальних мереж може стати потужним інструментом у боротьбі з дезінформацією.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію графових нейронних мереж (GNN) для виявлення зв'язків між обліковими записами та аналізу поширення інформації. Такий підхід має потенціал для вдосконалення системи, забезпечуючи більш точне виявлення наративів та забезпечення оперативного моніторингу подій.

Ключові слова: *програмний метод, потокові дані, соціальні мережі, гібридна модель, довга короткочасна пам'ять (LSTM), геополітичні терміни, розпізнавання іменованих сутностей (NER), шаблони тексту, токенізація, пропагандистські наративи, дезінформація.*

Постановка проблеми. У сучасному цифровому світі, де обмін інформацією відбувається в реальному часі, соціальна мережа X.com (раніше Twitter) виступає однією з ключових платформ для швидкої передачі новин та думок. Потоки даних із соціальних мереж, зокрема, дописи (твіти) стають важливим джерелом актуальної інформації, випереджаючи традиційні засоби масової інфор-

мації. Проте значний обсяг і швидкість генерації таких даних створюють труднощі для їх обробки та аналізу. Існуючі підходи часто не справляються з динамічним характером потоків інформації, що підкреслює необхідність створення ефективних технологій та програмних систем для роботи з великими обсягами текстових даних у реальному часі.

Для вирішення цього завдання виникає потреба в інноваційних моделях, які здатні одночасно обробляти структурну складність тексту та враховувати часові залежності. Одним із перспективних рішень є використання гібридних моделей глибокого навчання, зокрема гібридної моделі довгої короткочасної пам'яті LSTM (Long Short-Term Memory). Цей підхід дозволяє виявляти закономірності в тексті та динаміці потоку даних, що відкриває нові можливості для аналізу інформаційних потоків у різноманітних контекстах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом у медіапросторі спостерігається стрімке збільшення обсягів даних, що генеруються користувачами соціальних мереж, науковці відзначають критичну роль аналітики потокових даних для аналізу трендів і виявлення інформаційних загроз. Спостерігається значне зростання кількості публікацій, присвячених аналізу даних соціальних мереж у реальному часі, що зумовлено зростанням інформаційних потоків, актуальністю геополітичних конфліктів і необхідністю протидії дезінформації. Наприклад, дослідження [1] фокусується на аналізі якості даних, що надходять з потоків повідомлень соціальної мережі Twitter. Авторами висвітлюються ключові аспекти, що впливають на корисність таких даних, зокрема, дублікатність, наявність спаму та недостатню семантичну релевантність. Представлені методи для попередньої обробки даних та оцінки їх якості можуть бути корисними для побудови більш точних алгоритмів очищення текстових потоків. Автори статті [2] розглядають методи лексичної нормалізації тексту з соціальної мережі Twitter, що є важливим етапом для покращення точності обробки текстових даних. Запропоновані підходи, зокрема використання словників, моделей послідовностей і сучасних технік глибокого навчання, допомагають краще працювати з неструктурованими, скороченими або стилістично варіативними даними. У статті [3] представлено систематичний огляд методів розпізнавання іменованих сутностей (Named Entity Recognition), а також висвітлюються класичні підходи, такі як CRF (Conditional Random Fields) та сучасні підходи на основі глибокого навчання. Особлива увага приділяється застосуванню цих методів для аналітики потокових даних із соціальних медіа.

У статті [4] представлено фреймворк для аналізу соціальних мереж SMAFED (Social Media Analysis Framework for Event Detection), який покращує семантичний аналіз даних, репрезентацію контенту та кластеризацію подій. Для цього використано інтегровану базу знань, семантичну репрезентацію та інкрементну кластеризацію на основі семантичної спорідненості. Експерименти показали, що SMAFED перевершує інші фреймворки з мінімальною втратою функції (0.15 і 0.05 на двох наборах даних) та демонструє високу точність у виявленні подій із метриками Precision (0.922), Recall (0.793) і F-Measure (0.853). SMAFED підтвердив свою ефективність як інструмент для аналізу подій у соціальних мережах.

Хоча дослідження [5] присвячено візуальним даним, його методи поєднання нейронних мереж CNN (Convolutional Neural Network) та LSTM адаптуються для текстового аналізу. У статті представлено модель, яка здатна генерувати природні мовні описи для зображень та їх окремих регіонів. Автори використовують набори даних із зображеннями та відповідними текстовими описами, щоб навчити модель встановлювати взаємозв'язок між візуальними та мовними даними. Запропонована модель базується на комбінації згорткових нейронних мереж для аналізу регіонів зображень, двонаправлених рекурентних нейронних мереж для роботи з текстами, а також структурованого об'єктиву, що з'єднує обидві модальності через мультимодальне вбудовування. На основі отриманих вирівнювань запропоновано мультимодальну рекурентну нейронну мережу, яка здатна генерувати нові описи для регіонів зображень. Експерименти на наборах даних Flickr8K, Flickr30K і MSCOCO показали, що модель досягає найкращих результатів у завданнях пошуку. Крім того, згенеровані моделлю описи суттєво перевершують результати базових моделей як для повних зображень, так і для нового набору даних із анотаціями на рівні регіонів.

У статті [6] запропоновано підхід для виявлення подій у часі за допомогою глибокого навчання та мульти-векторних вбудовувань на текстових даних із соціальних мереж. Перш за все, для попередньої обробки текстових даних використовується згорткова нейронна мережа, доповнена різними архітектурами вбудовувань слів. Потім модель виявлення подій на основі рекурентної нейронної мережі застосовується для вивчення

часових рядів і вилучення часової інформації. У статті показано, що поєднання вбудовувальних характеристик на рівні вбудовування та їх подача на згорткову нейронну мережу дозволяє досягти високої ефективності без обмеження за розміром і з додатковими вбудовуваннями порівняно зі стандартними багатоканальними підходами. Для виявлення подій використовуються рекурентні нейронні мережі, що дозволяють прогнозувати майбутні значення, а також моделі для оцінки аномалій та виявлення подій через віконний метод. У дослідженні [7] пропонується техніка машинного навчання для виявлення неправдивих новин шляхом фільтрації даних соціальних мереж, класифікації попередньо оброблених даних за допомогою алгоритму машинного навчання, оцінки розробленої системи та оцінки результатів. Основна проблематика, висвітлена в зазначених статтях, зосереджується на проблемах обробки, аналізу та використання даних соціальних мереж для виявлення подій, трендів та неправдивих новин у реальному часі. У попередніх дослідженнях наголошується на необхідності врахування високої динамічності та шумності потоків даних [1], що вимагає розробки спеціалізованих алгоритмів для забезпечення якості інформації. Значна увага приділяється методам попередньої обробки тексту, зокрема лексичній нормалізації [2] та розпізнаванню іменованих сутностей [3], які є критичними для вилучення релевантної інформації в умовах великого обсягу неструктурованих даних. Використання сучасних підходів, таких як рекурентні нейронні мережі [6] та машинне навчання [7], підкреслює необхідність побудови моделей, здатних виявляти закономірності та наративи в потоках даних у режимі реального часу. Також розглядаються питання інтеграції семантичного аналізу [4] та візуально-семантичного вирівнювання для покращення інтерпретації даних [5], що дозволяє ефективніше виявляти як події, так і дезінформацію. У статті зосереджується увага на актуальності створення автоматизованих систем, які могли б забезпечити точність і масштабованість аналізу для задоволення зростаючих потреб у моніторингу потокових даних соціальних мереж у глобальному контексті.

Постановка завдання. У рамках цього дослідження пропонується застосування гібридної моделі довгої короткочасної пам’яті для аналізу потокових даних, що імітують реальні умови програмних платформ соціальних мереж. Основна мета дослідження полягає у створенні програмного методу, який забезпечить ефективне виявлення подій, аналіз, прогнозування тенденцій з високою точністю та адаптацію до змін у динамічному інформаційному середовищі.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо ключові особливості запропонованого програмного методу на основі гібридної довгої короткочасної пам'яті, спеціально розробленої для обробки великих обсягів даних із соціальних мереж (зокрема, з Twitter), з метою виявлення значущих подій і трендів у контексті війни в Україні. Запропоноване програмне рішення функціонує в режимі реального часу, що дозволяє оперативно аналізувати часову динаміку взаємодій користувачів у соціальних мережах. Завдяки цьому система може ідентифікувати зміни у шаблонах взаємодії, які можуть свідчити про важливі події або нові тренди, що стосуються військових, соціальних або інформаційних аспектів конфлікту.

Однією з ключових проблем при роботі з даними Twitter є залежність від API цієї платформи, яка накладає суттєві обмеження, такі як обмеження за кількістю запитів, висока вартість доступу до великих обсягів даних, а також затримки через політику доступу до API. Щоб уникнути цих обмежень, у нашій роботі було реалізовано потоковий симулятор, який дозволяє імітувати динаміку даних Twitter в реальному часі.

Для цієї мети використано набір даних "Russia-Ukraine war – Tweets Dataset (65 days)". Досліджуваний набір даних містить дописи соціальної мережі Twitter, пов’язані з соціальними та геополітичними подіями, і пропонує унікальний матеріал для тестування моделей машинного навчання, його структура та наявність контекстуального контенту дозволяють імітувати реальні сценарії потокового передавання даних (Рис. 1).

Набір даних містить повідомлення, які мають точні часові позначки, що забезпечує можливість їх хронологічного відтворення. Симулятор працює так, що дані з набору послідовно генеруються, імітуючи реальний потік нових повідомлень. Один із ключових аспектів цього підходу полягає в тому, що швидкість передачі даних у симуляторі можна регулювати залежно від наявних обчислювальних ресурсів та поточних аналітичних завдань. Наприклад, при тестуванні алгоритму в умовах з обмеженими ресурсами швидкість потоку можна зменшити, тоді як при виконанні масштабних експериментів її можна збільшити. Таким чином, цей підхід забезпечує реалістичну імітацію роботи з великими обсягами потокових даних, що дозволяє тестувати ефектив-

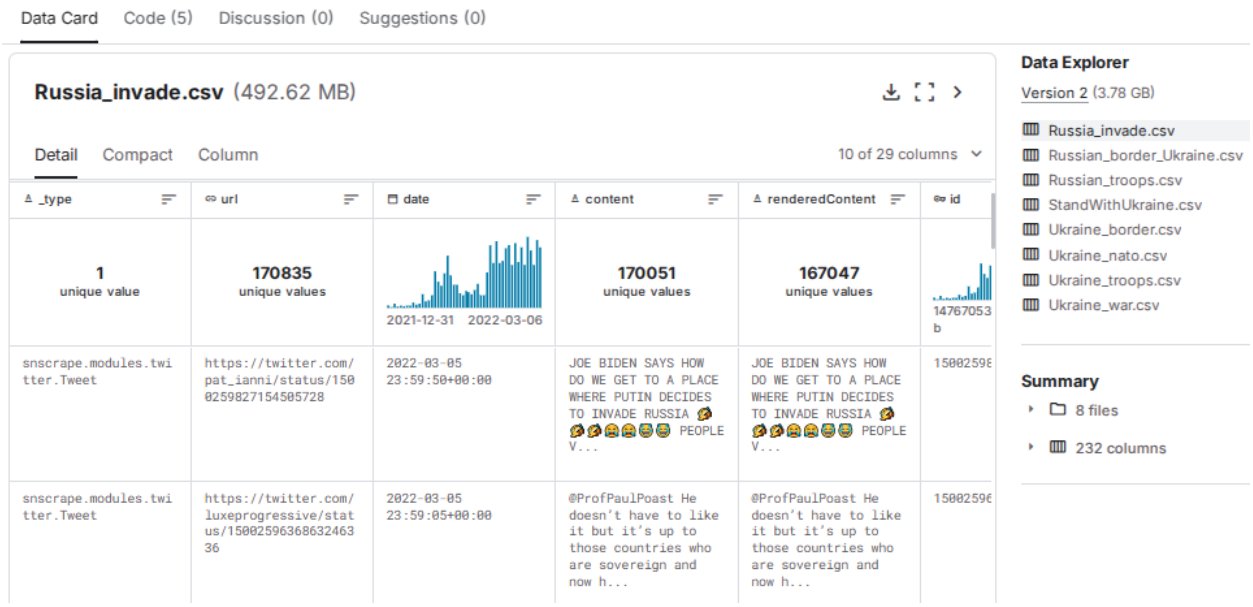


Рис. 1. Досліджуваний датасет "Russia-Ukraine war – Tweets Dataset (65 days)" [8]

```python
import pandas as pd
import time

# Завантаження набору даних
dataset = pd.read_csv('Russia_invade.csv')

# Функція симуляції потоку
def stream_simulator():
    for index, row in dataset.iterrows():
        tweet = row['content']
        timestamp = row['date']
        print(f"Потік дописів о {timestamp}: {tweet}")
        time.sleep(0.01)

# Запуск симулятора
stream_simulator()
```

Рис. 2

ність і продуктивність запропонованого рішення. Завдяки створенню контрольованого середовища для експериментів система отримує змогу адаптуватися до реальних сценаріїв, що є важливим для аналізу складних інформаційних потоків у соціальних мережах.

Програмна система симуляції потокового передавання у реальному часі побудована на основі Python та бібліотеки Pandas. В її основі лежить набір даних із файлу *Russia_invade.csv*, що містить історичні дані дописів, які імітують динаміку їх надходження в реальному часі.

Набір даних завантажується у DataFrame за допомогою функції *read_csv*.

Функція *stream_simulator()* ітерується по кожному рядку набору даних, отримуючи зміст допису (*content*) та час публікації (*date*).

Кожен допис виводиться на екран разом із міткою часу, яка вказує момент, коли його слід обробляти. Для імітації реального часу використовується функція *time.sleep(0.01)*, яка задає невеликий часовий проміжок між передаванням дописів (Рис. 2).

Як тільки дописи надходять у систему, активується базовий етап попереднього фільтрування.

На цьому етапі відбувається швидке сканування вхідних дописів з метою відбору лише релевантного контенту. Основними критеріями відбору є наявність таких елементів, як хештеги, згадки користувачів або геополітично значущі ключові слова. Це забезпечує відсіювання шуму ще до основного аналізу, підвищуючи ефективність наступних етапів.

Після того, як дописи проходять через симулятор і первинне фільтрування, вони надходять до етапу глибокої попередньої обробки, яка включає очищення тексту (видалення несуттєвих елементів, таких як URL-адреси, згадки (наприклад, @username), емодзі та зайві символи), токенізацію (розбиття тексту твіту на окремі аналітичні одиниці – слова або фрази), розпізнавання іменованих сутностей та виділення ознак (Рис. 3).

Токенізація є базовим кроком для структурування даних, необхідних для подальших алгоритмів обробки. Розпізнавання іменованих сутностей (NER) допомагає виявляти конкретні сутності, такі як назви локацій, згадки ключових осіб або важливі хештеги. NER додає контекстуальний рівень аналізу, необхідний для глибокого розуміння змісту допису. На завершення попередньої обробки система виділяє релевантні ознаки з текстів дописів. Ключовими ознаками є довжина допису в символах, частота вживання ключових слів або термінів та інші метрики, що вказують на можливу значущість допису для подальшого аналізу. Ці ознаки перетворюються на числові формати, які є ідеальними для обробки моделлю LSTM. Завдяки цьому підходу система забезпечує точне й ефективне опрацювання великих обсягів даних у реальному часі.

Для аналізу дописів та передбачення подій ми порівняли дві різні архітектури нейронних мереж: базову LSTM і вдосконалену гібридну модель LSTM. Вдосконалена модель об'єднує переваги двох підходів: згорткових нейронних мереж (CNN) для вилучення локальних ознак і мереж LSTM для вивчення часових залежностей. Це порівняння допомагає оцінити, наскільки ефективнішою є інтеграція обох підходів для обробки потоку даних із соціальних мереж.

Гібридна модель була побудована на основі унікального поєднання шарів CNN і LSTM. Кожен компонент моделі виконує чітко визначену роль, забезпечуючи точність і ефективність прогнозування.

Основним завданням *шару вбудовування (Embedding layer)* є перетворення текстових даних у векторний формат. Для цього використовуються попередньо натреновані векторні представлення слів (наприклад, Word2Vec або GloVe), які зберігають семантичний зв’язок між словами. Векторне представлення дозволяє моделі працювати з тек-

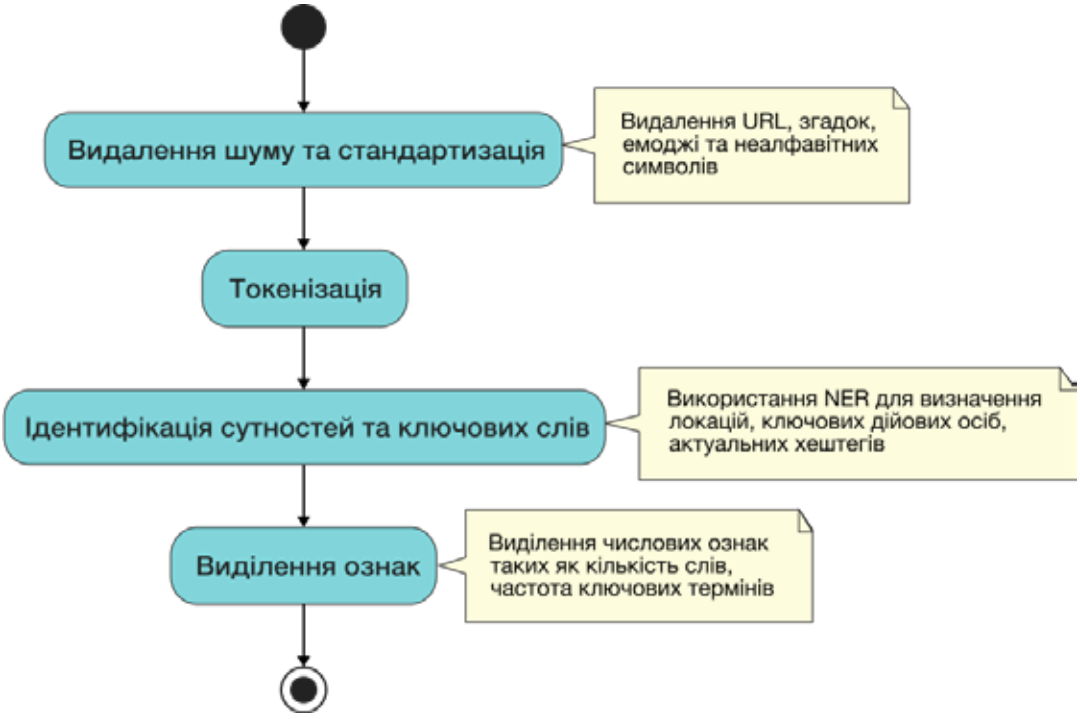


Рис. 3. Шар попередньої обробки даних

стом як із математичною сутністю, що є необхідним для наступних шарів.

Згортковий шар CNN (Convolutional layer) виконує аналіз текстових послідовностей, визначаючи локальні шаблони, наприклад, поєднання ключових слів або фраз, які часто зустрічаються разом. Він використовує кілька фільтрів, які «згорткою» проходять по текстових даних, щоб виділити локальні ознаки, які можуть бути пропущені іншими методами. Наприклад, CNN може виявити часті згадки про місця чи події в певному контексті.

Шар макс-пулінгу (Max-pooling layer) зменшує розмірність даних, залишаючи тільки найважливіші ознаки. Замість того, щоб передавати всі отримані ознаки, макс-пулінг вибирає ті, які мають найбільшу значущість. Це знижує обчислювальну складність моделі та зменшує ризик перенавчання, одночасно зберігаючи ключову інформацію.

Шар LSTM (Long Short-Term Memory layer) відповідає за аналіз часових залежностей у текстових даних. Завдяки здатності LSTM зберігати інформацію про попередні контексти, модель може враховувати послідовність дописів і визначати їхній взаємозв'язок. Наприклад, якщо кілька твітів протягом короткого часу містять схожі ключові слова, LSTM допомагає моделі розпізнати, що це може свідчити про значущу подію.

Повнозв'язний шар (Fully-connected layer) – це завершальний шар, що агрегує всі ознаки, які були виділені попередніми шарами та формує вихідний прогноз. Це може бути ймовірність певної події, наприклад, військової ескалації або нового тренду. Повнозв'язний шар забезпечує інтерпретацію всіх вхідних даних і перетворює їх на конкретний результат.

Інтеграція CNN і LSTM дозволяє моделі не лише аналізувати локальні текстові шаблони, але й враховувати їх у часовому контексті. Це особливо важливо для аналізу дописів, де послідовність публікацій та їхній контекст мають вирішальне значення для виявлення подій.

Порівняльний аналіз показав, що гібридна модель перевершує базову LSTM у точності виявлення тенденцій і подій завдяки своїй здатності враховувати як локальні, так і глобальні залежності в текстових даних (Рис. 4).

Оцінка ефективності гібридної моделі проводилась на основі метрики середньої абсолютної похибки (Mean Absolute Eirror, MAE), що є одним із ключових показників якості прогнозування в задачах аналізу даних. Результати свідчать про те, що гібридна модель LSTM демонструє значно менше значення MAE (0.2263) порівняно з базовою LSTM (0.2843). Такий показник підтверджує здатність гібридної моделі краще вловлювати складні текстові шаблони та часові залежності, характерні для соціальних медіа.

Однією з ключових переваг удосконаленої моделі LSTM є інтеграція згорткових шарів CNN, які дозволяють виявляти локалізовані закономірності у вхідних даних. CNN може розпізнати повторювані фрази, частотні шаблони ключових слів та контекстуальні зв'язки, які часто залишаються поза увагою у випадку базової LSTM. Це

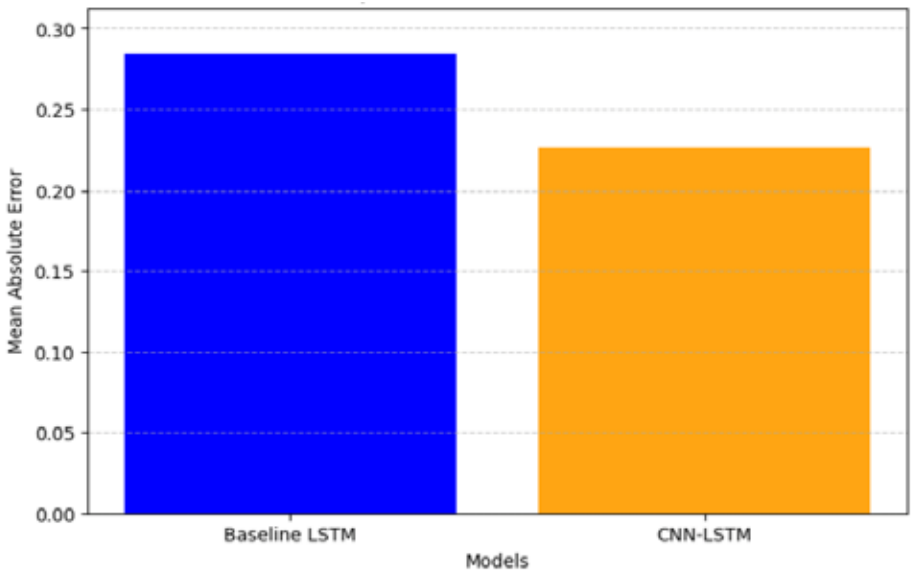


Рис. 4. Порівняння MAE між базовою та гібридною моделлю LSTM

забезпечує більш глибоке розуміння структури та динаміки даних, підвищуючи загальну точність прогнозів. Запропонований підхід сприяє розширенню можливостей цифрової медіа-аналітики та відкриває перспективи для його застосування в різних сферах, від моніторингу соціальних настроїв до аналізу інформаційної безпеки.

Висновки. Запропонована гібридна модель LSTM підтвердила свою ефективність у задачах аналітики потокових даних у реальному часі, зокрема для виявлення подій та аналізу тенденцій у соціальних мережах. Гібридна модель досягла MAE на 20.4% менше порівняно з показником базової LSTM. Це свідчить про вищу здатність моделі працювати з динамічними потоками даних, властивими платформам соціальних мереж. Використання згорткових шарів дозволяє ефективніше витягувати релевантні ознаки з текстових даних, тоді як механізми уваги покращують здатність обробляти складні часові залежності.

Гібридна модель LSTM довела свою здатність працювати у режимі реального часу навіть при обробці великих обсягів потокових даних. Це забезпечує можливість постійного моніторингу соціальних настроїв та динаміки інформаційного простору.

Подальші дослідження авторів спрямовані на вдосконалення архітектури гібридної моделі LSTM для більшої адаптації до змін у динаміці потоків повідомлень соціальних мереж та оптимізації точності моделі, зокрема, шляхом інтеграції нових методів, які дозволять краще обробляти нетипові дані, такі як меми, зображення чи відео. Це розширить функціональні можливості моделі та забезпечить її адаптацію до різноманітних форматів контенту, характерних для сучасних соціальних мереж. Окрему увагу слід приділити використанню графових нейронних мереж (GNN). Додавання GNN до архітектури моделі дозволить аналізувати зв'язки між обліковими записами користувачів, розпізнавати схеми поширення інформації, а також виявляти інформаційні атаки. Це стане важливим кроком у напрямку глибшого розуміння структур соціальних мереж і їхньої динаміки. Важливим напрямом удосконалення є розширення функціональності моделі для раннього виявлення пропаганди. Завдяки цьому можна буде ідентифікувати пропагандистські наративи та оцінювати їхній вплив на масову аудиторію. Такий підхід сприятиме більш ефективному реагуванню на дезінформаційні кампанії. Крім того, перспективним є розроблення адаптивних систем, здатних реагувати на зміни поведінки користувачів і появу нових трендів у реальному часі. Це особливо важливо в контексті забезпечення інформаційної безпеки.

Запропонований програмний метод аналізу потокових даних соціальних мереж за допомогою гібридної довгої короткочасної пам'яті демонструє не лише високі результати у своїй поточній конфігурації, але й має великий потенціал для подальшого вдосконалення та інтеграції в складніші програмні системи моніторингу інформаційного простору.

Список літератури:

1. Arolfo F., Rodriguez K.C., Vaisman A. Analyzing the Quality of Twitter Data Streams. *Information Systems Frontiers*. 2022. 24(1). P. 349-369. DOI: 10.1007/s10796-020-10072-x.

2. Bilal A. Lexical Normalisation of Twitter Data. *2015 Science and Information Conference*. 2023. DOI: 10.1109/SAI.2015.7237164.

3. Goyal A., Gupta V., Kumar M. Recent Named Entity Recognition and Classification techniques: A systematic review. 2018. *Computer Science Review*. 29:21-43. DOI: 10.1016/j.cosrev.2018.06.001.

4. Kolajo T., Daramola O., Adebiyi A.A. Real-time event detection in social media streams through semantic analysis of noisy terms. *Big Data*. 2022. 9(90). https://doi.org/10.1186/s40537-022-00642-y.

5. Karpathy A., Fei-Fei L. Deep Visual-Semantic Alignments for Generating Image Descriptions. *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2015. DOI: 10.1109/CVPR.2015.7298932.

6. Nguyen V.Q., Anh T.N., Yang H.-J. Real-time event detection using recurrent neural network in social sensors. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2019.15(6). DOI:10.1177/1550147719856492.

7. Micheal Arowolo, Sanjay Misra, Roseline Ogundokun. A Machine Learning Technique for Detection of Social Media Fake News. *International Journal on Semantic Web and Information Systems*. 2023. 19(1):1-25. DOI: 10.4018/IJSWIS.326120.

8. Russia-Ukraine war – Tweets Dataset (65 days). 2022. Kaggle. URL: https://surl.li/wkdrin (дата звернення 10.11.2024).

Oleshchenko L.M., Ilin M.O. SOFTWARE METHOD FOR ANALYZING SOCIAL MEDIA STREAMING DATA USING NEURAL NETWORK HYBRID MODEL

The article presents an innovative approach to real-time social media data analysis using a hybrid Long Short-Term Memory (LSTM) neural network. Focusing on the analysis of tweets related to the war in Ukraine, the proposed method enables event detection and trend analysis in a dynamic information environment. The study offers a new level of text data processing, including tokenization, feature extraction, and the use of pre-trained models for context analysis.

The developed system implementation is based on simulating data streaming from the Kaggle dataset "Russia-Ukraine war – Tweets Dataset (65 days)," which emulates the dynamic information flow from the X (Twitter) platform and contains over 41 million records. This approach not only avoids the limitations associated with using the X API but also creates a controlled environment for model testing. The data stream is processed in several stages: from initial text cleaning, noise removal (URLs, emojis, mentions), and tokenization to named entity recognition (NER) that identifies relevant geopolitical terms, key players, and locations. This facilitates the creation of numerical datasets used for model training.

The proposed hybrid model combines elements of Convolutional Neural Networks (CNN) for detecting local patterns in the text and LSTM layers for capturing temporal dependencies. The architecture includes an embedding layer that uses pre-trained word vector representations, a max-pooling layer to reduce dimensionality, and a fully connected layer to integrate the learned patterns. This approach enables more accurate detection of event contexts and trends.

The research results demonstrate the advantages of the proposed model over the baseline LSTM. The Mean Absolute Error (MAE) of forecasting using the hybrid model is 20.4% lower compared to the baseline LSTM model. This confirms the effectiveness of integrating CNN into the LSTM structure, allowing the detection of more complex text data patterns. Additionally, the use of attention mechanisms enables the hybrid LSTM to adapt to dynamic changes in the information flow. The study's conclusions highlight the scalability and efficiency of the developed approach. The hybrid LSTM not only provides tools for responding promptly to shifts in social sentiments but also ensures capabilities for information security analysis. Identifying propaganda narratives and understanding the behavior of social media users can become a powerful tool in combating disinformation.

Future research could focus on integrating Graph Neural Networks (GNN) to detect connections between accounts and analyze information dissemination. This approach has the potential to improve the system further, ensuring more precise narrative detection and real-time event monitoring.

Key words: *software method, streaming data, social media, hybrid model, Long Short-Term Memory (LSTM), geopolitical terms, Named Entity Recognition (NER), text patterns, tokenization, propaganda narratives, disinformation.*

УДК 004.77
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/25

Омецинская Н.В.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Гуйда О.Г.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Кучерявий В.М.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Вишемірська Я.С.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Боженко М.І.
Senior Infrastructure Engineer, Lotusflare

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ РЕСУРСІВ SMTP-СЕРВЕРУ (POSTFIX)

У зв'язку з постійним зростанням кількості кібератак і загроз інформаційної безпеки, захист обчислювальних ресурсів поштових серверів стає критично важливим завданням для організацій різного масштабу.

У статті розглянуто роль та місце SMTP-сервера в параметризації поштового сервера як ключового елемента електронної поштової системи. SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) є основним протоколом для передавання електронної пошти між серверами, що забезпечує доставку повідомлень у глобальній мережі Інтернет. Параметризація поштового сервера, зокрема SMTP-сервера, є важливим аспектом для забезпечення його надійності, безпеки, продуктивності та масштабованості. Правильна конфігурація SMTP-сервера визначає, як обробляються, надсилаються та отримуються електронні листи, а також як забезпечується захист від спаму, фішингу та інших кіберзагроз.

Стаття присвячена вивченню методів і засобів захисту SMTP-сервера на прикладі Postfix – одного з найпоширеніших і гнучких рішень для обробки електронної пошти. Postfix забезпечує високу продуктивність і надійність роботи, проте в умовах сучасних загроз потребує додаткових заходів безпеки для протидії різним типам атак, таким як спам, фішинг, DoS-атаки та спроби несанкціонованого доступу.

Проведено аналіз архітектури Postfix та його основних компонентів, що дозволяє виявити потенційні вразливості і шляхи їх усунення. Розглянуто механізми автентифікації (SMTP AUTH), авторизації та контролю доступу, включаючи використання SSL/TLS для забезпечення безпечного з'єднання, захисту від атак типу "людина посередині" та шифрування даних під час передачі. Належний моніторинг дозволяє виявляти аномалії у функціонуванні сервера та своєчасно реагувати на можливі загрози, такі як спроби несанкціонованого доступу або атаки типу DoS.

Визначено ефективні підходи до конфігурації Postfix для зменшення навантаження на сервер та підвищення його продуктивності, зокрема за рахунок оптимізації роботи з чергами, управління потоками та використання механізмів кешування.

Результати цього дослідження можуть бути корисними для системних адміністраторів, фахівців з інформаційної безпеки, а також дослідників, які займаються вивченням проблем захисту інформаційних систем і мереж.

Ключові слова: *захист SMTP-сервера, Postfix, кібербезпека, авторизація та контроль доступу, шифрування SSL/TLS, фільтрація спаму, захист від фітингу, DoS-атаки, інформаційна безпека поштових серверів, протидія кібератакам.*

Постановка проблеми. У сучасному цифровому світі електронна пошта залишається одним із ключових засобів комунікації як для особистих, так і для корпоративних потреб. Однак зростання кількості кібератак і їхня складність значно підвищують ризики, пов’язані з використанням поштових серверів. SMTP-сервери [1, 2], такі як Postfix [3, 4], регулярно стають мішенями для різних типів атак, включаючи спуфінг, фішинг, розсилку спаму, DoS-атаки та спроби несанкціо-

нованого доступу [5]. Це зумовлює необхідність аналізу, розробки та впровадження ефективних механізмів захисту, які здатні забезпечити надійний захист обчислювальних ресурсів поштового сервера та захистити конфіденційну інформацію від компрометації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій: На сьогоднішній день захист SMTP-серверів від кіберзагроз є однією з актуальних тем у сфері інформаційної безпеки. Останні дослідження зосереджуються на розробці та впровадженні нових методів і технологій для підвищення захищеності поштових серверів, зокрема на прикладі широко використовуваного SMTP-сервера Postfix. У цьому контексті варто відзначити кілька ключових напрямів досліджень [6]:

– Автентифікація та захист переданої інформації

– Реалізація політик безпеки SPF, DKIM і DMARC

– Методи фільтрації спаму та шкідливого ПЗ

– Моніторинг та журналювання

– Оптимізація продуктивності SMTP-серверів

– Інтеграція з іншими технологіями**.**

Постановка завдання. Метою даної статті є аналіз існуючих засобів і технологій захисту обчислювальних ресурсів SMTP-серверу (Postfix) від несанкціонованого використання у контексті ОС Linux. Розглянуто основні методи захисту, перспективи їх розвитку та надано рекомендації щодо покращення конфігурації та впровадження нових технологій.

Виклад основного матеріалу. Комп'ютерна безпека, також знана як кібербезпека або безпека інформаційних технологій (IT-безпека), спрямована на забезпечення захисту комп'ютерних систем і мереж від витоку, крадіжки або пошкодження даних, апаратного та програмного забезпечення, а також від порушень чи неправильного використання наданих послуг. Ця галузь отримала значний розвиток завдяки зростанню залежності від комп'ютерних систем, Інтернету та бездротових мереж, таких як Bluetooth і Wi-Fi, а також завдяки поширенню "розумних" пристроїв, включно зі смартфонами, телевізорами та різноманітними пристроями Інтернету речей (IoT). Кібербезпека є важливим викликом сучасного світу через її складність як з політичної, так і з технологічної точки зору. Основна мета кібербезпеки – забезпечити конфіденційність, цілісність і доступність даних у системі [8].

З моменту виникнення Інтернету та поширення цифрових технологій питання кібербезпеки стали невід'ємною частиною як професійної, так і приватної діяльності. Кібербезпека та кіберзагрози зберігають свою актуальність протягом останніх півстоліття, супроводжуючи розвиток технологій. У 1970-х та 1980-х роках комп'ютерна безпека здебільшого цікавила наукові установи, але із розширенням доступу до Інтернету почали виникати комп'ютерні віруси та атаки на мережі. 1990-ті роки ознаменувалися поширенням вірусів, а у 2000-х роках спостерігалася інституціоналізація кіберзагроз і впровадження механізмів кібербезпеки. З 2010-х років стали звичними масштабні атаки та урядові регуляторні ініціативи. Важливою віхою у становленні кібербезпеки було засідання у квітні 1967 року, організоване Віллісом Уером на Весняній конференції з питань комп'ютерів. Публікація його звіту стала основою для розвитку галузі [9].

У 1977 році Національний інститут стандартів і технологій (NIST) представив концепцію "тріади ЦРУ" (конфіденційність, цілісність, доступність), яка стала базовою для визначення цілей безпеки. У 1970-х і 1980-х роках основні загрози комп'ютерній безпеці були обмеженими, оскільки технології лише починали свій розвиток. У той час основними проблемами були несанкціонований доступ до даних та файлів. Проте вже у другій половині 1970-х років компанії, такі як IBM, почали пропонувати системи контролю доступу та програмне забезпечення для безпеки [10].

Першою комп'ютерною програмою, яка ілюструє загрози безпеці, був хробак Creeper, створений у 1971 році Бобом Томасом з BBN. У 1972 році Рей Томлінсон розробив антивірус Reaper для боротьби з Creeper. Згодом у 1986–1987 роках було зафіксовано перший випадок кібершпигунства, здійснений групою німецьких хакерів під керівництвом Маркуса Гесса. У 1988 році хробак Морріса привернув широку увагу до кіберзагроз, а у 1990-х розпочалася розробка протоколів безпеки, таких як SSL, для захисту інформації в Інтернеті.

У 1993 році компанія Netscape розпочала розробку протоколу SSL після того, як Національний центр суперкомп'ютерних додатків (NCSA) запустив Mosaic 1.0 – перший веб-браузер. У 1994 році Netscape підготувала першу версію SSL 1.0, яка, однак, не була випущена через численні вразливості, зокрема атаки повторного відтворення та можливість модифікації незашифрованих повідомлень хакерами. У лютому 1995 року була опублікована версія SSL 2.0.

Агентство національної безпеки (АНБ) США відповідає за захист національних інформаційних

систем і водночас здійснює збір іноземної розвідки. Ці функції часто конфліктують між собою: забезпечення безпеки включає виявлення вразливостей і їх усунення, тоді як розвідка вимагає використання цих слабких місць для отримання інформації. Усунення вразливостей позбавляє АНБ можливості використовувати їх у наступальних цілях.

АНБ аналізує популярне програмне забезпечення, шукаючи вразливості, які можуть бути використані для конкурентних переваг США. У більшості випадків агенція не повідомляє розробників про знайдені слабкі місця, зберігаючи їх у таємниці. Такий підхід працював до певного часу, але згодом інші країни, такі як Росія, Іран, Північна Корея та Китай, також здобули наступальні можливості та почали використовувати їх проти США. Інструменти АНБ для атак, спочатку створені для американських установ, зрештою опинилися в руках супротивників. Наприклад, у 2016 році інструменти АНБ були зламані та використані Росією й Північною Кореєю. Крім того, деякі співробітники АНБ перейшли на роботу до іноземних організацій, сприяючи розвитку їхніх кіберздатностей.

У сучасному світі Агентство національної безпеки (АНБ) відіграє подвійну роль у кібербезпеці: воно одночасно відповідає за захист інформаційних систем США та за збір іноземної розвідки. Це створює суперечність між оборонними та наступальними діями, такими як використання вразливостей у програмному забезпеченні для збору даних. Наприклад, у 2007 році Сполучені Штати та Ізраїль використали недоліки в операційній системі Microsoft Windows для атаки на ядерну інфраструктуру Ірану, що спонукало Іран до розробки власних кібервійськових потужностей.

Для захисту комп'ютерних систем важливо розуміти потенційні атаки, які поділяються на такі категорії:

- **Бекдори** – приховані механізми, що дозволяють обійти стандартні процедури автентифікації чи інші засоби безпеки. Вони можуть бути створені навмисно розробниками для забезпечення доступу до системи або виникати через неправильну конфігурацію програмного забезпечення. Наприклад, бекдори можуть використовуватися для законного віддаленого управління системою, але у випадку, коли такі механізми потрапляють у руки зловмисників, це створює значну загрозу. Вразливість бекдорів полягає у тому, що їх важко виявити – найчастіше їх можуть ідентифікувати лише фахівці з доступом до вихідного коду чи глибоким знанням операційної системи. Існують програмні засоби для виявлення бекдорів, однак їх ефективність залежить від складності самої загрози. Приховані бекдори можуть бути використані для крадіжки конфіденційних даних, створення бот-мереж або для інших шкідливих дій.
- **Атаки відмови в обслуговуванні (DoS)** – це тип атак, спрямованих на те, щоб зробити комп'ютерну систему або мережевий ресурс недоступним для законних користувачів. Зловмисники здійснюють такі атаки, створюючи перевантаження ресурсів системи. Це може включати надмірну кількість запитів, що призводить до виснаження ресурсів (процесорної потужності, оперативної пам'яті чи пропускної здатності мережі). Більш складним варіантом є **розподілені атаки відмови в обслуговуванні (DDoS)**, які реалізуються за допомогою численних джерел, таких як зомбі-комп'ютери в бот-мережах. Такі атаки ускладнюють ідентифікацію джерела та нейтралізацію загрози. Існують різні види DoS-атак:
  - **Флудинг-атаки**, під час яких система отримує надмірну кількість трафіку.
  - **Атаки виснаження ресурсів**, спрямовані на знищення апаратних чи програмних можливостей.
  - **Протокольні атаки**, що використовують уразливості у протоколах зв'язку.

  Методи захисту від таких атак включають використання міжмережевих екранів (брандмауерів), систем виявлення аномалій, балансування навантаження та інші стратегії. Хмарні сервіси також пропонують спеціалізовані інструменти для боротьби з DDoS-атаками, забезпечуючи масштабованість ресурсів і автоматичне реагування.
- **Фізичний доступ** – несанкціонований користувач, отримавши доступ до обладнання, може копіювати дані або змінювати систему, встановлюючи шкідливе програмне забезпечення. Для запобігання таким атакам використовують шифрування та модулі захисту, як-от Trusted Platform Module.
- **Підслуховування** – перехоплення комунікацій між системами, включаючи використання електромагнітних випромінювань (наприклад, за стандартом TEMPEST).
- **Поліморфні загрози** – новий тип багатовекторних атак, що змінюють форму для обходу систем захисту.
- **Фішинг** – отримання конфіденційної інформації через обман, зазвичай за допомогою підроблених електронних листів або веб-сайтів.
- **Підвищення привілеїв** – несанкціоноване збільшення прав доступу, що дозволяє звичайним користувачам отримати контроль над системою.

- **Зворотна інженерія** – аналіз програмного забезпечення для виявлення його структури та принципів роботи, що може використовуватися як для досліджень, так і для злочинних цілей.

Висновки. У статті було розглянуто та проаналізовано сучасні методи й технології захисту ресурсів SMTP-сервера (Postfix) від несанкціонованого використання.

Список літератури:

1. Simple Mail Transfer Protocol URL: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc5321 (date of access: 19.01.2025).

2. TCP SYN Flooding Attacks and Common Mitigations URL: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc4987#appendix-A (date of access: 19.01.2025).

3. Postfix Documentation URL: http://www.postfix.org/documentation.html (date of access: 19.01.2025).

4. Postfix SMTP relay and access control. *The Postfix Home Page*. URL: https://www.postfix.org/SMTPD_ACCESS_README.html (date of access: 19.01.2025).

5. Deploying mail servers | Red Hat Product Documentation. *Red Hat Product Documentation*. URL: https://docs.redhat.com/en/documentation/red_hat_enterprise_linux/9/html/deploying_mail_servers/index (date of access: 01.02.2025).

6. Cartier G., Cartier J. F., Fernandez J. M. Next-Generation DoS at the Higher Layers: A Study of SMTP Flooding. Network and System Security. NSS 2013. Lecture Notes in Computer Science. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. Vol. 7873. P. 149–163. DOI: 10.1007/978-3-642-38631-2_12.

7. Deibert R. J. Toward a Human-Centric Approach to Cybersecurity. *Ethics & International Affairs*. 2018. Vol. 32, no. 4. P. 411–424. URL: https://doi.org/10.1017/s0892679418000618 (date of access: 19.01.2025).

8. ДСТУ ISO/IEC 27032:2016 Інформаційні технології. Методи захисту. Настанови щодо кібербезпеки (ISO/IEC 27032:2012, IDT)

9. Гуйда О. Г., Кисельов В. Б., Омецинська Н.В. Інформаційні системи для оцінювання кіберзагроз. Challenges and threats to critical infrastructure. Collective monograph. Detroit, Michigan, USA, 2023. P. 161–163.

10. Омецинська Н. В., Гуйда О. Г., Прокопенко І. Ю. «Дослідження технологій інформаційного пошуку для використання в семантичній мережі», The 4th International scientific and practical conference “Current challenges of science and education” (December 11-13, 2023) MDPC Publishing, Berlin, Germany.

Ometsinska N.V., Guida O.G., Kucheriavyi V.M., Vishemirska Ya.S., Bozhenko M.I. MISSCE SMTP SERVER IN THE MAIL SERVER PARAMETERS

Due to the constant increase in the number of cyber attacks and threats to information security, protecting the computing resources of mail servers is becoming critically important m for organizations of various sizes.

The article examines the role of the SMTP server in the parameterization of the mail server as a key element of the electronic mail system. SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) is the main protocol for transferring electronic mail between servers, which ensures delivery across the global Internet. Parameterization of the mail server, or SMTP server, is an important aspect for ensuring its reliability, security, productivity and scalability. The correct configuration of the SMTP server determines how emails are processed, manipulated, and deleted, as well as how protection against spam, phishing, and other cyber threats is ensured.

The article is devoted to the development of methods and features of protecting the SMTP server on the Postfix application – one of the most advanced and flexible solutions for processing electronic mail. Postfix ensures high productivity and reliability of the robot, protecting against current threats will require additional security steps to counter various types of attacks, such as spam, phishing, DoS attacks and unauthorized access attempts.

An analysis of the Postfix architecture and its main components was carried out, which allows us to identify potential applications and ways of their subtraction. The mechanisms of authentication (SMTP AUTH), authorization and access control are reviewed, including the use of SSL/TLS to ensure secure connection, protection from man-in-the-middle attacks and encryption of data during transmission. Proper monitoring allows you to detect anomalies in a functioning server and promptly respond to possible threats, such as unauthorized access attempts or DoS attacks.

Effective approaches to configuring Postfix have been identified to change the focus on the server and increase its productivity, focusing on the optimization of work with drawers, flow control and alternative caching mechanisms.

The results of this investigation may be of benefit to system administrators, information security officers, and investigators who investigate security problems in information systems and security systems.

Key words: *SMTP server protection, Postfix, cyber security, authorization and access control, SSL/TLS encryption, spam filtering, fitting protection, DoS attacks, information security of mail servers, prevention of cyber attacks.*

UDC 378.016:004
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/26

Palonyi A.S.
Ukrainian State Flight Academy

Zienov D.O.
Ukrainian State Flight Academy

ISSUES IN THE DEVELOPMENT OF AN ADAPTIVE LEARNING ENVIRONMENT FOR MASTERING TEAMWORK SKILLS OF AIR TRAFFIC CONTROLLERS

The subject matter of the article addresses the development of an adaptive learning environment for the formation and enhancement of air traffic controllers' teamwork skills within the context of contemporary aviation industry challenges. The goal of the article is to research and develop an approach for creating an adaptive learning system for practical training of air traffic controllers, taking into account both individual and group learning needs, which will improve the effectiveness of developing both technical and non-technical skills in air traffic controllers. The tasks of the article: to analyze existing approaches to air traffic controller training and their limitations in the context of teamwork skills development; to identify key cognitive functions necessary for effective teamwork in air traffic management; to develop a concept of a hybrid approach to adaptive learning for air traffic controllers. The methods used are: logical analysis, comparative analysis, and systems approach to studying complex learning environments. The article examines a comprehensive approach that combines personalized adaptive learning with adaptive group training for developing air traffic controllers' team interaction skills. A three-level training methodology has been proposed, encompassing individual preparation, pair training, and full-format group scenarios with gradual complexity increase according to learning progress. Key cognitive functions for implementation in the adaptive training complex have been identified, including team synergy, adaptability, goal-setting, information integration and formation of a holistic air situation picture, predictive modeling, metacognitive and emotional regulation functions. The article presents mechanisms for monitoring both individual and team interaction indicators, enabling the formation of temporary learning groups of air traffic controllers with complementary performance indicators. Attention is given to developing a system for adaptive regulation of complexity levels and focusing on specific aspects of team interaction.

Key words: *air traffic controllers specialists, teamwork skills, group training, simulators, adaptive learning environment.*

Formulation of the problem. According to the Flight Safety Foundation Aviation Safety Network data for 1990-2021, despite an overall decrease in aviation incidents in the early 2000s, 10-20 serious incidents have been recorded annually during the last five years (excluding 2020 due to the pandemic) [1]. Between 2001 and 2022, there were 3,769 aviation accidents resulting in 20,172 fatalities [2]. Research indicates that human-to-human interaction errors in civil aviation contributing to incidents constitute 38.8% of cases. The majority of communication problems (80.6%) were verbal in nature, as opposed to non-verbal (19.4%) [3]. It is established that the most frequent method of internal communication between air traffic control specialists (ATCs) is verbal (70%), while the remainder (30%) comprises a mixture of verbal and non-verbal means. Of particular note is that approximately 82% of aviation incidents related to ATCs operations are attributed to human factors [4]. A comprehensive analysis of human factors in ATCs errors, conducted by the FAA Civil Aerospace Medical Institute (No. DOT/FAA/AM-05/25), revealed that 86% of errors (8,093 cases out of 9,404) were associated with basic skills, while only 14% (1,311 cases) were related to decision-making errors. Of the analyzed basic skill errors, 16% (1,486 cases) were caused by communication problems, 10% (961 cases) occurred due to coordination errors, 6% (583 cases) resulted from data entry errors, and 1% (143 cases) arose during shift handovers between ATCs [5].

Teamwork represents a system of interaction between individuals united by common goals and objectives. Any professional team is characterized by the interdependence of its members, regular collaborative activities including training, clear role distri-

bution for specific periods, and the ability to create synergistic effects from joint work [6].

The study of communicative processes between team members is a key method for understanding cooperative activity mechanisms. Such activity involves coordinating individual participants' actions, forming a shared vision of the work process, and establishing effective communication for information exchange and creating a unified system of mutual understanding and language [7]. In many professional environments, particularly in air traffic control (ATC) systems, information resources are accessible to all team members, regardless of their individual responsibilities. The co-location of operator workstations creates conditions for mutual observation and information exchange through both direct communication channels (verbal messages) and indirect ones (observing colleagues' actions, using shared information systems). The work environment provides contextual cues about current and planned actions, enabling participants to understand their colleagues' intentions and strategies. This is particularly evident in the ATC system where, despite clear distribution of functional responsibilities, work is considered a collective task requiring close cooperation between ATCs. Their interaction aims to integrate various information flows to coordinate actions within the overall mission of ensuring efficient and safe air traffic.

In the context of aviation industry's historical development, ATCs training traditionally relied on strict adherence to regulatory standards and normative requirements. The prevailing paradigm considered professional competence in emergency situations as a natural outcome of these aviation specialists' technical training. However, detailed analysis of ATC incident statistics demonstrates significant limitations of this approach: purely technical qualification proves insufficient for effective response to critical situations in modern conditions [8].

While most contemporary research focuses on communication problems between ATCs and pilots and optimizing professional training in these aspects [9, 10], issues of erroneous interaction between ATCs and ineffective team decision-making warrant separate attention. Paradoxically, despite high expectations for professional excellence in ATCs teams within their operational environment, many air navigation service providers do not implement systematic team training programs. Considering the fundamental role of coordinated teamwork in ensuring ATC safety and efficiency, there is an urgent need to develop an intelligent adaptive learning environment for teamwork and communication skills acquisition among ATCs.

Analysis of recent research and publications. The professional training of ATCs worldwide employs a differentiated approach to synthetic training tools. According to the European Organization for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL) standards, the practical training system for ATCs is based on four primary equipment categories used as simulators [11]. The first category comprises High-Fidelity Simulators (HI-FI SIM), which provide maximum correspondence to actual working conditions. The second category includes Medium-Fidelity Simulators (SIM), designed for individual and group training. The third category consists of Part-Task Trainers (PTT), developed for mastering specific professional competencies. The fourth category encompasses Other Training Devices (OTD) and software modeling complexes.

The scientific community and practitioners dedicate considerable attention to analyzing the effectiveness of existing training complexes, among which the leading positions are held by Total Airspace and Airport Modeler (Boeing/Jeppesen), Reorganized ATC Mathematical Simulator and ESCAPE by EUROCONTROL, Simmod PRO (FAA), and Air Traffic Optimization (Airtopsoft) [12]. Despite these systems' high technological level, researchers have identified several significant limitations requiring careful consideration and innovative solutions. Foremost, the economic aspect of implementing these training complexes warrants attention. The high cost of these systems creates substantial barriers to their widespread use in educational processes, particularly in training future specialists at institutions with limited financial resources. This issue becomes especially pertinent given the growing demand for qualified ATCs.

An equally important challenge lies in the technical architecture of existing complexes. The closed nature of the software significantly restricts the pedagogical and methodological staff's ability to adapt the learning process to specific student groups' needs and account for regional ATC organization peculiarities. Of particular concern is the limited flexibility of existing systems in modeling various professional interaction scenarios. The most acute problem remains the absence or limitation of specialized tools for developing teamwork skills, which are critical components of ATCs' professional competence. This situation complicates the processes of improving training methodologies for future ATCs, particularly concerning the development of new algorithms for automated generation of group training scenarios

adapted to current student models, construction of shared virtual learning environments for remote mastery of team interaction skills, and implementation of other innovative pedagogical approaches. ESCAPE and ESCAPE-Light developed by EUROCONTROL overcome most of the aforementioned limitations, serving as effective and flexible tools for researchers working on artificial intelligence and machine learning projects, and can be used in basic ATC controller training at universities [13]. It is an accessible tool for specialized educational institutions and research centers. The simulator features a modular architecture, providing extensive functionality including CPDLC and high-fidelity flight modeling, allowing users to connect new components and exchange data with other synthetic training tools through appropriate APIs provided by EUROCONTROL. This enables researchers to freely develop and test enhanced algorithms in real-time within a realistic simulated environment, utilizing data and demonstrative events from previous training sessions.

Communication between ATCs results from their interaction with each other and their working environment, considering ATC sector complexity, air traffic intensity, and other factors. When scientists study ATC work in laboratory conditions, they can better understand how various factors influence communication quality between ATCs. Researchers can configure experimental conditions: varying task complexity, adjusting workload, determining training shift duration, and controlling equipment operation. This allows them to thoroughly examine how specific changes in the working environment affect interaction between ATCs.

Theoretical studies on the evolution of complex cognitive skills training methods, conducted by a group of researchers led by Salden, Paas, and van Merriënboer [14], identified key fundamental transformations in educational approaches over the past three decades. Of primary significance is the transition from non-adaptive to adaptive learning methods. While both methods consider prior professional experience when forming ATC training programs, non-adaptive methods are limited to determining the sequence of training tasks exclusively at the preparatory stage. In contrast, adaptive approaches enable dynamic adjustment of task sequences directly during the training process, based on objective indicators of each student's individual progress.

The rapid development of educational technologies has created prerequisites for implementing adaptive learning through automated training courses and learning management systems. These systems function as quasi-subjects of the educational process, providing a personalized approach to each student and helping to fill gaps in their knowledge and skills. Domestic researcher Demianenko V. M. emphasizes the necessity of developing adaptive learning systems using artificial intelligence to ensure open and accessible education [15]. Such systems can overcome language barriers, accommodate special student needs, and eliminate disparities between different educational institutions. However, it remains critically important to maintain the teacher's leading role in the educational process and implement new technologies in a pedagogically balanced manner to prevent the emergence of student «infantilization» effects. In his view, successful integration of adaptive learning should enhance, rather than replace, the educator's role as a key figure in education.

Task statement. The research purposes of the articles are to discover individual-cooperative adaptive learning approach and the key issues in the development of an adaptive team learning environment for ATCs.

Outline of the main material of the study. We propose a hybrid approach that combines personalized adaptive learning with adaptive group training for the ATCs to develop team interaction skills. The methodology is based on the complexity of team scenarios: The 1st stage of training (*initial level*) comprises individual adaptive training to develop basic communication and coordination skills through interaction with a «reference controller» in the learning module of the Adaptive System for Team Practical Training of Air Traffic Controllers (ASTPT-ATC); the 2nd stage (*intermediate level*) encompasses pair training; the 3rd stage (*target level*) involves transition to full group scenarios at higher levels of team skill development. The system will monitor both individual and team performance indicators of team interaction. Applying a *dynamic adaptive team formation approach*, ASTPT-ATC will facilitate the formation of temporary learning groups of ATCs with complementary performance indicators, additionally enabling more effective students to support those with lower indicators in developing specific components of team competence. In subsequent training stages, team composition rotation will occur based on analysis of current performance results, considering the progress dynamics of each participant with emphasis on weak points. The ASTPT-ATC's prognostic module, based on each student's dynamic profile, will evaluate the potential for further development of the learning team and its members, determining the optimal

moment for changing the composition of pairs or groups of future ATCs. In the context of modernizing educational methodologies, particular relevance is attached not only to the implementation of *automated task selection by adaptive learning systems* but also to the integration of mechanisms for independent task selection by students. This comprehensive approach opens additional opportunities for individualization and adaptivity of the learning process, creating prerequisites for productive self-regulated and self-directed learning of ATCs [16]. The fundamental differences between the considered training approaches are presented in Table 1.

The development of ASTPT-ATC must meet a complex of interrelated requirements. The structural-organizational requirement entails creating an expandable modular architecture that supports simultaneous operation of multiple teams with varying numbers of participants and their pairwise interaction with flexible configuration of training scenarios on

Table 1

Comparative Characteristics of Traditional, Classical Adaptive, and Individual-Cooperative Adaptive Learning Approaches to Training ATCs

CRITERION	Traditional Training	Classical Personalized Adaptive Learning	Individual-Cooperative Adaptive Learning with Self-Regulation Elements
Learning Process Focus	Teacher-centered, who serves as the main source of knowledge and control	Student-oriented process, focused on individual needs and learning pace	Balanced approach focused on the student, emphasizing individual development within the context of group interaction
Curriculum Formation Approach	Fixed training program, defined at course beginning. Changes are rare and difficult to implement	Program adapts to each student based on their performance and learning absorption rate. Involves forming individual learning trajectories	Flexible program considering both individual student style characteristics and current learning performance, as well as teamwork needs. Learning trajectory dynamically modifies depending on pair/group learning activity progress
Teacher's (Instructor's) Role	Unified role as sole expert and controller of the learning process	Acts more as a facilitator supporting individual learning	Differentiated role that change depending on training stage, mode, individual and team needs
Learning Format	Predominantly group work with fixed composition. Limited opportunities for individual approach	Individual work with the system. Pace and task complexity are personally tailored	Mixed format: individual sessions alternate with pair and group work. Team composition is adaptively selected and periodically changed
Learning Accessibility	Mandatory physical presence at fixed times with clearly defined learning periods	Flexible schedule adapting to individual training pace. Open learning environment with remote access possibility using information and telecommunication technologies	Combined approach balancing individual preparation pace in personalized learning format with group synchronization when practicing interaction skills. Hybrid environment combining face-to-face interaction with digital learning tools and possible learning environment virtualization. Based on adaptive model considering both individual dynamics and team synchronization needs
Development of Communication and Team Skills	Develops naturally through joint learning	Limited team skills development due to focus on individual work	Purposeful formation of team competence through group composition rotation and special interaction scenarios
Assessment	Current periodic and final assessment according to predetermined schedule	Continuous progress monitoring with dynamic complexity adaptation	Constant performance monitoring with multi-level assessment system considering both individual and team learning activity indicators
Metacognitive Development	Develops primarily through independent reflection and experience exchange	Systematic development of individual metacognitive skills through special tasks	Comprehensive development of both individual and team metacognitive abilities through joint reflection and experience analysis

the simulator. The environment's functionality must meet three main requirements: 1) realistic modeling of various problem situations integrated into group/pair scenarios, with the possibility of introducing complications in the team interaction process; 2) provision of different formats for communication and coordination between students; 3) implementation of adaptive learning management to adjust task complexity and form individual learning trajectories based on intelligent analysis results of individual and team indicators of group learning activity [17]. Considering the above, team adaptive simulator training of ATCs should be built on the cognitive functions discussed below.

Modern ATC training methodology should encompass complex processes of coordination, control transfer and communication, shift handover, and team debriefing through implementing structured protocols, practicing multi-sector scenarios and resolving inter-sector problem situations, developing interaction skills with automated systems and decision support systems, and improving communicative strategies for safety-critical information transfer. Thus, the basic **team synergy function** involves developing mechanisms for achieving emergent effects and results during training exercises. An important element is developing skills to utilize each team member's strengths and compensate for individual limitations.

Developing adaptability as a professionally important quality of ATCs should be ensured through modeling abnormal and emergency situations, practicing flexible response strategies to changing operational conditions, training stress resistance when performing professional tasks under increased workload, and mastering team resource management techniques in the dynamic ATC environment.

The functional aspect of goal-setting and management in the learning process should focus on developing future ATCs' systemic vision of professional task hierarchy and developing skills in balanced decision-making under multiple objectives. **The resource balancing function** aims to develop ATCs' ability to optimally distribute attention and cognitive resources between parallel ATC tasks. Developing ATCs' ability to dynamically redistribute resources according to changing task priorities is important. Special attention during group training should be paid to mastering techniques for modifying target settings according to air situation dynamics and ensuring effective communication regarding changes in target priorities between ATC team members, particularly under severe time constraints.

The integration function focuses on developing the ability for comprehensive analysis of heterogeneous information and forming a holistic picture of the air traffic situation. Research development in situational awareness has progressed parallel to technological advancement and expanded scientific understanding of human interaction. While initial research stages primarily focused on individual situational awareness, the scientific community gradually recognized the necessity of studying collective situational awareness, particularly in complex environments involving multiple process participants. The contemporary understanding of team situational awareness encompasses two interrelated aspects. First, it is a dynamic process of perception and comprehension of multiple information elements by several individuals working toward a common goal. Second, it is the team members' shared understanding of past, present, and future states of task elements being performed [18]. In this context, it is important for ATCs to practice skills in synthesizing data from various sources and their coordinated interpretation. Developing team sub-competency in forming a shared situation image should be facilitated through a system of team exercises aimed at practicing coordination mechanisms between ATC sectors, improving professional communication, and utilizing tools for shared situational awareness among ATCs. Another important element is developing the ability to identify and resolve discrepancies in situation perception among different ATC process participants. We find it methodologically justified to include practical elements in future ATCs' training programs that require interpretation of incomplete data, verification of air situation development hypotheses, and recognition of the need to correct shared mental models.

Given current aviation industry development trends, including to ATC training scenarios for interaction with AI-based automated support tools becomes particularly important, aimed at forming a balanced understanding of automated systems' capabilities and limitations while maintaining readiness for independent decision-making regarding control actions, when necessary. The methodological foundation for such training is multi-level structuring of learning scenarios, involving gradual increase in complexity of interaction models with automated DSS.

In the context of modern digital transformation, ATCs team training undergoes fundamental qualitative changes – the learning environment evolves into a multidimensional space of professional interaction, synergistically combining two key aspects: communication in the air traffic service system and their

integration with intelligent autonomous systems. An example of such a system is the modern development of «digital ATCs» [19].

Implementation of group learning scenarios integrating interaction with digital assistants will simultaneously develop joint decision-making skills when working with intelligent management systems and interpersonal communication skills. Systematic exchange of professional experience regarding autonomous systems' operational features will promote expert knowledge formation and deeper understanding of teamwork principles under technological transformation. Developing the metacognitive component of professional training, in this context, should focus on developing the team's ability for critical analysis of automated recommendations, understanding algorithmic solution limitations, reflective assessment of interaction effectiveness with support systems, and collective learning based on accumulated experience. Initial training stages should focus on mastering basic algorithms of joint activities under normal system operation conditions, while advanced levels should include elements of uncertainty and necessity for non-standard decision-making. Special attention should be paid to practicing function distribution mechanisms among controller shift members, action coordination during control method changes, and technical/software failures in automation functions. Development of ATCs' communicative sub-competency of team competency can be realized through forming effective information exchange skills regarding flight safety element functioning within automated systems and coordinating shared situational awareness, particularly during support tool failures (e.g., MTCD used for detecting potential medium-term conflicts) or forced limited use within specific ATC sectors.

The **predictive modeling function** involves developing ATCs' ability for anticipatory analysis of air situation development and potential impact of various limitations on processes related to air traffic flow management and airspace use. It appears methodologically justified to include elements of potential conflict situation prediction and proactive action planning for their prevention in the training program. The **uncertainty management function** aims to develop tolerance for uncertainty and decision-making competence under conditions of incomplete or contradictory information about the operational environment's state within own and adjacent sectors.

Given the above, the **metacognitive regulation function** is designed to ensure the development of reflexive self-control and self-regulation mechanisms not only for ATCs' own learning and professional activities but also for mutual control and cross-verification skills when interacting with colleagues. Implementation of this function creates a foundation for developing: 1) skills of conscious monitoring of one's cognitive processes and their correction, when necessary, 2) ability for attentive conscious awareness of potential cognitive problems in colleagues of ATC shift and their support, when needed. The implementation of the «planning-execution-control» cycle in air ATC simulator training should include systematic practice of structured planning skills, execution monitoring, results evaluation, and action correction based on feedback.

The **emotional regulation function** involves developing professional stress management competency among ATCs at the team level during training. An important element is implementing conditions in group scenarios that provide for team members to offer mutual support during training sessions. Primarily, applying this approach, with predetermined and agreed-upon verbal and non-verbal markers, is designed to teach ATCs to timely and accurately recognize stress signs in their colleagues. The adaptive environment should enable analysis of team participants' emotional reactions, for example, through changes in behavior, voice tone, and speech rate during task performance. Observing cascading stress reactions among team members, the system should identify cases of desynchronization in team interaction related to elevated stress levels, indicate the need to review communication and mutual support strategies, and provide recommendations for optimizing group dynamics. Results of intelligent analysis of accumulated data (found significant correlations between various indicators) can be used to modify training scenarios in aspects of task complexity and integration of specialized exercises aimed at developing identified weaknesses in team stress resistance development.

The group of parameters most significantly influencing decision-making accuracy, ability to operate under high workload conditions, and interaction between adjacent ATC sectors comprises the ATCs' cognitive workload and emotional states. Unfortunately, these parameters are also the most challenging to measure directly. In such cases, only indirect assessment is possible, based on event response time, pupil movements, and speech clarity. The complexity of measuring such parameters likely necessitates extensive training of the intelligent system with each specific air traffic controller, essentially requiring adaptation to individual behavioral patterns and

responses. However, following such system training, it becomes possible to modify simulator task parameters very precisely and flexibly for each operator while accounting for how situations in one area of responsibility influence adjacent sectors. Since the system, after being trained for each specific controller, can determine their psychophysical and cognitive state with reasonable accuracy, it enables monitoring of controller-to-controller interactions, allowing for maximally adaptive influence on team skill formation. ATCs predisposed to operating under high traffic intensity conditions may experience a loss of concentration and attention when this parameter drops below a certain threshold. Conversely, ATCs, who perform their functions well and accurately under medium and low-intensity conditions have a high likelihood of losing situational awareness in their ATC sector due to elevated stress levels, when traffic intensity increases significantly. The methods for optimizing workload can vary considerably. For example, consider the interaction between Tower Controller and Approach Controller. The system has determined, that when air traffic intensity in the TMA reaches a certain threshold, further workload increase for the controller operating in this area leads to delayed reactions, command confusion, increased nervousness in inter-position communication, and decreased accuracy and timeliness of information transfer. In such situations, the ASTPT-ATC will reduce departure traffic intensity from the airport in the direction served by this sector and change the number of aircraft proceeding for landing through this sector. Through such «waves» of intensity, it becomes possible to identify the optimal workload level for each controller to reduce occupational stress or vice versa. This dual-focused approach enables both the customization of workload for individual ATCOs, creating optimal conditions for the development of procedural and team-oriented skills, while simultaneously generating individually tailored challenges to enhance controllers' capacity for efficient performance under varying air traffic intensity and its dynamic fluctuations. This facilitates the development of stress resilience and optimization of both personal workload and that of colleagues in adjacent ATC sectors as part of the teamwork within the collaborative operations.

The effectiveness of ASTPT-ATC implementation for forming and developing team interaction skills largely depends on creating realistic scenarios that integrate various cognitive functions, as well as adaptive formation of the learning group itself, with gradual complexity increase according to learning progress. The training system should provide adaptive regulation of complexity level and focus on specific aspects of team interaction, considering both individual results and pace of group training exercise completion, as well as integral team effectiveness indicators. The application of learning adaptation algorithms in ASTPT-ATC is based on objectivity and consistent application of the criteria base for evaluating team work effectiveness in ATC training, where each cognitive function defines specific performance parameters.

Conclusions. The analysis of existing learning approaches has revealed several limitations to develop ATCs' team competency and adapt to their individual and group learning needs. According to the authors, the proposed approach to development an adaptive learning platform for team practice in ATC shows promising potential to resolve the challenges. The integration of cognitive functions essential for teamwork, combined with emotional and metacognitive regulatory mechanisms, creates a comprehensive learning environment that more accurately reflects the complexity of real ATC operations. Monitoring of the described ATCs' state parameter groups and various response combinations from the intelligent adaptive learning environment to changes in these parameters will enable the construction of highly flexible and individually tailored simulator training scenarios. This capability is particularly crucial for developing teamwork competence, allowing ATCs to enhance both their direct ATC skills within their sector and their coordination capabilities with adjacent sector.

Bibliography:

1. Flight Safety Foundation Aviation Safety Network : web-site. URL: https://aviation-safety.net/statistics/period/stats.php (date of access: 25.01.2025).

2. Bureau of aircraft accidents and archives : web-site. URL: https://www.baaa-acro.com/crashes-statistics (date of access: 21.01.2025).

3. Luiks H. Communicational Problems in Aviation Operation. 2016. URL: https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22449.74086 (date of access: 21.01.2025).

4. Kim Jung-Bin, Park Sung-Sik. A Case Study on Aircraft Accidents Due to Air Traffic Controller's Human Error. *J. Korean Soc. Aviat. Aeronaut*. 2021. Vol. 29, no. 4. P. 124-133. URL: https://doi.org/10.12985/ksaa.2021.29.4.124. (date of access: 22.01.2025).

5. Scarborough A., Bailey L., Pounds J. Examining ATC Operational Errors Using the Human Factors Analysis and Classification System. 2005. 39 p.

6. Brannick M. T., Prince C. An overview of team performance measurement. In: M.T. Brannick, E. Salas, C. Prince (Eds.). *Team performance assessment and measurement – theory, methods and applications*. New Jersey. Laurence Erlbaum Associates. 1997. P. 3-18.

7. Leplat J. Collective activity in work: Some lines of research. *Le Travail Humain: A Bilingual and Multi-Disciplinary Journal in Human Factors*. 1994. Vol. 57, no. 3. P. 209-226.

8. Malakis S., Kontogiannis T., Kirwan B. Managing emergencies and abnormal situations in air traffic control (part II): Teamwork strategies. *Applied ergonomics*. 2010. Vol. 41. P. 628-635. URL: https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.12.018. (date of access: 22.01.2025).

9. Kaya M., Ateş S. S. The Share of Communication Errors in Aircraft Accidents and Artificial Intelligences That Can Be Developed Based on Communication in Aviation. *International Journal of Entrepreneurship and Management Inquiries.* 2023. Vol. 7, no. 12. P. 82-95. URL: https://doi.org/10.55775/ijemi.1143651 (date of access: 22.01.2025).

10. Task Load Caused by Frequent Sector Changes for Aircrews and Controllers. State-of-the-Art – Litterature Study. EUROCONTROL. LTI-4-20-FREQ – EEC Note No. 07/08. 76 p.

11. European Organisation for the Safety of Air Navigation. Simulations Facilities for Air Traffic Control Training. EUROCONTROL. HUM.ET1.ST07.3000-REP-02. Belgium, Brussels. 2000. 88 p.

12. Sidhom M. A Teamwork-Oriented Air Traffic Control Simulator. *Naval postgraduate school Monterey*: Master's Thesis, California. 2006. 117 p.

13. ESCAPE EUROCONTROL simulation capabilities and platform for experimentation: World-class air traffic control real-time simulator : web-site. URL: https://www.eurocontrol.int/simulator/escape (date of access: 21.01.2025).

14. Salden R. J. C. M., Paas F., van Merriënboer J. J. G. Personalised adaptive task selection in air traffic control: Effects on training efficiency and transfer. *Learning and Instruction*. 2006. Vol. 16. P. 350-362.

15. Дем'яненко В. М. Модель адаптивної навчальної системи інформаційного простору відкритої освіти. *Інформаційні технології і засоби навчання.* 2020. Т. 77, № 3. С. 27-38. URL: https://doi.org/10.33407/itlt.v77i3.3603 (date of access: 23.01.2025).

16. Пальоний А. С., Колівашко В. В. Метод адаптивної передтренажерної підготовки авіадиспетчерів на засадах самоспрямованого навчання. *Авіаційно-космічна техніка і технологія.* 2022. № 1(177). С. 64-77.

17. Пальоний А. С., Зєнов Д. О. Вимоги до динамічно керованого адаптивного навчального середовища диспетчерів управління повітряним рухом з розвитку командної компетентності. *Innovative Education: Problems and Prospects of Scientific Research* : L international scientific and practical conference's proceedings, Stuttgart, Germany, December 4-6, 2024. С. 356-359.

18. Chi Y, Nie J., Wang Y., Delahaye D. A Review of Situational Awareness in Air Traffic Control. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. 17 p. URL: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3336415 (date of access: 24.01.2025).

19. Jameel M., Tyburzy L., Gerdes I., Pick A., Hunger R., Christoffels L. Enabling Digital Air Traffic Controller Assistant through Human-Autonomy Teaming Design. 2023. 9 p. https://doi.org/10.1109/DASC58513.2023.10311220 (date of access: 24.01.2025).

Пальоний А.С., Зєнов Д.О. ПИТАННЯ РОЗРОБКИ АДАПТИВНОГО НАВЧАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ ОПАНУВАННЯ АВІАДИСПЕТЧЕРАМИ НАВИЧОК КОМАНДНОЇ РОБОТИ

Предметом статті є питання розробки адаптивного навчального середовища для формування і розвитку в авіадиспетчерів навичок командної роботи в контексті сучасних викликів авіаційної галузі. Метою статті є дослідження та розробка підходу до створення адаптивної системи навчання для практичної підготовки авіадиспетчерів з урахуванням як індивідуальних, так і групових потреб у навчанні, що дозволить підвищити ефективність формування в авіадиспетчерів як технічних, так і нетехнічних навичок. Завдання статті: проаналізувати існуючі підходи до навчання авіадиспетчерів та їх обмеження в контексті розвитку навичок командної роботи; визначити ключові когнітивні функції, необхідні для ефективної командної роботи в системі управління повітряним рухом; розробити концепцію гібридного підходу до адаптивного навчання авіадиспетчерів. Методи дослідження: логічний аналіз, порівняльний аналіз, системний підхід до вивчення складних навчальних середовищ. У статті розглянуто комплексний підхід, що поєднує персоналізоване адаптивне навчання з адаптивним груповим тренінгом для розвитку навичок командної взаємодії авіадиспетчерів. Запропоновано трирівневу методологію навчання, що включає індивідуальну підготовку, парні тренування та повноформатні групові сценарії з поступовим підвищенням складності відповідно до прогресу навчання. Визначено

основні когнітивні функції для реалізації в адаптивному тренажерному комплексі, включаючи функції командної синергії, адаптивності, цілепокладання, інтегрування інформації та формування цілісної картини повітряної обстановки, прогностичного моделювання, метакогнітивної та емоційної регуляції. Запропоновано механізми моніторингу як індивідуальних, так і командних показників взаємодії, що дозволяють формувати тимчасові навчальні групи авіадиспетчерів з комплементарними показниками успішності. Увагу приділено розробці системи адаптивного регулювання рівня складності та фокусування на конкретних аспектах командної взаємодії.

Ключові слова: *авіадиспетчери, навички командної роботи, групове навчання, тренажери, адаптивне навчальне середовище.*

УДК 004.056.53:[004.7:004.032.26]
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/27

Пахомова В.М.
Український державний університет науки і технологій:
Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту

Хрестян А.В.
Український державний університет науки і технологій:
Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту

ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОХ ПІДХОДІВ ЩОДО ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАТРИМКИ НА МАРШРУТИЗАТОРІ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОМЕРЕЖНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

На сучасному етапі в комп'ютерних мережах залізничного транспорту застосовується протокол OSPF, при використанні якого в реальному часі з'являється проблема завдяки постійним змінам обсягів передаваємих даних, і для вирішення якої доцільно використання нейромережної технології, що підтверджує актуальність теми. У роботі створено базу даних затримок на маршрутизаторі комп'ютерної мережі залізничного транспорту. Проведений розрахунок показника Херста часового ряду затримок на маршрутизаторі показав, що він персистентний. Прогнозування затримки на маршрутизаторі комп'ютерної мережі залізничного транспорту здійснено засобами нейронної мережі конфігурації «4-1-16-1» (перший підхід) та нейронечіткої мережі конфігурації «3-6-8-8-1» (другий підхід), що створені в середовищі MatLAB за допомогою додатків Neural Network Toolbox та Fuzzy Logic Toolbox відповідно. За першим підходом проведено дослідження середньоквадратичної похибки нейронної мережі при різній кількості прихованих нейронів (10, 50 та 90) за різними алгоритмами навчання (Levenberg-Marquardt, Bayesian Regularization та Scaled Conjugate Gradient). За другим підходом проведено дослідження середнього значення похибки нейронечіткої мережі при різних функціях приналежності нейронів за різними методами оптимізації навчання (гібридним та зворотного поширення помилки). На створених нейронних моделях визначені їх відповідні оптимальні параметри. Виконано оцінювання за допомогою MAPE прогнозу затримки на маршрутизаторі з використанням створених нейронних моделей. Визначено, що найменше значення MAPE при прогнозуванні затримки на маршрутизаторі комп'ютерної мережі Придніпровської залізниці досягається на створеній нейронечіткій мережі конфігурації «3-6-8-8-1» в зрівнянні з прогнозованими значеннями затримок, що отримані на нейронній мережі конфігурації «4-1-16-1».

Ключові слова: *маршрутизатор, база даних, затримка, прогнозування, показник Херста, MLP, ANFIS, оптимальні параметри, похибка, MAPE.*

Постановка проблеми. Створення ефективної системи маршрутизації в комп'ютерних мережах залізничного транспорту вимагає застосування якісно нових підходів до визначення оптимального шляху, які повинні ґрунтуватися на адаптивних алгоритмах здатних до самонавчання. Найбільш перспективним напрямком у створенні подібних систем маршрутизації на основі прогнозування параметрів є застосування нейромережної технології.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сучасному етапі в інформаційно-телекомунікаційній системі (ІТС) залізничного транспорту України у якості протоколу маршрутизації використовується протокол OSPF (Open Shortest Path First), в основі якого використання алгоритму вибору найкоротшого маршруту. У реальному часі збільшення потоків даних в ІТС призведе до появи пікових навантажень, які в свою чергу ведуть до істотних затримок на маршрутизаторах, що складають оптимальний шлях в комп'ютерній мережі. Відомо, що загалом для здійснення прогнозування доцільно використання нейронних мереж (НМ) [4-6]: багатошарового персептрону (Multi Layer Perceptron, MLP); радіально-базисної мережі (Radial Basis Function Network, RBF); узагальнено-регресійної мережі (General Regression Neural Network, GRNN), а також нейронечіткої мережі (ННМ) [2-3, 7, 9-10]. На сьогодні відомо, що різні НМ/ННМ надають різні результати прогнозування. Однак, разом з тим важливим недоліком таких методик є відсутність універсальності їх застосування при визначенні оптимального

шляху з використанням різних метрик (кількість маршрутизаторів, затримки на маршрутизаторах, пропускна спроможність каналів, втрати на лінії та інші). Для прогнозування затримки на маршрутизаторі комп'ютерної мережі залізничного транспорту засобами НМ та ННМ потребується проведення додаткових досліджень стосовно визначення їх оптимальних параметрів.

Постановка завдання. Проведені дослідження ставили за мету розвиток методики прогнозування затримки на маршрутизаторі комп'ютерної мережі залізничного транспорту. Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі: створити базу даних, що зберігає значення затримок на маршрутизаторі комп'ютерної мережі Придніпровської залізниці; провести розрахунок показника Херста часового ряду затримок на маршрутизаторі комп'ютерної мережі; розробити методику прогнозування затримки на маршрутизаторі засобами НМ та ННМ; при виконанні машинного навчанні визначити оптимальні параметри створених НМ та ННМ, що забезпечить достатньо високу точність прогнозування затримки.

Виклад основного матеріалу. Створено базу даних затримок на маршрутизаторах комп'ютерної мережі Придніпровської залізниці, що були отримані на відповідній імітаційній моделі мережі в [10]. Для аналізу часового ряду значень затримок на маршрутизаторі використаний R/S-аналіз з розрахунком показника Херста [1]:

$$H = \log(\frac{R}{S}) / \log(aN),$$

де H – показник Херста; N – кількість періодів спостережень; a – задана константа (позитивне число); S – стандартне відхилення ряду спостережень X1…Xn, що обчислюється за наступною формулою:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(X_i - X_{сер})^2}.$$

Тоді розмах накопиченого відхилення можна розрахувати як:

$$R = \max_{1\le n\le N} Z_n - \min_{1\le n\le N} Z_n,$$

де R – розмах накопиченого відхилення; Z_n – накопичене відхилення ряду X від середнього значення, що визначається за формулою:

$$Z_n = \sum_{i=1}^{n}(X_i - X_{сер}).$$

Значення показника Херста склало приблизно 0,59 (a=0,25; N=120), що перевищує 0,5; отже часовий ряд затримок на маршрутизаторі комп'ютерної мережі персистентний і характеризується ефектом довгочасної пам'яті.

Відповідно до аналізу обсягу мережевого трафіку в ІТС Придніпровської залізниці, проведеного авторами в [9], для прогнозування (на один крок) затримки на маршрутизаторі досліджувалися два підходи: використання НМ (перший підхід) з глибиною занурення 4, що відповідає 20 хв.; використання ННМ (другий підхід) з глибиною занурення 3, що відповідає 15 хв.

Перший підхід. У якості методу дослідження використано НМ конфігурації «4-1-16-1», де 4 – кількість вихідних (input) нейронів; 1 – кількість прихованих шарів; 16 – кількість прихованих (hidden) нейронів; 1 – кількість результуючих (output) нейронів, що відображена на рис. 1.

Перший шар НМ має X1…X4 нейрони (це затримки на маршрутизаторі комп'ютерної мережі в моменти (t-3), (t-2), (t-1), t. Результуючий

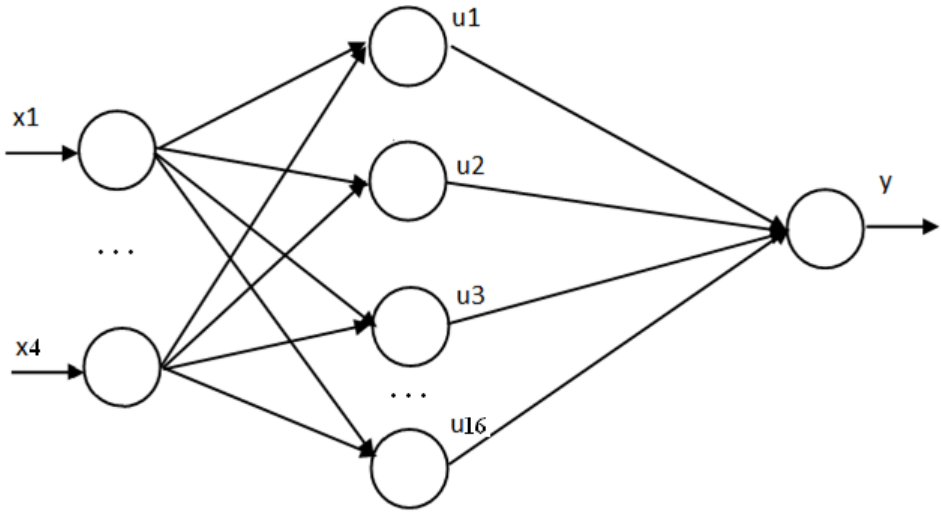


Рис. 1. НМ конфігурації «4-1-16-1»

шар має нейрон Y; це затримка на маршрутизаторі в момент (t +1).

На основі створеної бази даних складено загальну вибірку із 90 прикладів, фрагмент якої представлено на рис. 2.

За допомогою додатку Neural Network Toolbox системи MatLAB створено НМ конфігурації «4-1-16-1» [4], що відображено на рис. 3.

На створеній НМ конфігурації «4-1-X-1», де X – кількість прихованих нейронів, проведено дослідження часу (кількості епох) навчання при різній кількості прихованих нейронів (10, 50 та 90) за різними алгоритмами навчання НМ (рис. 4).

Крім того, на створеній НМ конфігурації «4-1-X-1», де X – кількість прихованих нейронів, проведено також дослідження похибки (Mean Square Error, MSE) при різній кількості прихованих нейронів (10, 50 та 90) за різними алгоритмами навчання НМ. За алгоритмом Scaled Conjugate Gradient потребується значна більша кількість епох навчання НМ конфігурації «4-1-X-1, тому доречно використання таких алгоритмів як Levenberg-Marquardt та Bayesian Regularization, але при цьому алгоритм Levenberg-Marquardt надав менше значення MSE.

Другий підхід. У якості методу дослідження використано ННМ конфігурації «3-6-8-8-1», де 3 – кількість нейронів першого шару (input); 6 – кількість нейронів другого шару (inputmf); 8 – кількість нейронів третього шару (rule); 8 – кількість нейронів четвертого шару (outputmf); 1 – кількість нейронів п'ятого шару (output), що відображена на рис. 5. У першому шарі X(t-3), X(t-2), X(t-1), що відповідають значенням затримок на маршрутизаторі комп'ютерної мережі в часові моменти t-3, t-2, t-1 відповідно. Загальна кількість нейронів другого шару дорівнює 6, тому що кожній вихідній змінній відповідає 2 терми (MIN та MAX). Третій шар – це параметричний шар, який включає адаптацію лінійної ваги, що визначає функцію виведення моделі TSK. Четвертий шар не є параметричним; кількість правил можна знайти як 2^3=8. П'ятий шар є нормалізуючим, він має один вузол, який відповідає результуючому нейрону X(t) – це спрогнозоване значення затримки на маршрутизаторі комп'ютерної мережі в часовий момент t; цей шар також не є параметричним.

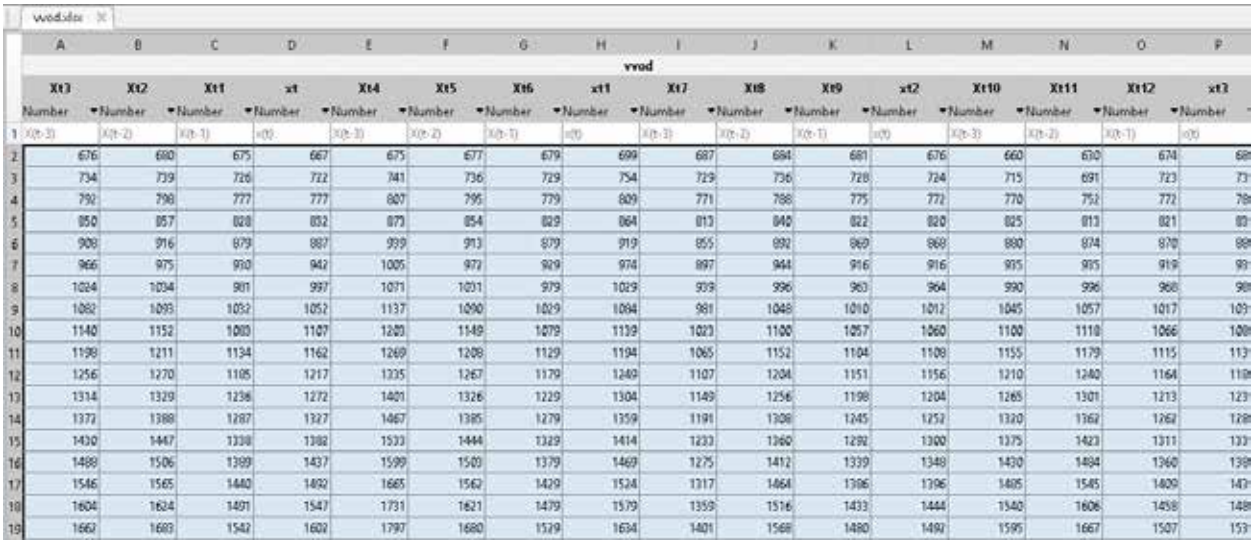


Рис. 2. НМ: загальна вибірка

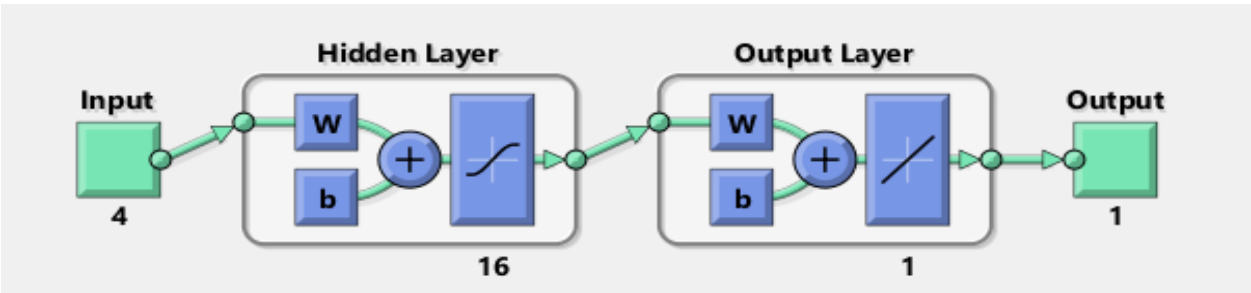


Рис. 3. Структура створеної НМ в MatLAB

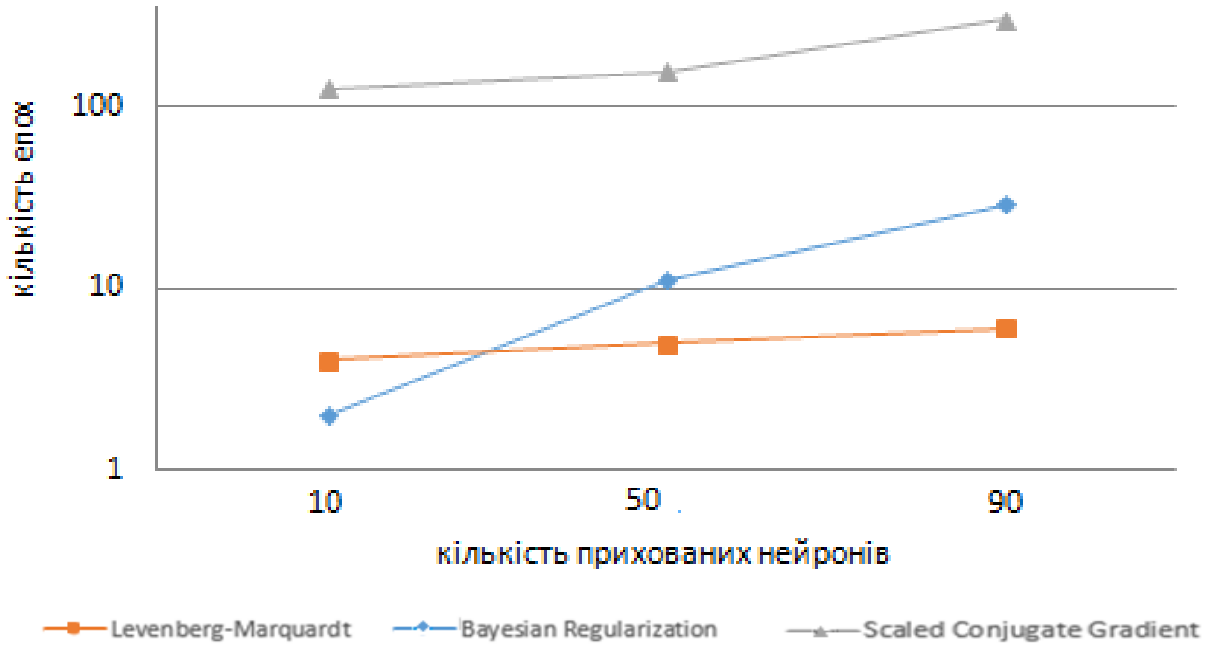


Рис. 4. Кількість епох НМ конфігурації «4-1-X-1» за алгоритмами:

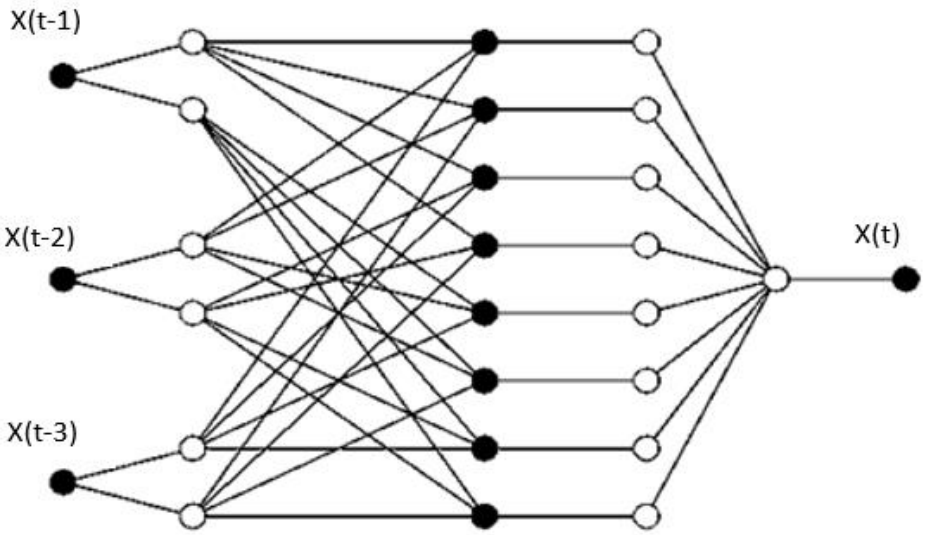


Рис. 5. ННМ конфігурації «3-6-8-8-1»

У середовищі MatLAB за допомогою додатку Fuzzy Logic Toolbox створено в [8] ННМ (Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System, ANFIS) відповідної структури за алгоритмом Сугено; закладена система правил показано на рис. 6. Навчання ННМ проводилося протягом 40 епох на вибірці, що складалася із 90 прикладів.

На створеній ННМ проведено дослідження її похибки за різними методами оптимізації навчання: гібридному (Hybrid); зворотного поширення помилки (Backpropa), при цьому найменше значення похибки навчання ННМ отримано при гібридному методі. Крім того, проведено дослідження похибки ННМ при використанні різних функцій приналежності нейронів за гібридним методом оптимізації навчання; при використанні трикутної функції приналежності нейронів отримано найменше значення похибки ННМ.

Оцінка точності прогнозування на створених НМ/ННМ. На створених НМ та ННМ при визначених оптимальних параметрах обчислено значення MAPE (Mean Absolute Percentage Error) за наступною формулою:

$$MAPE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{|Z(t) - Z_1(t)|}{Z(t)} \cdot 100,$$

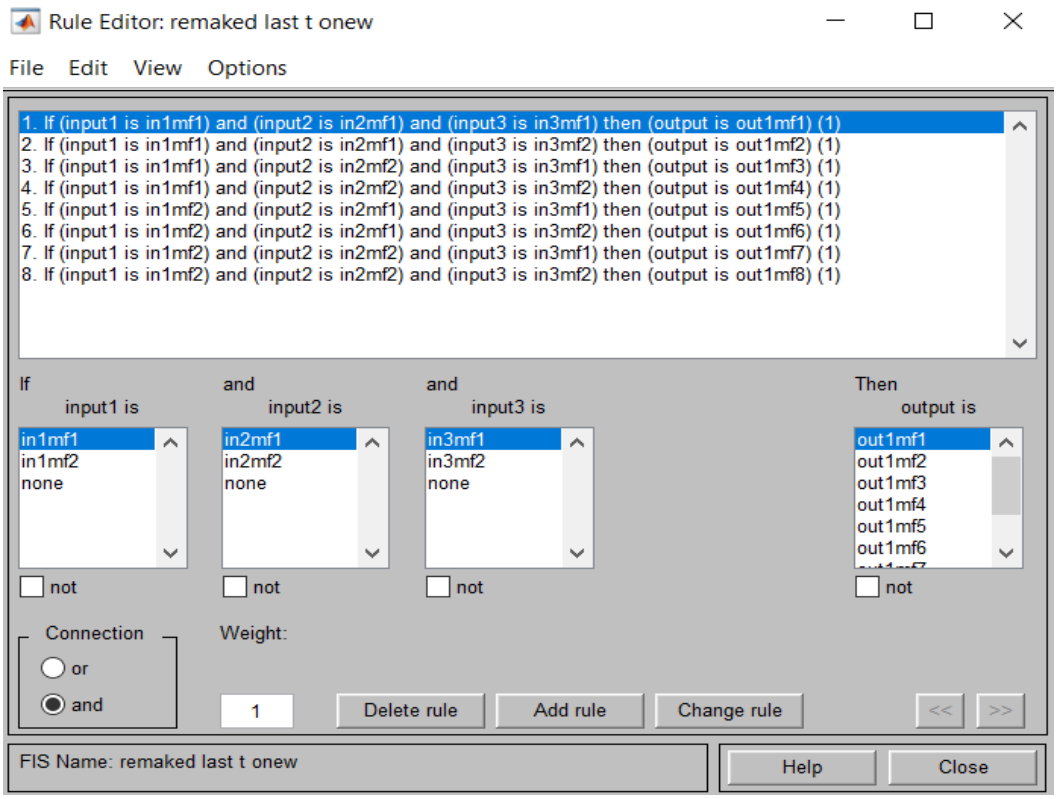


Рис. 6. ННМ: система правил

де N – кількість годин; Z(t) – реальні дані в момент часу t; $Z_1(t)$ – прогнозовані дані в момент часу t.

Розрахунок MAPE виконаний на контрольній вибірці із 10 прикладів; отримані результати зведені до таблиці 1. Із таблиці видно, що найменше значення MAPE при прогнозуванні затримки на маршрутизаторі комп'ютерної мережі досягається на створеній ННМ конфігурації «3-6-8-8-1» [8] в зрівнянні з прогнозованими значеннями затримок, що отримані на НМ конфігурації «4-1-16-1» [4]. Отримані значення MAPE (менше 10) говорять про високу точність прогнозування значень затримки засобами НМ і ННМ.

Висновки.

1. Створено базу даних, що зберігає затримки на маршрутизаторі комп'ютерної мережі Придніпровської залізниці, які були отримані в [10] на відповідній імітаційній моделі мережі. Значення показника Херста склало приблизно 0,59 (a=0,25; N=120), що перевищує 0,5; отже часовий ряд затримок на маршрутизаторі персистентний і характеризується ефектом довгочасної пам'яті. На основі створеної бази даних формуються вибірки.

2. Відповідно до аналізу обсягу мережевого трафіку в ІТС Придніпровської залізниці, проведеного в [9], для прогнозування затримки на маршрутизаторі досліджуються два підходи: використання НМ (перший підхід) з глибиною занурення 4, що відповідає 20 хв., та використання ННМ (другий підхід) з глибиною занурення 3, що відповідає 15 хв.

3. Прогноз затримки на маршрутизаторі здійснений з використанням НМ конфігурації «4-1-X-1» (X – кількість прихованих нейронів) [4], що створена за допомогою додатку Neural Network Toolbox системи MatLAB. У якості функції активації прихованого шару взято гіперболічний тангенс, результуючого шару – лінійна функція. На створеній НМ проведені дослідження MSE та кількості епох навчання НМ при різної кількості прихованих нейронів (10, 50 та 90) за наступними алгоритмами навчання: Levenberg-Marquardt; Bayesian Regularization; Scaled Conjugate Gradient. Визначені відповідні оптимальні параметри НМ.

4. Прогноз затримки на маршрутизаторі здійснений з використанням ННМ конфігурації «3-6-8-8-1» [8], що створена за алгоритмом Сугено в режимі ANFIS за допомогою додатку Fuzzy Logic Toolbox системи MatLAB. На створеній ННМ проведено дослідження похибки при різних функціях приналежності вихідних (input) нейронів за методами оптимізації навчання: гібридним (Hybrid) та зворотного поширення помилки (Backpropa). Визначені відповідні оптимальні параметри ННМ.

Таблиця 1

Оцінка прогнозу затримки на маршрутизаторі

Час, год.	Контрольна вибірка, мкс	НМ конфігурації «4-1-16-1»		ННМ конфігурації «3-6-8-8-1»	
		Прогноз, мкс	$\frac{\lvert Z(t)-Z_1(t)\rvert}{Z(t)}$	Прогноз, мкс	$\frac{\lvert Z(t)-Z_1(t)\rvert}{Z(t)}$
8.9	676	690	0,02071006	677	0,00147929
9.10	700	715	0,02142857	701	0,00142857
10.11	859	845	0,01629802	860	0,00116414
11.12	1119	1120	0,00089366	1120	0,00089366
12.13	1495	1499	0,00267559	1496	0,00066896
13.14	1667	1703	0,02159568	1668	0,00059988
14.15	1688	1782	0,05568720	1689	0,00059242
15.16	2121	2035	0,04054691	2122	0,00047148
16.17	2221	2205	0,00720396	2222	0,00045025
17.18	2298	2280	0,00783289	2299	0,00043516
MAPE, %		**1,94872548**		**0,08183739**	

5. Виконано оцінювання (засобами MAPE; 10 часових проміжків) прогнозу затримки на маршрутизаторі комп'ютерної мережі Придніпровської залізниці; при цьому найменше значення MAPE досягається на створеній ННМ конфігурації «3-6-8-8-1» [8] в зрівнянні з прогнозованими значеннями затримок, що отримані на НМ конфігурації «4-1-16-1» [4]; таким чином, при використанні ННМ достатньо глибини занурення 3, що відповідає 15 хв.

Список літератури:

1. Волошко А.В., Бедерак Я.С. Визначення показника Херста при фрактальному аналізі електричних навантажень. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2020. № 3. С. 22-28. DOI: 0000-0002-2669-0965.

2. Кісельова О.М., Притоманова О.М., Дон Я.Б. Розробка нейронечіткої моделі короткострокового прогнозу кількості випадків захворюваності на COVID-19. *Питання прикладної математики і математичного моделювання*. 2022. Вип. 20. С. 82-92. DOI: 10.15421/322008.

3. Пахомова В.М. Прогнозування часу доставки даних в ІТС залізничного транспорту з використанням нейронечіткої технології. 2022 International Conference on Innovatitive Solutions in Software Engineering (ICISSE). *Vasyl Stefanyk Precarpathian National University*, Ivano-Frankivsk, Ukraine. Nov. 29-30, 2022. DOI: 10.5281/zenodo.7502536. pp. 238-241.

4. Ріпка Є.В. Прогнозування затримок маршрутизаторів з використанням нейромережної технології. Дипломна робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра : спец. 123 – Комп'ютерна інженерія / наук. кер. В.М. Пахомова; *Укр. держ. ун-т науки і техн*. Дніпро, 2020.

5. Руденко О.Г., Безсонов О.О., Романюк О.С. Нейромережеве прогнозування часових рядів на основі багатошарового персептрона. *Development Management*. 2019. Vol. 5. Iss. 1. pp. 23-34. DOI:10.21511/dm.5(1).2019.03.

6. Савка Н.Я. Застосування штучних нейронних мереж з радіально-базисними функціями для розв'язування задач прогнозування. *Науково-технічний збірник* № 97. 2010. С. 349-353. URL: https://core.ac.uk/download/pdf/11328339.pdf.

7. Солодовник М.С., Асланов А.М. Використання нейро-нечіткого підходу у прогнозуванні виходу з ладу модуля серверної пам'яті. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2015. 49(4). DOI: 10.15673/0453-8307.4/2013.57360.

8. Хрестян А.В. Прогнозування затримки на маршрутизаторі комп'ютерної мережі засобами нейронечіткої мережі: дипломна робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра : спец. 123 – Комп'ютерна інженерія / наук. кер. В.М. Пахомова; *Укр. держ. ун-т науки і техн*. Дніпро, 2024.

9. Pakhomova V.M. Network traffic forcasting in information-telecommunication system of Prydniprovskrailways based on neuro-fuzzy network. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 6(66). С. 105-114. DOI: 10.15802/stp2016/90485.

10. Pakhomova V.M., Mandybura Y.S. Optimal route definition in the railway information network using neural-fuzzy models. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 5(83). С. 81-98. DOI: 10.15802/stp2019/184385.

Pakhomova V.M., Hrestyan A.V. EXPLORING TWO APPROACHES TO FORECASTING DELAY ON THE COMPUTER NETWORK ROUTER OF RAILWAY TRANSPORT USING NEURAL NETWORK TECHNOLOGY

At the present stage, the OSPF protocol is used in the computer networks of railway transport, when using which a problem appears in real time due to constant changes in the volume of transmitted data, and for the solution of which it is advisable to use neural network technology, which confirms the relevance of the topic. A database of delays on the router of the computer network of railway transport has been created in the work. The calculation of the Hurst indicator of the time series of delays on the router showed that it is persistent. Forecasting of delay on the router of the computer network of railway transport was carried out by means of the neural network of the configuration «4-1-16-1» (the first approach) and the neural fuzzy network of the configuration «3-6-8-8-1» (the second approach), which were created in the MatLAB environment using the Neural Network Toolbox and Fuzzy Logic Toolbox applications, respectively. According to the first approach, a study of the MSE of the neural network with a different number of hidden neurons (10, 50 and 90) according to different training algorithms (Levenberg-Marquardt; Bayesian Regularization and Scaled Conjugate Gradient). According to the second approach, a study of the average error value of the neural fuzzy network at different functions of neuronal belonging according to different methods of training optimization (Hybrid and Backpropa). On the created neural models, their corresponding optimal parameters are determined. An assessment of the delay forecast on the router using MAPE was performed using the created neural models. It is determined that the smallest value of MAPE when forecasting delay on the router of the computer network of the Prydniprovsk Railway is achieved on the created neural fuzzy network of the configuration «3-6-8-8-1» in comparison with the predicted values of delays obtained on the neural network of the configuration «4-1-16-1».

Key words: *router, database, delay, forecasting, Hearst indicator, MLP, ANFIS, optimal parameters, error, MAPE.*

УДК 004.852:070.19
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/28

Плекан А.І.
Львівський національний університет імені Івана Франка

Зигін С.Є.
Харківський національний університет радіоелектроніки

ВИЯВЛЕННЯ ПРОПАГАНДИ У НОВИНАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ АРХІТЕКТУРИ ДОВГОЇ КОРОТКОЧАСНОЇ ПАМ'ЯТІ

Стаття присвячена виявленню та дослідженню існування і функціонування пропаганди в умовах інтенсифікації інформації. При об'ємному потоці відомостей із різних джерел складно відокремити правдиві відомості від хибних, новини та природну інформацію від пропагандистського контенту. Більш того, більшість сучасного суспільства не замислюється над цим, для неї не характерне застосування аналітичних здібностей при сприйнятті інформації та критичне її осмислення. Отже, виникає необхідність у застосуванні комп'ютерних технологій та різних типів нейронних мереж, яке стало можливим завдяки обчислювальній потужності, що надається графічними процесорами та іншими паралельними обчислювальними платформами, більш гнучким та масштабованим програмним середовищам і великим обсягам доступних даних, що з'явилися.

В статті описано методи пропаганди, які використовуються в новинах, щоб люди могли ефективно зрозуміти їхню тему в нашому повсякденному житті. У цій статті були зібрані дані для виявлення пропаганди у новинах із використанням архітектури довгої короткочасної пам'яті (LSTM). Виявлення пропаганди розпочинається в процесі виявлення фейкових новин. З розвитком штучного інтелекту та машинного навчання, виявлення пропаганди в новинах привернуло увагу дослідників, що сприяло тому, що дана проблема стала новим напрямом. Нами було запропоновано використовувати архітектуру довгої короткочасної пам'яті (LSTM), щоб фіксувати семантичні особливості людської мови для виявлення використання пропаганди в новинних статтях. Описано алгоритм і принцип роботи даної нейронної мережі вирішено завдання класифікації та обробки даних. На основі проведеного тестування встановлено, що архітектура LSTM дозволяє ефективно викривати пропаганду в Інтернет новинах шляхом аналізу різних даних, від стилю написання та рівнів читабельності до наявності певних ключових слів.

Ключові слова: *LSTM, нейронні мережі, дані, мережі, машинне навчання, засоби масової інформації.*

Постановка проблеми. Пропаганда – це риторичний прийом, призначений для обслуговування певної теми, який часто цілеспрямовано використовується в новинних статтях, щоб досягти наміченої мети завдяки своєму специфічному психологічному ефекту. Існує кілька підходів до розуміння пропаганди [1]. Більшість сучасного суспільства продовжує черпати інформацію із традиційних засобів. Зокрема йдеться про телебачення, яке є найзручнішим джерелом отримання відомостей: їх не потрібно шукати, читати, аналізувати. Цю роботу вже виконали провідні телепередачі, інформація підноситься телеглядачам у готовому вигляді: знайдена, відібрана та проаналізована. Телеглядачі, як правило, беззастережно вірять у її правдивість, не піддають критичному аналізу і не намагаються знайти альтернативні погляди.

Пропаганда один із сучасних механізмів маніпулювання. У [2] наведено 5 міфів, за наявності яких маніпуляція громадським свідомістю стає можливою:

1. Міф про нейтралітет, тобто маніпуляція повинна залишатися непоміченою, люди повинні вірити у те, що інформація природна, а державні та політичні інститути нейтральні і не відстоюють власні інтереси. Найбільш «нейтральними» у цій хибній реальності повинні здаватися верховні державні інститути та ЗМІ.

2. Міф про плюралізм ЗМІ, тобто створення ілюзії про те, що вибір джерела інформації існує. Інакше кажучи, створюється міф у тому, що велика різноманітність інформаційних каналів транслюють різний за змістом контент. Насправді джерело контенту і власник численних інформаційних каналів один й той самий, тому сенс переданої інформації однаковий.

3. Міф про відсутність соціальних конфліктів. Маніпулятори створюють ілюзію повної соціаль-

ної гармонії в країні, представляючи насильство та конфлікти як окремі випадки.

4. Міф про індивідуалізм та особистий вибір. Приватництво і підприємництво породили міф про індивідуальність людини та її незалежність від суспільства. Однак насправді, за словами Г. Шіллера, людина не відокремлена від суспільства.

5. Міф про постійну природу людини. Іншими словами, людині нав'язується концепція, наприклад, про агресивну та невиправну природу людини.

Таким чином, управління суспільною свідомістю за допомогою пропаганди як механізму маніпуляції може здійснюватися різними методами. Також свідомістю має простіше керувати, якщо їх переконати, що деякі концепції та розумові шаблони є істинними та природними. Особливо небезпечною пропаганда стає під час військових конфліктів коли вона використовується ворогом для деморалізації суспільства, створення негативного сприйняття владних рішень, зриву мобілізації тощо. Тому актуальною є проблема виявлення пропаганди для того щоб ефективно використовувати це в нашому повсякденному житті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На думку Г. Лассуелла [3], пропаганда – це управління колективними установками у вигляді маніпулювання значними символами. Основна функція пропаганди – усувати соціальну дезорганізацію шляхом переконання та аргументів, а не насильства та тиранії. Демократія, на його думку, проголосила диктатуру демагогії, а диктатором – пропаганду. У [4] автори дотримуються визначення пропаганди, даного американським психологом У. Байдлом: під впливом пропаганди кожен індивід поводиться так, начебто його поведінка випливає з його рішень. У [5] описано історію походження пропаганди та ставлення до неї, що сформувалося в Європі.

Визначення пропаганди як сучасний вплив правлячої меншини на маси, за допомогою якого правляча еліта формує думку мас і спрямовує її сили наведено в [6]. При цьому зазначено, що масова освіта не виконала цілі, які стояли перед нею, і не зробили людей критично мислячими. За їх допомогою маси набули лише набір штампів, кліше та стереотипів, які полегшують проведення пропагандистських кампаній. На думку автора, пропаганда є комбінованим (поєднує інформаційне та фізичне) видом впливу на людину або маси, метою якої є збільшення впливу та влади. У [7] зазначено, що пропаганда є найважливішою технологією регулювання суспільних відносин, що здійснюється за допомогою формування суспільних установок та їх бажаних поєднань. На думку автора, для проведення вдалої пропагандистської кампанії необхідно ґрунтуватися на наукових здобутках педагогіки, психології, соціології.

Питанню виявлення пропаганди присвячено ряд наукових публікацій. Одним з методів, що використовується дослідниками в цьому напрямку є виявлення рівнів речення. У [8] запропоновано модель для визначення рівня речення, яка могла б зрозуміти семантичні особливості покращення мови шляхом побудови контекстно-залежного введення пар (пара речення-заголовок і пара речення-контекст). Натомість у [9], як інструменти для виявлення пропаганди, були досліджені різні архітектури нейронних мереж (CNN, LSTM-CRF і BERT). Загалом, зазначено, в [10-11], найпопулярнішими методами серед методів глибокого навчання є нейронні мережі, серед яких можна виділити рекурентні нейронні мережі (RNN), довгу короткочасну пам'ять (LSTM), двонаправлену довгу короткочасну пам'ять (Bi-LSTM), згорткові нейронні мережі (CNN) та інші. Крім того, багато досліджень використовують методи машинного навчання для виявлення джерел дезінформації, такі як метод опорних векторів (SVM), наївний класифікатор Байєса (NBC), випадковий ліс (RF), дерева рішень (DT), логістична регресія (LR) і Баєсове моделювання (BM). На основі порівняння було виявлено, що методи на основі машинного навчання більш ефективні та використовується багатьма дослідниками.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження використання архітектури довгої короткочасної пам'яті для виявлення пропаганди у новинах.

Виклад основного матеріалу. Як зазначено вище, одним з інструментів для виявлення пропаганди можуть бути нейронні мережі. Так, наприклад, у [10] розглянуто застосування нейронних мереж останнього покоління для виявлення пропаганди, а в [11] проведено розрахунок на тришарових нейронних мережах. Результати розрахунку залежності класифікації від епохи навчання при вибраному оптимальному параметрі швидкості навчання для кожного методу представлені в табл. 1. Розрахунки авторами [11] проводились на тришарових нейронних мережах з розміром шарів 63, 31 та 16 відповідно. Нейронна мережа, навчена методом адаптивного моменту (Adam), має більш

високу точність класифікації і досягає 93% на сотій епосі. Нейронні мережі, навчені іншими методами, що досягають точності 85–90% [15].

Таблиця 1

Епохи навчання [11]

Метод навчання	Оптимальна швидкість навчання
GD	0.1
qProp	0.05
NAG	0.5
AdaGrad	0.1
AdaDelta	0.05
Adam	0.1

LSTM або довга короткострокова пам'ять – це особливий різновид рекурентної нейронної мережі (RNN – Recurrent Neural Network), здатний до навчання довгостроковим залежностям. Вперше вони були представлені 1997 року вченими Зеппом Хохрайтером та Юргеном Шмідхубером [16]. Архітектура мережі розгортається для відображення всієї мережі у вигляді повної послідовності. Мережі довгої короткострокової пам'яті розроблені для того, щоб уникати проблем довгостроковій залежності. Запам'ятовування інформації та її зберігання в пам'яті – є стандартною поведінкою для LSTM.

Стан комірки – горизонтальна лінія, що проходить через верх діаграми, є ключем до LSTM. Її стан схожий на конвеєрну стрічку з лінійними взаємодіями. Для потоку інформації не важко переміщатися по комірці без змін. Однією з особливостей є здатність додавати інформацію про стан комірки, суворо регульованими структурами, званими вентилями. Вентилі мають можливість пропустити інформацію через себе за бажанням.

Мережі з короткочасною пам'яттю являють собою видозмінену версію періодичних нейронних мереж, які у свою чергу спрощують процес запам'ятовування минулих даних у пам'яті. Також LSTM добре підходить для прогнозування тимчасових рядів, де враховуються тимчасові затримки невідомої тривалості. Навчання моделі відбувається за допомогою зворотного поширення помилки. На основі LSTM нами досліджено рекурсивну формулу мережі RNN:

$$\boldsymbol{h}_t = tanh(W_h \boldsymbol{h} t_{-1} + W_x x_t) \quad (1)$$

$$y_t = W_y \boldsymbol{h}_t \quad (2)$$

де $\boldsymbol{x}_t$ – вхідний вектор, $\boldsymbol{h}_t$ – прихований шар, $\boldsymbol{y}_t$ – вектор виведення експерименту, $\boldsymbol{W}_h$ – зважена матриця.

Рекурентні нейронні мережі застосовуються до довгої короткострокової пам'яті для створення процесу обчислень, отриманих вхідних даних та створення вихідних даних [12]. У ході цього процесу довготривала пам'ять створюється з короткострокової. Система LSTM складається з шару вхідного вентиля (input gate), вентиля забування (forget gate), та вихідного вентиля (output gate). Архітектура LSTM показана на рис. 1 [13]. LSTM обчислює прихований стан наступним способом:

$$i_t = \sigma(W_f[\boldsymbol{h}_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (3)$$

$$f_t = \sigma(W_f[\boldsymbol{h}_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (4)$$

$$\sigma(\mathrm{x}) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (5)$$

$$o_t = \sigma(W_0[\boldsymbol{h}_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (6)$$

$$c\sim_t = tanh(W_c[\boldsymbol{h}_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (7)$$

$$c_t = f_t \cdot c_{t-1} + i_t \cdot c_{\sim t} \quad (8)$$

$$\boldsymbol{h}_t = o_t \cdot \tanh(c_t) \quad (9)$$

де σ – логістична сигмоїдальна функція, i, f, o – вхідні вентилі. $\boldsymbol{h}$ – прихований вектор однакового розміру в кожному шарі, $\boldsymbol{W}$ – матриця для перетворення інформації та $[\boldsymbol{h}_{t-1}, x_t]$ – у кожному вентилі. У рівнянні $c\sim_t$ – прихований елемент, який є вхідним шаром, c_t – внутрішня пам'ять, що обчислюється у пристрої, і $\boldsymbol{h}_t$ – вихід прихованого стану.

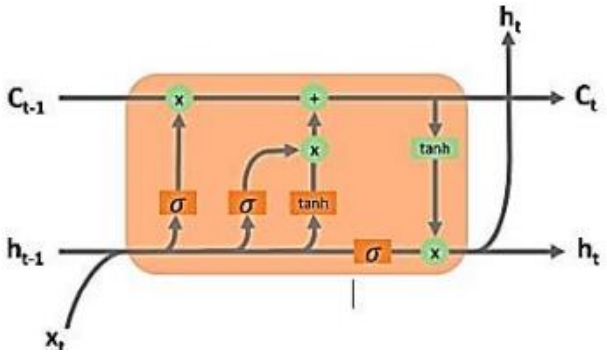


Рис. 1. Архітектура LSTM [13]

Вентиль відповідає за видалення інформації з комірки. Він отримує вихід прихованого стану з попереднього тимчасового кроку (h_{t-1}) та вхід поточного тимчасового кроку. Вхідні дані множаться на вагові матриці. Вхідний вентиль передає інформацію про стан комірки. Сигмоподібна функція застосовується як фільтр для $\mathbf{h}_{t-1}$ і $\mathbf{x}_t$.

Вихідний вентиль вирішує яку інформацію виводити з комірки. Цей етап виконується за три кроки. Для масштабування стану комірки від 0

до 1 будують вектор, а відфільтровані значення множаться на початковий вектор, для отримання вихідної інформації. Вентилі LSTM показані рис. 2 [14].

Для того, щоб використовувати LSTM модель для виявлення пропаганди у новинах необхідно:

– Очистити та впорядкувати дані. Дані поділяються на два стовпці. У першому це кількість випадків пропаганди за індексом якості визначення та у другому – в який день;

– Розбити дані на частини: навчання, перевірка, прогнозування;

– Перенести проблему часових рядів у контрольоване завдання.

Основним напрямом у вивченні нейронних мереж є дослідження залежності між типом нейронної мережі, її архітектурою та результатами її роботи. Для покращення продуктивності моделі прийнято використовувати середньоквадратичну помилку та кореляцію. Як вхідні дані для тренування моделів використовувалися дані з оптимальними параметрами [епоха, швидкість навчання (lr), довжина речення (sentlen)] для моделей двох завдань SI (span identification – ідентифікація фрагменту) та TC (technique classification – класифікація техніки.). Порівняння різних моделей наведено в таблиці 2, де базовий рівень визначався за допомогою LSTM

Таблиця 2

Порівняння моделей для виявлення пропаганди

Модель	F1*
Базовий рівень (Baseline)	0.262326
BERT	0.539535
Наша система ТК	0.575729

**F1-бал визначає пропаганду*

Для моделі прогнозу з ТС використовувався алгоритм векторизацій текстових даних LSTM (для завдання SI), результати наведені на рис. 3. Виходячи з наведених вище оптимальних параметрів, системи SI і ТС отримали оцінку F1 0,441732 і 0,575729, і обидва процеси навчання зайняли приблизно 2,5 години з використанням 4 відеокарт Nvidia GTX 1080Ti (тобто близько 10 годин GPU). В [10], обчислення відбувалося на відеокарті NVIDIA A100 з показником 0,320 за 3 години роботи. Наведені дані F1 трохи перевищують середньостатистичні згідно методики описаної в [11]. Результати показують, що моделі загалом перевершують інші моделі для завдання ідентифікації діапазону пропаганди.

Проведено ручне тестування моделі для ідентифікації фейкових новин, використовуючи новини з набору даних, які не використані під час навчання. Усі новини використані для ручної перевірки були розбиті на тренувальну та тестову множину, в результаті перевірки більшість новин ідентифіковано правильно з точністю 90%. Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні набору даних із різних джерел для покращення процесу опрацювання тексту.

Висновки. В даній роботі розглянуто проблему використання пропаганди в новинах і повсякденному житті людей. Використано базуючись на моделі LSTM дві конкретні системи ідентифікації діапазону та класифікації техніки пропаганди в новинних статтях. Для завдання SI ми заново визначили його як завдання тегування послідовності з трьома маркерами за допомогою системи SI і прийнятого методу конкатенації ознак на рівні речення. Досліджено на основі LSTM ефективні і точні системи виявлення пропаганди в новинах. Це сприятиме реалізації інтегрованих систем для автоматичного виявлення фейкових новин у реальному часі для розпізнавання маніпулятивних і тенденційних новин. Ці перспективи даватимуть змогу не тільки підвищити точність та ефективність моделі, але й зробити її більш універсальною та придатною для використання в реальних умовах ведення інформаційної війни з росією в інтернет-просторі.

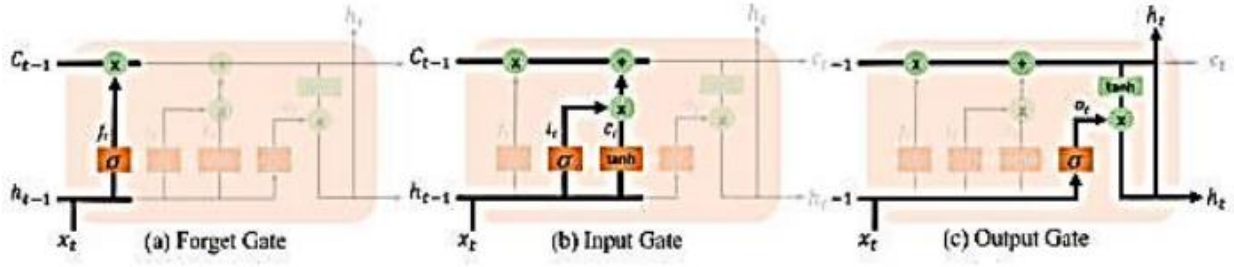


Рис. 2. Вентилі LSTM

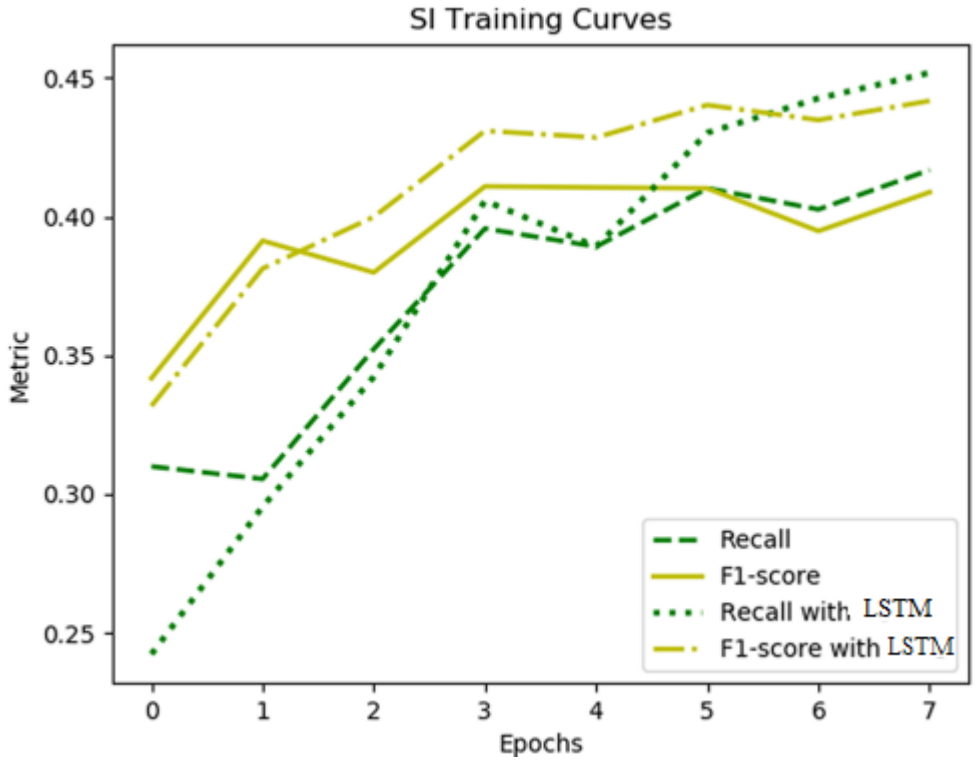


Рис. 3. Порівняння SI навчального процесу визначення пропаганди F1 з і без LSTM

Список літератури:

1. Haykin S. Neural Networks. Second Edition, Addison Wesely Longman, 2009. 485 p.

2. Barron-Cedeno A, Da San Martino G, Jaradat I, Nakov P. Proppy: a system to unmask propaganda in online news. In: Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence, 2019, 9847–9848.

3. Lasswell H.D. The Theory of Political Propaganda. The American Political Science Review, 1927, 21(3), 627-631.

4. Zhang Z, Sabuncu M. Generalized cross entropy loss for training deep neural networks with noisy labels. In: Advances in neural information processing systems, 2018, 8778–8788.

5. Yoosuf S., Yang Y. Fine-grained propaganda detection with fine-tuned bert. In: Proceedings of the second workshop on natural language processing for internet freedom: censorship, disinformation, and propaganda, 2019, 87–91.

6. Edward Bernays. Propaganda. – [Electronic resource]. – URL: http://commondatastorage.googleapis.com/brainmod/book/EdwardBernays-Propaganda.pdf. pp. 4-5. Date of access: 17.12.2023.

7. Jordan M. I. Serial order: a parallel distributed processing approach // Advances in Psychology. 1997, 121, 471–495.

8. Lan Z, Chen M, Goodman S, Gimpel K, Sharma P, Soricut R. Albert: a lite bert for self-supervised learning of language representations. ICLR, 2020.

9. Liu S, Lee K, Lee I. Document-level multi-topic sentiment classification of email data with bilstm and data augmentation. Knowl Based Syst:105918, 2020.

10. Mapes N, White A, Medury R, Dua S. Divisive language and propaganda detection using multi-head attention transformers with deep learning bert-based language models for binary classification. In: Proceedings of the second workshop on natural language processing for internet freedom: censorship, disinformation, and propaganda, 2019, 103–106

11. Martino DSG, Yu S, Barron-Cedeno A, Petrov R, Nakov P. Fine-grained analysis of propaganda in news articles. EMNLP/IJCNLP, 2019, 1:5635–5645

12. Pankaj G, Khushbu S, Usama Y, Thomas R, Hinrich S. Neural architectures for fine-grained propaganda detection in news. In: Proceedings of the second workshop on natural language processing for internet freedom: censorship, disinformation, and propaganda, 2019.

13. San G.D.M, Alberto B.C, Preslav N. Findings of the nlp4if-2019 shared task on fine-grained propaganda detection. In: Proceedings of the second workshop on natural language processing for internet freedom: censorship, disinformation, and propaganda, 2019.

14. Tchiehe N.D, Gauthier F. Classification of risk acceptability and risk tolerability factors in occupational health and safety. Saf Sci:138–147, 2017.

15. Wang A, Singh A, Michael J, Hill F, Levy O, Bowman R.S. Glue: A multi-task benchmark and analysis platform for natural language understanding. In: International conference on learning representations, 2018.

16. S. Hochreiter and J. Schmidhuber, "Long short-term memory," Neural Computation, 1997.

Plekan A.I., Zyhin S.Ie. DETECTING PROPAGANDA IN THE NEWS USING THE ARCHITECTURE OF LONG SHORT-TERM MEMORY

The article is devoted to the detection and study of the existence and functioning of propaganda in the conditions of information intensification. With a voluminous flow of information from various sources, it is difficult to separate true information from false, news and natural information from propaganda content. Moreover, most of modern society does not think about this, it is not typical for it to use analytical abilities in the perception of information and its critical understanding. Therefore, there is a need to use computer technologies and various types of neural networks, which became possible due to the computing power provided by graphics processors and other parallel computing platforms, more flexible and scalable software environments and large volumes of available data that have appeared.

The article selects propaganda methods used in the news so that people can effectively understand their topic in our everyday lives. This article collected data on the detection of propaganda in the news using the long short-term memory (LSTM) architecture. The detection of propaganda methods begins with the process of detecting fake news. With the development of artificial intelligence and machine learning, the detection of propaganda in the news has attracted the attention of researchers, which has contributed to the fact that this problem has become a new direction. We proposed to use the architecture of long short-term memory (LSTM) to capture the semantic features of human language to detect the use of propaganda in news articles. The algorithm and the principle of operation of this neural network are described, the task of classification and data processing is solved. Based on the testing conducted, it was established that the LSTM architecture allows you to effectively expose propaganda in Internet news by analyzing various data, from writing style and readability levels to the presence of certain keywords.

Key words: *LSTM, neural networks, data, networks, machine learning, mass media.*

UDC 378.147:004.8
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/29

Polyakovska N.O.
SoftServe

OPPORTUNITIES AND RISKS IN UTILIZING AI IN EDUCATION FROM A DATA SCIENCE PERSPECTIVE

The article analyses the opportunities and risks of using artificial intelligence in educational systems from a data science perspective. The study's relevance is determined by the rapid development of intelligent technologies that contribute to the modernization of the educational process and the provision of personalized learning. It has been established that the integration of intelligent systems enables the automation of knowledge assessment, improves the quality of feedback, and predicts learners' academic performance. However, challenges remain in ensuring data privacy, algorithmic transparency, and minimizing algorithmic bias.

The article's purpose is to analyze the effectiveness of artificial intelligence in education, identify key risks, and develop recommendations for implementing innovative systems to improve educational practices.

***Methodology.** The study is based on a systematic analysis of educational data, comparing various intelligent system models, and assessing their impact on the learning process. Risk analysis methods were used to identify major threats and strategies for their mitigation.*

***Scientific novelty.** The article comprehensively analyses the applied aspects of using intelligent systems in education. Gaps in regulatory frameworks have been identified, and recommendations are provided for developing more transparent and adaptive algorithms that consider the needs of educational institutions and privacy requirements.*

***Conclusions.** Artificial intelligence can enhance the efficiency of educational processes, provided ethical standards are upheld and mechanisms for algorithmic transparency are implemented. Recommendations for the safe use of intelligent systems include data anonymization, algorithm audits, and increasing the digital competence of education process participants.*

***Key words:** artificial intelligence, personalized learning, educational data processing, algorithmic transparency, privacy.*

Problem statement. The use of artificial intelligence in education opens up broad prospects for modernizing educational processes and providing a more individualized approach to the needs of students. The main capabilities of artificial intelligence technologies include personalization of learning, automation of assessment, and support for an adaptive learning environment based on the analysis of educational data. At the same time, integrating these technologies is accompanied by challenges related to ensuring the transparency of algorithms, compliance with data privacy standards, and avoiding algorithmic bias. At the current stage, research is focused on studying the impact of intelligent systems on the quality of the educational process, assessing the risks associated with the possible spread of false information, and developing methods to prevent the generation of incorrect or harmful content. Practical tasks include introducing technologies for automatically identifying educational needs, creating systems for monitoring students' progress, and improving feedback methods. Addressing these challenges requires an interdisciplinary approach, including analyzing educational data processing methods, optimizing algorithms to reduce bias, and implementing practices to increase transparency and trust in decision-making. Solving these problems will help create a safe and innovative educational environment that will ensure equal access to quality education and meet society's current challenges.

Analysis of the latest research and publications. Scientists consider the opportunities and risks of using artificial intelligence in education from the perspective of data analysis, taking into account the impact of algorithms on the effectiveness of educational processes and potential threats. In particular, researchers emphasize the need to optimize intelligent systems to ensure transparency and compliance with ethical principles.

C.-M. Chen and H.-W. Tsao presented a solution for automated analysis of educational discussions, increasing discussions' effectiveness in digital learning environments [7]. This approach demonstrates the ability of AI to enhance student interaction, making it more dynamic and structured.

Researchers S.-Y. Chen et al. focused on using artificial intelligence to develop creative skills. They have developed a learning platform for training color perception, demonstrating the wide possibilities of AI in art education [10].

The study by M. Agaoglu analyses algorithms for assessing teacher professional performance. The author demonstrates that such systems can objectively evaluate pedagogical approaches using historical educational data [1].

E. Costa et al. study the problem of predicting students' academic results. They have shown that early diagnosis of potential learning difficulties using machine learning algorithms can improve academic performance through timely intervention [12].

Another important topic is the modeling of educational progress. F. Yang and F.W.B. Li have studied the effectiveness of predicting academic outcomes and emphasized the importance of systems that analyze students' learning activity to adjust educational trajectories [27].

In turn, E. Cabrera et al. presented a paper on student dropouts. The researchers show how intelligent systems can prevent dropouts by offering personalized learning recommendations [5].

A review of research by T.K.F. Chiu et al. systematizes the key problems and prospects of using AI in education, emphasizing the need for transparent algorithms to maintain user trust [11].

L. Chen and his colleagues describe in detail the benefits of personalized learning based on artificial intelligence. Their review demonstrates that such systems can adapt educational content to students' needs [8].

V. Aleven et al. consider the issue of scaling intelligent curricula for secondary schools, noting the significant effectiveness of learning mathematics through demonstration platforms [3].

I. Celik and his team analyze the role of AI in teacher support. The authors emphasize that the effective use of digital systems requires a high level of digital competence among teachers [6].

S. Akgun and C. Greenhow explore the ethical challenges associated with using intelligent systems in secondary schools. They emphasize the risks of data privacy and possible biases in learning algorithms [2].

G.-J. Hwang et al. work identified the main areas of research on artificial intelligence for education, particularly the need to regulate such systems and develop appropriate policies [18].

The study by E. Rakovac Bekeš and V. Galzina explores the pedagogical use of AI-powered chatbots, focusing on their application in K-12 education as lesson design assistants. The research highlights both the benefits and challenges of chatbot integration, providing insights into their potential to transform educational practices [5].

O. Zawacki-Richter et al. emphasize the low level of teacher involvement in the development of intelligent curricula and note the importance of an interdisciplinary approach to ensuring effective cooperation between scientists and educators [28].

The study by R. Rekha et al. present a system for tracking student engagement. This demonstrates the potential of AI to assess progress and improve the results of educational programs [23].

Thus, the analysis shows the versatility of artificial intelligence in education and the need to integrate approaches to ensure ethical standards, transparency and data protection. Researchers draw attention to the benefits of intelligent systems, their educational opportunities, and potential challenges that arise during implementation.

Despite significant advances in the study of the use of artificial intelligence in education, several important aspects remain unresolved. Models of personalized learning need to be improved to take into account the diversity of educational contexts and adapt to socio-cultural and technical features. The problem of algorithm transparency and avoiding algorithmic bias remains relevant, as methods of explanatory AI do not always provide clarity for users. At the same time, the impact of automated assessment on the development of critical thinking and student motivation in the long term is still insufficiently studied.

The legal and regulatory framework also has gaps: the lack of unified standards makes it difficult to integrate international practices at the national level. Many recommendations for AI implementation are general and do not take into account the limited resources of educational institutions and the level of digital competence of teachers.

The proposed research aims to fill these gaps by developing adaptive learning models, integrating more understandable algorithms, and creating practical recommendations for policy harmonization. This will increase the transparency of educational processes, ensure data security, and contribute to improving the quality of learning.

The purpose of the article is to study the possibilities and risks of using artificial intelligence in education from the perspective of data science and identify areas for optimizing its implementation, taking into account ethical, technological, and social aspects.

To achieve this goal, the following objectives were set:

1. The aim is to analyze modern approaches to using artificial intelligence in educational systems, identify key areas for the development of personalized learning technologies, and assess the impact of intelligent systems on the effectiveness of the educational process, in particular in the context of automated assessment and monitoring of students' progress.

2. To identify the principal risks and limitations associated with using educational data processing algorithms, including privacy, transparency and algorithmic bias, as well as to explore existing regulatory approaches to regulating the use of artificial intelligence in education and propose ways to improve relevant standards and policies.

3. To develop practical recommendations for the safe and effective integration of artificial intelligence into educational processes, considering technological capabilities, resource constraints and potential risks for educational institutions.

Summary of the primary material. The use of artificial intelligence in educational systems involves introducing a wide range of technological solutions aimed at improving the efficiency of the educational process and adapting educational materials to the needs of students. Modern approaches focus on using intelligent learning systems, automated assessment systems, and algorithms for data analysis to predict educational outcomes. In particular, personalized learning involves the creation of individual learning trajectories based on the profile of the student, his or her performance, and activity. However, the effectiveness of such approaches depends on the quality of educational data processing and the transparency of the algorithms used in the decision-making process (Table 1).

In practice, these approaches allow for the implementation of both elements of personalized learning and support for the educational process. Intelligent learning systems identify gaps in students' knowledge and offer appropriate learning materials depending on their needs. Adaptive recommendation systems use historical data of learning activities to analyze optimal learning paths and pace. In this context, the role of natural language processing algorithms is critical for generating relevant feedback on students' work, which allows for more detailed and contextually relevant feedback [4]. Outcome prediction systems are of particular importance, as they analyze students' behavioral and academic data to identify potential risks of loss of motivation or dropping out. Such analysis allows educational institutions to implement timely supportive measures and personalized advice. The use of these technologies ensures the creation of an adaptive educational environment that not only increases the efficiency of the learning process but also contributes to the improvement of student's academic performance and engagement.

Integrating educational data processing algorithms opens up significant opportunities for improving educational processes. However, it is accompanied by certain risks and limitations that may negatively affect educational technologies' effectiveness and credibility. The main challenges are ensuring data confidentiality, transparency of algorithms, and avoiding algorithmic bias, which can pose threats to individual students and educational institutions in general. Data confidentiality becomes a critical issue when using students' personal and behavioral characteristics, as any breach of information protection can lead to data leaks and violation of user rights [13]. Transparency problems lie in the difficulty of explaining the decisions made by artificial intelligence algorithms, which can reduce trust in the system. Algorithmic

Table 1

Modern approaches to the use of artificial intelligence in educational systems and their characteristics

Technological approach	Implementation features	Expected result
Intelligent learning systems	Applying machine learning algorithms to analyze performance and progress	Creating individual study plans
Adaptive recommendation systems	Using hybrid models to generate learning material recommendations	Increasing the engagement and motivation of students
Automated knowledge assessment	Using natural language processing models to check work and provide feedback	Reduced inspection time and increased objectivity
Systems for forecasting results	Use of regression and classification models to identify the risk of deduction	Timely support for students at risk of poor performance
Digital Assistants	Using conversational AI to answer queries, provide study tips, and guide through coursework	Enhanced accessibility to learning resources and immediate student support

Source: compiled by the authors based on [1, 5, 6, 7, 8, 9, 13, 18, 23]

bias occurs when training samples are imbalanced or underrepresentation by specific student groups, leading to unequal assessment conditions or access to learning opportunities (Table 2).

In practice, data confidentiality is ensured by implementing anonymization algorithms and creating synthetic datasets that retain statistical characteristics without using real identifiers. This minimizes the risk of information leakage and meets the requirements of international privacy standards such as GDPR and FERPA. Federated learning ensures that models are trained locally on users' devices with only updated parameters being transferred, reducing the risk of data compromise. To increase the transparency of algorithms, we use explanatory AI (XAI) methods to provide users with clear explanations of scores and recommendations and integrate human-in-the-loop mechanisms for additional control and verification of results. Algorithmic bias is eliminated by balancing training samples and using penalty functions in the models to equalize results between groups of students. Adversarial learning methods minimize the dependence of models on sensitive attributes such as gender or nationality. To avoid spreading false information in chatbot responses, fact-checking systems are implemented that use verified knowledge bases and post-processing mechanisms to detect erroneous data. In addition, using toxic content detection models ensures that harmful or inappropriate messages are blocked, which helps maintain a safe learning environment. A comprehensive approach to introducing artificial intelligence includes technical innovations and ethical principles that guarantee safety and trust in educational technologies.

The introduction of intelligent systems in the educational process helps improve educational practices' effectiveness by automating the assessment and monitoring of students' progress. Artificial intelligence-based systems reduce teachers' workload, shorten the time for checking papers, and provide objective and structured feedback [21]. By processing large amounts of educational data, intelligent systems can identify students' educational needs, predict their progress, and offer individual learning strategies. Natural language processing algorithms are important for automatically evaluating written work and providing detailed feedback. At the same time, such systems can analyze students' behavioral data, which allows them to quickly identify potential risks of poor performance and implement timely support measures (Table 3).

In practice, automated assessment systems are used to check papers in the exact sciences and the humanities, such as essays or software code. The introduction of natural language processing models allows not only for assigning grades but also for creating detailed comments with recommendations for improvement. This contributes to a more transparent

Table 2

Key risks and mitigation strategies when using educational data processing algorithms

Risk category	Risk description	Risk mitigation strategies
Data privacy of malicious requests to LLM	Collecting large amounts of personal information, risk of leaks and unauthorized access. This can apply to both academic data and demographic information. In addition, chats with teaching assistants may contain personal data, which increases the risk of privacy violations	The use of anonymization and encryption algorithms to hide identifying information [17]. Creation of synthetic datasets that retain the statistical properties of real data, but without real personal information [20]. Use of federated learning to avoid transferring data to a central server [16]. Using detectors for blocking
Algorithmic bias	Inequalities in results due to poor quality or unbalanced samples, which may favor some groups of students and bias others	Balancing training samples by increasing data on underrepresented groups or adding weighting factors [16]. Adding penalty functions to the loss function to equalize results between different groups [24]. Adversarial learning to minimize the impact of sensitive characteristics [29].
Dissemination of false information	Generation of incorrect or inaccurate content that may mislead students and cause errors in the learning process	Integration of fact-checking and content filtering systems based on reliable databases [19]. Use of post-processing systems to identify false answers. Allow users to flag incorrect information to improve models [22].
Generating inappropriate content	Generation of toxic, harmful or age-inappropriate content in responses from teaching assistants	Use toxic content detection models (e.g. OpenAI Moderation or Nemo Guardrails) to block inappropriate messages before they are displayed to users

Source: compiled by the authors based on [16, 17, 19, 20, 22, 24, 29]

Table 3

The impact of intelligent systems on the efficiency of the educational process

Performance indicator	Functionality of intelligent systems	Expected result
Objectivity of the assessment	Using machine learning algorithms to analyze answers and check papers	Reducing subjectivity and increasing the accuracy of assessment
Speed of results processing	Automate test, essay, and assignment review processes	Reduced verification time and prompt delivery of results
Quality of feedback	Generate personalized feedback based on analyzing students' responses	Increase understanding of errors and correct learning paths
Predicting success	Using predictive models to analyze data on student progress	Identification of students at risk of poor academic performance for timely support

Source: compiled by the authors based on [3, 4, 9, 11, 17, 19]

and understandable learning process. Student progress monitoring systems collect and analyze data on learning activity, which allows for a quick response to problems such as decreased activity or unsatisfactory test results. By predicting academic performance, teachers and administrators can provide individualized advice and support for those who need extra attention, which positively impacts the overall level of academic engagement and student performance.

Artificial intelligence in education requires a clearly defined legal and regulatory framework that ensures compliance with ethical principles and the rights of all participants in the educational process. Today, regulatory approaches in many countries focus on ensuring data privacy by common international standards such as GDPR [15] and FERPA [14].

These acts regulate the collection, storage and processing of personal data, which is particularly important for educational systems that use large amounts of information about students. However, such regulations do not always cover the specifics of artificial intelligence algorithms, including aspects of transparency and responsibility for decision-making.

Existing regulatory approaches include the introduction of mechanisms to control the use of algorithms, the implementation of audits of algorithmic systems and measures to ensure algorithmic clarity. However, studies show that there are still gaps in the educational environment due to insufficient regulatory specification of the processes of monitoring and preventing potential abuses in cases of personalized learning platforms and chatbots [26]. The issue of preventing situations where artificial intelligence systems generate incorrect or biased information that may affect educational outcomes and violate the rights of participants in the educational process is becoming particularly relevant.

To improve regulatory approaches, standards for assessing the ethical use of algorithms, taking into account transparency and accountability for decisions made by intelligent systems, must be developed. Policies that provide for regular monitoring and verification of algorithms for compliance with privacy and fairness requirements must also be implemented. In addition, ensuring that information about the operation of algorithms is available to users will help build trust in intelligent systems in the educational process and minimize the risks associated with disseminating false or inaccurate data.

Integrating artificial intelligence into educational processes requires developing comprehensive recommendations that consider both technological capabilities and potential risks to ensure the safety and effectiveness of its use. The use of AI-based systems should be accompanied by implementing policies to protect students' data and ensure transparency of decision-making processes. Particular attention should be paid to the issues of algorithmic explainability, which allows users to understand the logic of the system and trust its results. Effective integration of artificial intelligence involves building an architecture that minimizes the risk of data leakage using modern methods such as federated learning and automated information anonymization.

In addition, it is necessary to implement tools to monitor algorithms to identify and eliminate possible biases in their work. This involves regular audits of systems using the principles of responsible AI and adjusting models to avoid imbalances in educational data processing. The development of recommendations should also include the introduction of content filtering and source verification mechanisms to prevent the spread of false information in the case of generative models that may produce unreliable or incorrect answers.

To ensure a safe learning environment, it is important to involve educators in developing and testing artificial intelligence systems, allowing them to adapt to real educational needs and challenges. In particular, integrating human control at the stage of using intelligent systems will help increase trust in the results and prevent critical errors in the learning process. The

recommendations should also include measures to improve the digital literacy of educators and students, which will contribute to a more effective use of modern technologies. Thus, a holistic strategy for introducing artificial intelligence into education should be based on the principles of transparency, security and responsibility, which will minimize risks and ensure a positive impact on the quality of education.

Conclusions. Integrating artificial intelligence into educational processes requires developing comprehensive recommendations that consider both technological capabilities and potential risks to ensure the safety and efficiency of its use. The use of AI-based systems should be accompanied by implementing policies to protect students' data and ensure transparency of decision-making processes. Particular attention should be paid to the issues of algorithmic explainability, which allows users to understand the logic of the system and trust its results. Effective integration of artificial intelligence involves building an architecture that minimizes the risk of data leakage using modern methods such as federated learning and automated information anonymization.

In addition, it is necessary to implement tools to monitor algorithms to identify and eliminate possible biases in their work. This involves regular audits of systems using the principles of responsible AI and adjusting models to avoid imbalances in educational data processing. The development of recommendations should also include the introduction of content filtering and source verification mechanisms to prevent the spread of false information in the case of generative models that may produce unreliable or incorrect answers.

To ensure a safe learning environment, it is important to involve educators in developing and testing artificial intelligence systems, allowing them to adapt to real educational needs and challenges. In particular, integrating human control at the stage of using intelligent systems will help increase confidence in the results and prevent critical errors in the learning process. The recommendations should also include measures to improve the digital literacy of educators and students, which will contribute to a more efficient use of modern technologies. Thus, a holistic strategy for introducing artificial intelligence into education should be based on the principles of transparency, security, and responsibility, which will minimize risks and ensure a positive impact on the quality of education.

Bibliography:

1. Agaoglu M. Predicting Instructor Performance Using Data Mining Techniques in Higher Education. *IEEE Access*. 2016. Vol. 4. P. 2379-2387. DOI: (date of access: 09.01.2025).

2. Akgun S., Greenhow C. Artificial Intelligence in Education: Addressing Ethical Challenges in K-12 Settings. *AI and Ethics*. 2022. Vol. 2, No. 3. P. 431-440. DOI: (date of access: 09.01.2025).

3. Aleven V., Roll I., McLaren B.M., Koedinger K.R. Scaling Up Programming by Demonstration for Intelligent Tutoring Systems Development: An Open-Access Web Site for Middle School Mathematics Learning. *IEEE Transactions on Learning Technologies*. 2009. Vol. 2, No. 2. P. 64-78. DOI: https://doi.org/10.1109/TLT.2009.22 (date of access: 09.01.2025).

4. Andersen R., Johansen T., Meyer T., Skumsnes A. Collaborative Learning with Block-Based Programming: Investigating Human-Centred Artificial Intelligence in Education. *Behaviour & Information Technology*. 2022. Vol. 41, No. 9. P. 1830-1847. DOI: https://doi.org/10.1080/0144929X.2022.2083981 (date of access: 09.01.2025).

5. Bekeš E. R. and Galzina V., Exploring the Pedagogical Use of AI-Powered Chatbots Educational Perceptions and Practices, *2023 46th MIPRO ICT and Electronics Convention (MIPRO)*, Opatija, Croatia, 2023, pp. 636-641, doi: 10.23919/MIPRO57284.2023.10159734.

6. Cabrera E., Garzón G., López L., Santos R. AI-Based Application to Predict Student Dropout in the National Learning Service SENA. *2023 XIII International Conference on Virtual Campus (JICV)*. IEEE, 2023. P. 1-4. DOI: https://doi.org/10.1109/JICV59748.2023.10565734 (date of access: 09.01.2025).

7. Celik I., Sahin F., Chen H.-Y. The Promises and Challenges of Artificial Intelligence for Teachers: A Systematic Review of Research. *TechTrends*. 2022. Vol. 66, No. 4. P. 616-630. DOI: https://doi.org/10.1007/s11528-022-00715-y (date of access: 09.01.2025).

8. Chen C.-M., Tsao H.-W. An Instant Perspective Comparison System to Facilitate Learners' Discussion Effectiveness in an Online Discussion Process. *Computers & Education*. 2021. Vol. 164. P. 104037. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.104037 (date of access: 09.01.2025).

9. Chen L., Wang Y., Zheng Z. Artificial Intelligence in Education: A Review. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 75264-75278. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988510 (date of access: 09.01.2025).

10. Chen S.-Y., Wang Y.-H., Chou T.-C. Children's Digital Art Ability Training System Based on AI-Assisted Learning: A Case Study of Drawing Colour Perception. *Frontiers in Psychology*. 2022. Vol. 13. P. 823078. DOI: https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.823078 (date of access: 09.01.2025).

11. Chiu T.K.F., Doleck T., Chaudhuri B., Gutiérrez-Esparza E., Ho J. Systematic Literature Review on Opportunities, Challenges, and Future Research Recommendations of Artificial Intelligence in Education. *Computers and Education: Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 4. P. 100118. DOI: https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100118 (date of access: 09.01.2025).

12. Costa E.B., Fonseca B., Santana M.A., de Araújo F.F., Rego J. Evaluating the Effectiveness of Educational Data Mining Techniques for Early Prediction of Students' Academic Failure in Introductory Programming Courses. *Computers in Human Behaviour*. 2017. Vol. 73. P. 247-256. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chb.2017.01.047 (date of access: 09.01.2025).

13. Essa S.G., Tariq A., Alam A., Zafar A., Iqbal M. Personalised Adaptive Learning Technologies Based on Machine Learning Techniques to Identify Learning Styles: A Systematic Literature Review. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 48392-48409. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3276439 (date of access: 09.01.2025).

14. Family Educational Rights and Privacy Act (FERPA). Official website. URL: https://www2.ed.gov/policy/gen/guid/fpco/ferpa/index.html (date of access: 09.01.2025).

15. General Data Protection Regulation (GDPR). Official website. URL: https://gdpr-info.eu (date of access: 09.01.2025).

16. Han X., Lee J., Chen R. Balancing out Bias: Achieving Fairness Through Balanced Training. *Proceedings of the 2022 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*. Association for Computational Linguistics, 2022. P. 11335-11350. DOI: https://doi.org/10.18653/v1/2022.emnlp-main.779 (date of access: 09.01.2025).

17. Holmes L., Stevens B., Ramos T. PIILO: An Open-Source System for Personally Identifiable Information Labelling and Obfuscation. *Information and Learning Sciences*. 2023. Vol. 124, No. 9/10. P. 266-284. DOI: https://doi.org/10.1108/ILS-04-2023-0032 (accessed 16.11.2024).

18. Hwang G.-J., Xie H., Wah B.W., Gasevic D. Vision, Challenges, Roles and Research Issues of Artificial Intelligence in Education. *Computers and Education: Artificial Intelligence*. 2020. Vol. 1. P. 100001. DOI: https://doi.org/10.1016/j.caeai.2020.100001 (date of access: 09.01.2025).

19. Li J., Zhang W., Hu S. The Dawn After the Dark: An Empirical Study on Factuality Hallucination in Large Language Models. *Proceedings of the 62nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers)*. Association for Computational Linguistics, 2024. P. 10879-10899. DOI: https://doi.org/10.18653/v1/2024.acl-long.586 (date of access: 09.01.2025).

20. Lu Y., Chen Z., Huang W. Machine Learning for Synthetic Data Generation: A Review. arXiv:2302.04062, arXiv, 30 June 2024. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.04062 (date of access: 09.01.2025).

21. Murtaza M., Mir S., Khan U., Ali A., Khalid S. AI-Based Personalised E-Learning Systems: Issues, Challenges, and Solutions. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 81323-81342. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3193938 (date of access: 09.01.2025).

22. Ouyang L., Wu J., Jiang H. Training Language Models to Follow Instructions with Human Feedback. arXiv:2203.02155, arXiv, 4 Mar. 2022. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.02155 (date of access: 09.01.2025).

23. Rekha R., Sharma S., Kapoor A. AI-Powered Personalised Learning System Design: Student Engagement And Performance Tracking System. *2024 4th International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)*. IEEE, 2024. P. 1125-1130. DOI: https://doi.org/10.1109/ICACITE60783.2024.10617155 (date of access: 09.01.2025).

24. Scutari M., Azcorra A., Kuhn M., Villani G. Achieving Fairness with a Simple Ridge Penalty. *Statistics and Computing*. 2022. Vol. 32, No. 5. P. 77. DOI: https://doi.org/10.1007/s11222-022-10143-w (date of access: 09.01.2025).

25. Sengupta D., Roy S., Chatterjee P. FedEL: Federated Education Learning for Generating Correlations between Course Outcomes and Programme Outcomes for Internet of Education Things. *Internet of Things*. 2024. Vol. 25. P. 101056. DOI: https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.101056 (accessed 16.11.2024).

26. Wilson J., Palmer T., Grey S., Wright A. Elementary Teachers' Perceptions of Automated Feedback and Automated Scoring: Transforming the Teaching and Learning of Writing Using Automated Writing Evaluation. *Computers & Education*. 2021. Vol. 168. P. 104208. DOI: (date of access: 09.01.2025).

27. Yang F., Li F.W.B. Study on Student Performance Estimation, Student Progress Analysis, and Student Potential Prediction Based on Data Mining. *Computers & Education*. 2018. Vol. 123. P. 97-108. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.04.006 (date of access: 09.01.2025).

28. Zawacki-Richter O., Marín V.I., Bond M., Gouverneur F. Systematic Review of Research on Artificial Intelligence Applications in Higher Education – Where Are the Educators? *International Journal of Educational Technology in Higher Education*. 2019. Vol. 16, No. 1. P. 39. DOI: (date of access: 09.01.2025).

29. Zhang B.H., Lemoine B., Mitchell M. Mitigating Unwanted Biases with Adversarial Learning. *Proceedings of the 2018 AAAI/ACM Conference on AI, Ethics, and Society*. ACM, 2018. P. 335-340. DOI: https://doi.org/10.1145/3278721.3278779 (date of access: 09.01.2025).

Поляковська Н.О. МОЖЛИВОСТІ ТА РИЗИКИ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ОСВІТІ КРІЗЬ ПРИЗМУ НАУКИ ПРО ДАНІ

У статті проаналізовано можливості та ризики використання штучного інтелекту в освітніх системах крізь призму науки про дані. Актуальність дослідження обумовлена стрімким розвитком інтелектуальних технологій, які сприяють модернізації освітнього процесу та забезпеченню персоналізованого навчання. Встановлено, що інтеграція інтелектуальних систем дозволяє автоматизувати оцінювання знань, підвищувати якість зворотного зв'язку та прогнозувати успішність здобувачів освіти. Разом із тим існують виклики, пов'язані із забезпеченням конфіденційності даних, прозорістю алгоритмів і мінімізацією алгоритмічної упередженості.

Метою статті є аналіз ефективності використання штучного інтелекту в освіті, визначення ключових ризиків і розробка рекомендацій щодо впровадження інноваційних систем для підвищення якості освітніх практик.

Методологія. Дослідження ґрунтується на системному аналізі освітніх даних, порівнянні різних моделей інтелектуальних систем та оцінюванні їх впливу на навчальний процес. Використано методи аналізу ризиків для визначення основних загроз та стратегії їх мінімізації.

Наукова новизна. У статті представлено комплексний аналіз прикладних аспектів використання інтелектуальних систем у сфері освіти. Виявлено прогалини у нормативно-правовому регулюванні та запропоновано рекомендації для розробки більш прозорих і адаптивних алгоритмів, що враховують потреби освітніх установ і вимоги конфіденційності.

Висновки. Доведено, що штучний інтелект здатен підвищити ефективність освітніх процесів за умови дотримання етичних стандартів і впровадження механізмів прозорості алгоритмів. Запропоновано рекомендації для безпечного використання інтелектуальних систем, що включають анонімізацію даних, аудит алгоритмів і підвищення цифрової компетенції учасників освітнього процесу.

Ключові слова: *штучний інтелект, персоналізоване навчання, обробка освітніх даних, алгоритмічна прозорість, конфіденційність.*

УДК 004:378.091.31
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/30

Прозур В.О.
Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій

ВТРУЧАННЯ У ХМАРНІ СЕРВІСИ: НОВІ ВИКЛИКИ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

Метою цієї статті є дослідження хмарних сервісів та їхніх можливостей та викликів. Стаття присвячена дослідженню питань побудови та ефективності використання хмарних сервісів для побудови інформаційної безпеки. Визначено основні засади функціонування автоматизованих систем керування хмарними сервісами. Особливостями запропонованої архітектури є використання портальних технологій, автоматичного управління ресурсами та гібридної хмарної інфраструктури. Різноманітні дослідницькі проблеми визначаються з точки зору зберігання розподілених баз даних, безпеки даних, неоднорідності та візуалізація даних у хмарних сервісах. З останнім прогресом комп'ютерних технологій кількість доступних хмарних сервісів збільшується день за днем. Однак надмірні обсяги даних створюють великі проблеми для користувачів. Тим часом, хмарні сервіси забезпечують потужне середовище для зберігання великих обсягів даних. Результати дослідження: описують підходи до захисту хмарних сервісів залежно від категорії інфраструктури, що використовується – приватні/публічні. Проведено порівняльний аналіз поділу відповідальності між провайдером та користувачем таких хмарних сервісів, як IaaS, PaaS, SaaS. Аналіз показав, що компанії забезпечують захист усіх рівнів хмарної інфраструктури самостійно у разі використання приватного хмарного сервісу. В разі використання публічного хмарного сервісу – за компанією залишається менший контроль за захистом, що дозволяє заощадити кошти на обслуговуючих фахівців, але позбавляє можливості вносити суттєві зміни до поточної інфраструктури для відповідності вимогам регуляторів. Практична значущість дослідження підтверджується визначенням набору практичних рекомендацій щодо усунення основних загроз хмарної інфраструктури шляхом застосування засобів захисту різних класів, приклади яких представлені у роботі.

Ключові слова: *хмарні обчислення, засоби захисту, бази даних, гібридні хмарні інфраструктури, публічний хмарний сервіс.*

Постановка проблеми. Актуальність використання на сьогоднішній день хмарних ресурсів очевидна, зростання їх можливостей у різних сферах стає все більш значним, а самі хмарні технології вже виділяються в окрему галузь ринку інформаційних технологій. При цьому цілком очевидно, що поряд зі стрімким зростанням використання хмарних систем та їх яскраво вираженими перевагами зростає також кількість нових ризиків та загроз, технологічного та правового характеру, які обов'язково мають бути досліджені.

Зародження хмарних технологій відбулося 1963 року за ініціативи Міністерства оборони США. В основі досліджень лежало створення принципово нової системи розподілу часу для поява можливості організації спільного доступу до ресурсів електронно-обчислювальних машин (ЕОМ) паралельно кільком віддаленим користувачам. В основу цих досліджень лягла експериментальна система Compatible Time-Sharing System (CTSS), вчені отримали можливість підключатися до одного. Використовуючи попередні напрацювання, до 1971 року було створено найбільш сучасна розрахована на багато користувачів операційна система UNIX [1].

Наступними важливими кроками у розвитку хмарних технологій стали можливість підключення до глобальної мережі та поява віртуальних машин. З розвитком інтернету широке поширення отримали онлайн-сервіси – SaaS (Software as a Service – програмне забезпечення як послуга), в яких користувачу надавалася можливість працювати з програмним забезпеченням віддалено через мережу Інтернет (рис. 1) [2].

В даний час обсяг хмарних послуг в Україні інтенсивно зростає, проявляється тенденція співробітництва міжнародних компаній із провайдерами хмарних сервісів. Це підтверджує міжнародна дослідна компанія IDC (International Data Corporation) у своїй роботі «Ринок хмарних послуг України перевищив мільярд доларів», а також статистика найбільших інтеграторів у сфері інформаційних технологій, це пов'язано з збільшенням проектів, пов'язаних із хмарним середовищем.

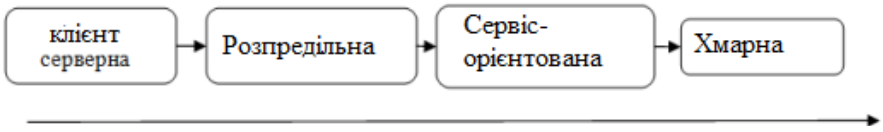


Рис. 1. Послідовність розвитку концепцій [2]

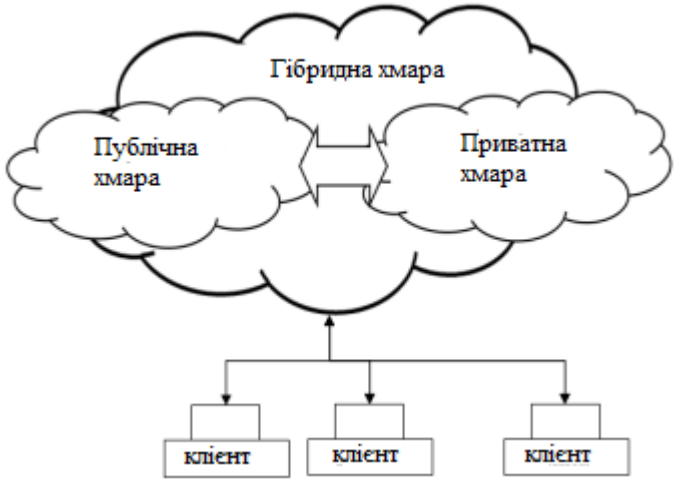


Рис. 2. Гібридна хмарна інфраструктура [7]

Історія з пандемією COVID-19 наголошує, що бізнес-процеси у найбільших підприємствах вимагають такого рівня інформатизації, щоб у працівників був доступ до ресурсів бізнес-процесів у будь-який час і з будь-якої точки світу. А використання хмарних технологій дозволить забезпечувати необхідний рівень доступності [3]. Все це говорить про те, що питання безпеки хмарних серверів як ніколи актуальні. Водночас особливої гостроти набуває проблематика щодо забезпечення безпеки, включаючи захист інформації під час використання хмарних технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні хмарні системи класифікують за моделями розгортання, визначальним розміщення та доступ до даних, і за моделями обслуговування, визначальним тип та обсяги наданих послуг [4]. За моделлю розгортання автори [5] розрізняють такі види:

– Приватна хмара – це інфраструктура, обмежена групою користувачів, найчастіше у межах співробітників однієї компанії. У цьому випадку ніхто крім них (т.к. доступ може бути обмежений на фізичному рівні) не може отримати доступ до даних, тим самим забезпечуючи безпеку даних.

– Публічна хмара – це інфраструктура для вільного використання широким спектром користувачів. Дозвіл доступу великої кількості різних користувачів ставить під великі ризики витоку та втрати даних.

– Громадська хмара – вид інфраструктури для групи або кількох груп мають спільні завдання та цілі.

Як зазначає Khan із співавторами [6] публічна хмара надає зручний та вільний доступ до даних, але через це є вразливим. Приватна хмара, у свою чергу, надає доступ до даних обмеженій кількості користувачів, наприклад, усередині однієї компанії, цим забезпечуючи ізольованість даних, отже їх безпеку. Надати зручний доступ та убезпечити дані дозволяє об'єднання даних моделей у гібридну хмару. Гібридна хмара – це комбінація, що поєднує дві і більше різних хмарних інфраструктур. Поділ хмари на публічну та приватну частини, дозволяє забезпечити безпеку даних у приватній частині та вільний доступ до даних у публічній частині, як показано на рис. 2 [7].

Le Duc з колегами [8] виділяють три види хмарних сервісів: інфраструктура як послуга (IaaS), платформа як послуга (PaaS) та програмне забезпечення як послуга (SaaS). У зв'язку з цим слід зазначити зроблену наприкінці 2022 року заяву компанії «Trend Micro», одного з лідерів серед постачальників комплексних засобів захисту «хмар», про те, що наявні наразі засоби безпеки поки що не здатні повною мірою забезпечити захист даних у хмарних серверах [9]. Як зазначається в [10] ця проблема є актуальною, адже однією з ключових компаній на міжнародному ринку програмного забезпечення в галузі інформаційної безпеки та

антивірусів корпорацією «Symantec», зроблено висновок у тому, що 77% підприємств відчувають труднощі через самовільне використання персоналом хмарних ресурсів в обхід правил підприємства, що призводить до порушень цілісності чи втрати конфіденційної інформації. Саме з цієї причини на особливу увагу заслуговують аспекти правового регулювання використання хмарних технологій і витікаючих з цього ризиків.

У класичній моделі забезпечення інформаційної безпеки контроль якості здійснюється перед використанням системи [11]. У сучасній моделі необхідно постійно контролювати рівень виконання вимог безпеки: аналізувати якість та моніторити здоров'я хмарної системи. Alsolami E. [12] наголошує, що забезпечення інформаційної безпеки у хмарі – комплексне завдання, яка досягається за рахунок комбінації «технології – процеси» і включає наступні основні компоненти:

a) класичні підходи (контроль доступу до хмари, захист від шкідливого програмного забезпечення, захист периметра та ін.);

b) процеси (процеси забезпечення інформаційної безпеки для класичної інфраструктури: управління доступом, управління інцидентами, управління вразливістю інфраструктури, управління ризиками – все це необхідно адаптувати до специфіки хмари, її інструментарію та моделі поділу відповідальності; унікальних процесів для сучасної інфраструктури);

c) хмарні підходи (індивідуальні підходи для унікальних хмар (використання вбудованих інструментів забезпечення інформаційної безпеки хмари, шифрування даних у хмарі, вибір хмарного провайдера з урахуванням можливостей інформаційної безпеки та ін.).

Проблема погіршується ще й тим, що, розміщуючи інформацію в публічному хмарному сервісі, організація не має можливості контролювати рівень забезпечення її безпеки через те, що провайдери хмарних сервісів не надають клієнтам можливість проведення статистичного контролю захищеності своїх сервісів.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження хмарних баз даних, їхніх можливостей та викликів у впровадженні в освітній, науковий та технічний процес.

Виклад основного матеріалу. Серед найбільш актуальних загроз як у приватній, так і публічній сервісній хмарі, виділяються наступні:

• недостатній рівень інформаційної безпеки (ІБ) провайдера;

• неконтрольований доступ до хмарних сервісів [13];

• перехоплення контролю над ресурсами у хмарі;

• несанкціонований доступ до Application programming interface (API);

• витік конфіденційних даних із хмари;

• використання «тіньових ІТ».

У разі приватних та публічних хмар з'являється питання поділу відповідальності (табл. 1) між провайдером та користувачем хмарних сервісів. Ця таблиця – концептуальна, залежно від хмарного провайдера та конкретного сервісу, який буде використовуватися у сервісній хмарі, сам поділ відповідальності може змінюватися. У випадках приватної хмари компанія забезпечує захист на всіх рівнях від фізичної інфраструктури до рівня тих даних, що обробляються у хмарній платформі. У разі публічної хмари провайдер та користувач беруть на себе частину відповідальності, організуючи спільну роботу. Таким чином, за клієнтом залишається менший контроль, ніж у власній інфраструктурі. Це допомагає заощадити, але підвищує важливість контролю, що залишається на стороні клієнта [15].

Таблиця 1

Розподіл обов'язків між провайдером та користувачем [15]

Об'єкти	**Приватні хмари**	**Громадські сервісні хмари**			**Особливості**
	IaaS/PaaS/SaaS	IaaS	PaaS	SaaS	
Дані	–	–	–	–	Підвищення важливості ІБ високих рівнів (немає можливості компенсувати низькорівневими «контролями»)
Кінцеві пристрої та користувачі	–		–	–	
Управління доступом	–	–		–	
Програми	–	–		+	Передача провайдеру витрат на підтримку контролю; збільшення важливості контрактів та угод про рівень сервісу
Мережа	–			+	
Хости	–			+	
Фізична безпека	–			+	
Позначення:		– відповідальність користувача + відповідальність провайдера сервісних хмарних послуг			

Особливість захисту хмарного сервісу випливає із високого ступеня автоматизації хмарних платформ: підвищується динамічність того ландшафту, що у хмарі може бути розгорнутий. Якщо раніше можна було обійтися ручними «контролем» (ручним адмініструванням та реалізацією вимог ІБ), то на даний час у сервісній хмарі такий контроль не встигає за темпами хмари. Для своєчасного виявлення та контролю всіх змін в інфраструктурі сервісної хмари необхідно впроваджувати автоматизацію контролю ІБ та використовувати вже готові шаблони.

Раніше основа безпеки хмарних середовищ полягала у захисті мережевого периметра від зовнішніх загроз. У зв'язку із нинішньою віддаленою роботою через пандемію та військові дії грань мережевого периметра розмивається. Співробітники компаній, які використовують хмарні послуги, виходять за межі мережного периметра при підключенні до внутрішніх систем через незахищені канали зв'язку, а також «споживають» хмарні програми, які мають на увазі передачу будь-яких даних та процесів поза контрольованим мережевим периметром. Отже, у сучасній інфраструктурі захист тільки мережевого периметра недостатній, що веде до необхідності забезпечення захисту на всіх рівнях: мережа, програми, доступ, дані.

Розширене бачення захистів хмар ґрунтується на кращих міжнародних практиках, вироблених за більш ніж 10 років існування хмар, а також на практиці побудови хмарних платформ та міграції інфраструктури з традиційного ландшафту у хмари, захисту хмарних середовищ. Дане бачення полягає в приєднанні зовнішніх сервісів (сервісів організацій-партнерів, державних органів: платформ закупівель, логістики та державних органів) до класичного розуміння хмари (приватні, громадські).

Зовнішні сервіси схожі по своїй організації з хмарними програмами, оскільки також контролюються сторонньою організацією, а користувачам цих сервісів залишається лише правильні у використанні. Відмінністю зовнішніх сервісів від хмарних додатків організацій є те, що хмарні програми самостійно визначають спосіб використання тих чи інших додатків, а зовнішні послуги реалізують жорстко прописану логіку взаємодії із сторонньою організацією. Проте рівень контролю для хмарних та зовнішніх сервісів часто ідентичний. Тому розумно розширювати бачення захисту хмарних сервісів саме таким способом (табл. 2) [16].

Багато компаній, запровадивши хмарну інфраструктуру, вже зараз стикаються з проблемою моментального впровадження комплексного підходу до захисту сервісних хмар. Для цього було виділено 8 ключових «контролів», які необхідно виконувати для базової хмари захисту.

1. Ідентифікація використовуваних хмар: аналіз мережного трафіку; використання програмного забезпечення Cloud Access Security Broker (CASB).

2. Відповідність вимогам регуляторів: перевірка надійності провайдера; реалізація необхідних контролів для захисту ресурсів у хмарі.

3. Захист доступу: посилена автентифікація (MFA – Multi-Factor Authentication), доступ довіреним пристроям.

4. Процеси ІБ у хмарі: оновлення процесів з урахуванням специфіки хмари.

5. Навчання працівників: внутрішні та зовнішні навчання; здавання сертифікацій.

6. Налаштування автоматизованих правил використання хмари: обмеження доступних для використання хмарних сервісів; розгортання хмарних ресурсів на основі шаблонів.

7. Автоматизація контролю ІБ у хмарі: автоматичне виявлення та блокування несанкціонованих змін у хмарних ресурсах.

8. Моніторинг ІБ: відправка подій з хмари у SIEM (Security Information and Event Management).

Опис, способи та інструменти усунення основних загроз хмарної інфраструктури

1. Недостатній рівень ІБ провайдера тягне за собою такі загрози забезпечення ІБ (ГІБ) хмарної інфраструктури:

a) загроза компрометації даних у хмарі через вразливу інфраструктуру провайдера;

b) загроза недоступності ресурсів та систем внаслідок порушення роботи хмарної платформи провайдера;

c) загроза невиконання вимог регуляторів;

d) необхідні дії для ОІБ – оцінка провайдера та хмарних сервісів, що їм надаються з урахуванням мети використання хмари та «чутливої» інформації, яка оброблятиметься у хмарі [17]. Для ОІБ можливе використання методики CSA (Cloud Security Alliance). Застосовні рівні фреймворку: інфраструктура.

2. Неконтрольований доступ до хмарних сервісів тягне у себе такі загрози:

• доступ колишніх співробітників до зовнішніх сервісів, що використовуються в компанії (електронні торгові майданчики, логістичні сис-

Таблиця 2

Підхід до захисту сервісних хмар

Рівні	Робітники	Приватні хмари	Публічні хмари	Внутрішня взаємодія
Доступ		Розмежування зон відповідальності у хмарі*		
	Контроль мережевого доступу	Контроль доступу до ресурсів		
	Контроль привілейованого доступу	Управління секретами		
		Інтегроване керування доступом*		
	Багатофакторна автентифікація	Керування доступом до API*		
Дані	Управління правами на доступ до даних (IRM)*		Шифрування даних у хмарі*	Віртуальні кімнати даних (VDR)
		Ідентифікація та класифікація даних		
	Захист від витоків даних			
	Контроль передачі даних у хмарі*			
Програми		Захист web-додатків		
		Захищена взаємодія сервісів у контейнерних середовищах*		
		Автоматизовані контролі ІБ у розробці / Безпека контейнерів (DevSecOps)		
Інфраструктура	Захист від шкідливого ПЗ			
	Управління мобільними пристроями	Захист платформи приватної хмари*	Оцінка провайдера*	
	Контроль «тіньових ІТ»			
	Просунутий захист робітників станцій	Захист інфраструктури	Автоматизація політик безпеки	
		Тестування на проникнення та BAS		
	Інтеграція з SOC			
Процеси ІБ	Управління ризиками ІБ	Тренінги та обізнаність		Політики та стандарти
	Аналіз потоків даних, бачення профілів користувачів	Регулярні вимоги		Управління інцидентами та проведення розслідувань
Позначення та скорочення:		* – Хмарні підходи (решта – класичні підходи) API – Application programming interface IRM – Information Rights Management VDR – Virtual Data Room DevSecOps – Development, Security and Operations BAS – Breach and Attack Simulation SOC – Security Operation Center		

теми, системи пошуку субпідрядників, хмарні послуги та ін.);

• відсутність контролю за зовнішніми сервісами, що використовуються;

• відсутність контролю над даними, переданими у зовнішні послуги;

• відсутність контролю доступу до зовнішніх сервісів;

• доступ із недовірених та вразливих пристроїв.

Необхідні дії для ОІБ такі:

• виявлення використовуваних хмарних сервісів, аналіз процесів їх використання та критичності;

• розробка регламенту контролю доступу користувачів до хмарних сервісів, що включає комплекс організаційних та технічних заходів;

• розробка рольової моделі та політик розмежування доступу до ресурсів;

• впровадження систем PIM/PAM (Privileged Identity Management/Privileged Access Management) для контролю дій адміністраторів;

• інтеграція хмари з MDM-системами (Master Data Management);

• тестування на проникнення.

Вибір вендора Indeed. Застосовні рівні фреймворку: доступ, дані.

3. Перехоплення контролю за ресурсами у хмарі тягне у себе такі загрози:

• складність інвентаризації активів у хмарі;

• відсутність зручних інструментів контролю за змінами, що вносяться з боку IT;

• відсутність розуміння процесів взаємодії активів у хмарі між собою та із зовнішнім світом;

• складність контролю процесу оновлення та розгортання активів;

• відсутність єдиної структурованої політики безпеки.

Необхідні дії для ГІБ такі:

• обстеження існуючих активів та «життєвого циклу» ресурсів у хмарі;

• розробка адаптованих під хмару процесів;

• використання систем управління ІБ громадських хмарних середовищ;

• впровадження систем контролю стану хмарних активів;

• створення екосистеми безпеки у приватних хмарах;

• розробка політик безпеки хмарних активів [18].

Проведений аналіз літературних джерел з тематики даної роботи, показує, що науці відомо сім основних напрямків втручання в хмарні сервіси SaaS, PaaS і IaaS:

− порушення конфіденційності під час використання хмарних технологій;

− порушення безпеки під час використання програмних інтерфейсів (API);

− порушення всередині компанії користувача;

− порушення цілісності систем віртуалізації;

− порушення правил аутентифікації, авторизації та аудиту, що тягне за собою втрату або витік інформації;

− порушення цілісності персональних даних, що надають доступ до необхідних сервісів;

− порушення стійкості внутрішньої інфраструктури системи [19].

Результатом спільної роботи організацій TCG і CSA, стосовно успішної організації безпеки хмарних систем на всіх її етапах роботи, стали сформовані рекомендації, які повинні бути враховані при укладенні договору між клієнтом і провайдером. Згідно рекомендаціям фахівців необхідно:

− використовувати технології шифрування для забезпечення збереження даних;

− захистити дані під час передавання, для цього потрібно використовувати надійні протоколи і алгоритми (наприклад TLS, IPsec і AES);

− організувати високий ступінь аутенфікації;

− ізолювати користувачів один від одного в тому плані, що дані і додатки одного клієнта повинні бути відокремлені від інших користувачів;

− провайдеру слідувати єдиній стратегії в нормативно-правовому аспекті;

− розробити документальні підтвердження на незаплановані події.

Виконання наданих порад дозволить вирішити безліч питань, пов'язаних з безпечним використанням хмарних сервісів.

Висновки. В умовах цифрової трансформації на ефективність бізнес-процесів впливають хмарні сервіси, які завдяки своїм перевагам є найбільш динамічно розвинутими у сфері інформаційних технологій. Авторами проаналізовано досвід роботи інженерів з інформаційної безпеки, що спеціалізуються в галузі проектування та впровадження засобів захисту сервісної хмарної інфраструктури, що дозволило обґрунтувати продуктивну типізацію та класифікацію застосовуваних хмар, визначити найбільш актуальні загрози, що зустрічаються в приватних та публічних хмарах, та способи їх усунення, виділити особливості поділу відповідальності між провайдером та користувачем хмарних сервісів (IaaS, PaaS, SaaS), а також обґрунтувати продуктивний підхід до забезпечення інформаційної безпеки у хмарі.

Список літератури:

1. Syantan G., Stephen Y., Arun-Balaji B. Attack Detection in Cloud Infrastructures Using Artificial Neural Network with Genetic Feature Selection. In Proceedings of the IEEE 14th International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing, Athens, Greece, 12–15 August 2016; pp. 414–419.

2. Selamat N., Ali F. Comparison of malware detection techniques using machine learning algorithm. Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci. 2019, 16, 435.

3. Stefan H., Liakat M. Cloud Computing Security Threats And Solutions. J. Cloud Comput. 2015, 4, 1.

4. Venkatraman S., Mamoun A. Use of data visualisation for zero-day malware detection. Secur. Commun. Netw. 2018, 1–13.

5. Xue M., Yuan C., Wu H., Zhang Y., Liu W. Machine Learning Security: Threats, Countermeasures, and Evaluations. IEEE Access 2020, 8, 74720–74742.

6. Khan A. N., Fan M. Y., Malik A., Memon R. A. Learning from Privacy Preserved Encrypted Data on Cloud Through Supervised and Unsupervised Machine Learning. In Proceedings of the International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies, Sindh, Pakistan, 29–30 January 2019; pp. 1–5.

7. Khilar P., Vijay C., Rakesh S. Trust-Based Access Control in Cloud Computing Using Machine Learning. In Cloud Computing for Geospatial Big Data Analytics; Das, H., Barik, R., Dubey, H., Roy, D., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2019; Volume 49, pp. 55–79.

8. Le Duc T., Leiva R. G., Casari P., Östberg, P. O. Machine Learning Methods for Reliable Resource Provisioning in Edge-Cloud Computing: A Survey. ACM Comput. Surv. 2019, 52, 1–39.

9. Lim S. Y., Kiah M. M., Ang T. F. Security Issues and Future Challenges of Cloud Service Authentication. Polytech. Hung. 2017, 14, 69–89.

10. Lin C., Lu H. Response to Co-resident Threats in Cloud Computing Using Machine Learning. In Proceedings of the International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Caserta, Italy, 15–17 April 2020; Volume 926, pp. 904–913.

11. Al-Janabi S., Shehab A. Edge Computing: Review and Future Directions. REVISTA AUS J. 2019, 26, 368–380.

12. Alsolami E. Security threats and legal issues related to Cloud based solutions. Int. J. Comput. Sci. Netw. Secur. 2018, 18, 156–163.

13. Barona R., Anita M. A survey on data breach challenges in cloud computing security: Issues and threats. In Proceedings of the International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), Paris, France, 17–18 September 2017; pp. 1–8.

14. Bhamare D., Salman T., Samaka M., Erbad A., Jain, R. Feasibility of Supervised Machine Learning for Cloud Security. In Proceedings of the International Conference on Information Science and Security, Jaipur, India, 16–20 December 2016; pp. 1–5.

15. Borylo P., Tornatore M., Jaglarz P., Shahriar N., Cholda P., Boutaba R. Latency and energy-aware provisioning of network slices in cloud networks. Comput. Commun. 2020, 157, 1–19.

16. Butt U. A., Mehmood M., Shah S. B. H., Amin R., Shaukat,M. W., Raza S. M., Piran M. J. A review of machine learning algorithms for cloud computing security. Electronics, 2020. 9(9), 1379.

17. Callara M., Wira P. User Behavior Analysis with Machine Learning Techniques in Cloud Computing Architectures. In Proceedings of the 2018 International Conference on Applied Smart Systems, Médéa, Algeria, 24–25 November 2018; pp. 1–6.

18. Carmo M., Dantas Silva F. S., Neto A.V., Corujo D., Aguiar, R. Network-Cloud Slicing Definitions for Wi-Fi Sharing Systems to Enhance 5G Ultra-Dense Network Capabilities. Wirel. Commun. Mob. Comput. 2019, 2019, 8015274.

19. Остапов С. Е. Кібербезпека : сучасні технології захисту. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. / С. Е. Остапов, С. П. Євсеєв, О. Г. Король. – Львів: «Новий Світ- 2000», 2020. – 678 с.

Prozur V.O. INTERVENTION IN CLOUD SERVICES: NEW CHALLENGES FOR INFORMATION SECURITY

The purpose of this article is to study cloud services, their capabilities and challenges. The article is devoted to the study of the issues of building and effective use of cloud services for building information security. The main principles of functioning of automated cloud services management systems are determined. The features of the proposed architecture are the use of portal technologies, automatic resource management and hybrid cloud infrastructure. Various research problems are defined from the point of view of distributed database storage, data security, heterogeneity and data visualization in cloud services. With the recent progress of computer technologies, the number of available cloud services is increasing day by day. However, excessive amounts of data create big problems for users. Meanwhile, cloud services provide a powerful environment for storing large amounts of data. Research results: describe approaches to protecting cloud services depending on the category of infrastructure used – private/public. A comparative analysis of the division of responsibility between the provider and the user of cloud services such as IaaS, PaaS, SaaS was conducted. The analysis showed that companies provide protection for all levels of cloud infrastructure independently when using a private cloud service. When using a public cloud service, the company has less control over protection, which allows saving money on service specialists, but deprives the ability to make significant changes to the current infrastructure to comply with regulatory requirements. The practical significance of the research is confirmed by the definition of a set of practical recommendations for eliminating the main threats to cloud infrastructure by using protection tools of different classes, examples of which are presented in the work.

Key words: *cloud computing, security tools, databases, hybrid cloud infrastructures, public cloud service.*

УДК 004.738.5
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/31

Прокопович-Ткаченко Д.І.
Університет митної справи та фінансів

Зубченко Н.С.
Університет митної справи та фінансів

Черкаський О.В.
Університет митної справи та фінансів

Деркач Я.О.
Харківський національний університет радіоелектроніки

ОДНОРІВНЕВА P2P VOIP ТЕЛЕФОНІЯ: АРХІТЕКТУРА, ПЕРЕВАГИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

Однорівнева (однорангова) P2P VoIP телефонія – це децентралізована технологія зв'язку, яка базується на прямій взаємодії між вузлами без централізованих серверів. Кожен пристрій у такій системі поєднує функції клієнта і сервера, забезпечуючи масштабованість, надійність, конфіденційність і ефективне використання мережевих ресурсів. Завдяки своїй архітектурі, P2P VoIP-мережі стійкі до зовнішніх атак, технічних збоїв і мають високу автономність. Відсутність єдиної точки відмови робить цю технологію одним із найперспективніших напрямів у телекомунікаціях.

Ключова перевага P2P VoIP полягає у зниженні затримок передачі даних завдяки прямій комунікації між вузлами. У традиційних централізованих системах з'єднання часто проходять через посередницькі сервери, що збільшує час передачі. Водночас у P2P-мережах цей недолік усувається, що підвищує якість зв'язку, зменшує ризик втрати пакетів і забезпечує стабільність навіть у нестабільних умовах. Така ефективність дозволяє впроваджувати P2P VoIP-системи в середовищах з обмеженими ресурсами, де доступ до традиційної інфраструктури є складним або неможливим.

Особливе значення однорангові системи мають у військових комунікаціях, системах екстремального зв'язку та рятувальних операціях. У таких умовах автономність, стійкість до перешкод і можливість роботи в обхід традиційних інфраструктур, таких як стільниковий чи супутниковий зв'язок, є критично важливими. Наприклад, у випадку стихійних лих P2P VoIP дозволяє рятувальним командам зберігати зв'язок навіть за повної відсутності традиційних засобів зв'язку.

Розвиток однорангових VoIP-систем є важливим кроком до створення більш стійких і безпечних телекомунікацій. Такі системи усувають проблеми централізованого зберігання даних, що часто є вразливим місцем традиційних мереж. Завдяки децентралізації забезпечується вищий рівень конфіденційності, що особливо актуально у світі, де захист інформації є пріоритетом. P2P VoIP виступає альтернативою централізованим моделям, відкриваючи нові стандарти у сфері зв'язку та закладаючи основу для майбутніх інновацій.

Ключові слова: *P2P VoIP телефонія, децентралізація, масштабованість, конфіденційність, однорангова архітектура.*

Постановка проблеми. У сучасних умовах зростання вимог до конфіденційності, надійності та продуктивності телекомунікаційних систем централізовані архітектури зв'язку демонструють суттєві недоліки, такі як вразливість до зовнішніх загроз, технічних збоїв, кібератак і залежність від єдиної точки відмови. Це створює значні ризики, особливо у критичних галузях, таких як військові комунікації, системи екстреного зв'язку та рятувальні операції, де автономність і надійність є визначальними для успішного виконання завдань. Також значними є затримки у передачі даних та високі витрати на підтримку традиційної мережевої інфраструктури, що стає бар'єром для впровадження ефективних рішень у середовищах з обмеженими ресурсами.

Практичне вирішення цих проблем пропонують однорангові (P2P) VoIP-архітектури, які ґрунтуються на децентралізованому підході до комунікацій. Вони забезпечують прямий обмін даними між вузлами мережі без використання централізованих серверів, що дозволяє усунути єдину

точку відмови, суттєво знизити затримки передачі даних та підвищити загальну продуктивність системи. Кожен пристрій у мережі виконує функції як клієнта, так і сервера, що забезпечує масштабованість, підвищену надійність і конфіденційність зв'язку.

Практична реалізація таких рішень може включати створення автономних P2P VoIP мереж для військових підрозділів, які здатні функціонувати незалежно від традиційних інфраструктур зв'язку, таких як супутникові чи стільникові мережі, особливо у кризових умовах. Також ці системи можуть бути впроваджені у сферах рятувальних операцій, де необхідна безперервна комунікація між підрозділами в умовах техногенних катастроф чи стихійних лих. Крім того, P2P VoIP технології є перспективними для зниження витрат у корпоративних мережах та впровадження у середовищах із високими вимогами до безпеки даних, наприклад у банківській сфері чи державних установах. Завдяки природній децентралізації та оптимізації ресурсів ці системи стають основою для переходу до більш стійких, безпечних і ефективних технологій комунікацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. VoIP (Voice over IP) технології є ключовим елементом сучасних телекомунікацій. У роботі Гартпенса "Пакетний посібник із VoIP" представлено огляд базових принципів VoIP, що включають використання пакетної передачі даних для голосових комунікацій. Автор акцентує увагу на особливостях налаштування мережевої інфраструктури та протоколів SIP і RTP [1, с. 15]. Це дозволяє системним адміністраторам ефективно впроваджувати VoIP у корпоративних мережах.

Питання кібербезпеки займає центральне місце у дослідженнях VoIP. У книзі Двіведі "Злам VoIP" детально розглянуто вразливості систем VoIP, зокрема протоколи SIP та H.323, а також описані атаки на рівні сигналізації та передачі даних. Крім того, запропоновані методи протидії, що включають шифрування та автентифікацію [2, с. 48]. Ендлер і Коллієр у роботі "Злам VoIP" також розкривають проблеми безпеки. Автори підкреслюють важливість моніторингу мережевого трафіку для виявлення підозрілих активностей, таких як DoS-атаки [3, с. 72].

Протокол SIP є основою для встановлення та завершення VoIP-з'єднань. У книзі Сінрайха та Джонстона "Інтернет-комунікації із використанням SIP" наведено технічні аспекти роботи SIP-протоколу та його інтеграції з мультимедійними сервісами. Автори також розглядають сценарії впровадження SIP у мережі корпоративного та публічного доступу [4, с. 102].

У книзі "FreeSWITCH 1.8: Вичерпне джерело" Мінесейла описані інструменти для побудови систем VoIP. Автор пояснює налаштування FreeSWITCH як серверної платформи для підтримки голосових і відеозв'язків [5, с. 45]. Ця робота корисна для розробників, які прагнуть створювати масштабовані системи зв'язку.

Ахсон та Іляс у "Довіднику з VoIP" висвітлюють питання надійності та безпеки систем голосового зв'язку. Особливу увагу приділено методам шифрування та впровадженню захищених мережевих протоколів, таких як SRTP [6, с. 83].

Фланаган у своїй роботі "VoIP та уніфіковані комунікації" розглядає перспективи розвитку VoIP-технологій у контексті переходу до уніфікованих комунікацій. Автор пропонує інтеграцію голосових сервісів із хмарними рішеннями, що дозволяє забезпечити високу масштабованість та гнучкість систем [7, с. 125].

Герсент, Петі та Гурле у книзі "Поза протоколами VoIP" досліджують використання VoIP у кризових ситуаціях. Автори аналізують можливість застосування систем IP-телефонії для створення стійких мереж під час катастроф, особливо в умовах обмеженого доступу до традиційної інфраструктури [8, с. 56].

Постановка завдання. Метою цієї публікації є дослідження та обґрунтування рішень для підвищення надійності VoIP-комунікацій в умовах дефіциту енергопостачання. Основна увага приділяється розробці ефективних архітектур, таких як однорангова (P2P) VoIP, які дозволяють зменшити залежність від централізованих серверів та мінімізувати споживання енергії за рахунок оптимізації мережевої взаємодії. Для досягнення цієї мети стаття спрямована на аналіз впливу дефіциту енергопостачання на роботу VoIP-систем та визначення основних факторів ризику для комунікаційних мереж. Особливу увагу приділено розробці децентралізованої P2P VoIP-архітектури, яка забезпечує підвищену надійність за рахунок усунення єдиної точки відмови та розподілу функцій між вузлами мережі. Математично обґрунтовується підвищення надійності комунікацій у децентралізованих мережах порівняно з традиційними централізованими системами. У рамках дослідження також розроблено рекомендації щодо впровадження енергоефективних рішень для підтримки VoIP-комунікацій у кризових умовах. Ця публікація спрямована на створення науково-практичної бази для адаптації

VoIP-технологій до умов нестабільного енергопостачання, що особливо важливо для критичних галузей, таких як військові комунікації, екстрені служби та рятувальні операції.

Виклад основного матеріалу. Однорівнева P2P VoIP архітектура забезпечує децентралізацію шляхом рівноправної участі всіх вузлів у передачі даних. Кожен вузол мережі одночасно виконує функції клієнта і сервера, що усуває необхідність у центральному сервері, який є єдиною точкою відмови в централізованих системах. Такий підхід дозволяє знизити затримки передачі даних завдяки прямій взаємодії між кінцевими вузлами, підвищити загальну надійність системи та забезпечити конфіденційність передачі даних, адже немає централізованого місця для перехоплення інформації [1, с. 20]. Це робить архітектуру особливо актуальною для критичних умов, таких як військові комунікації, де автономність і стабільність зв'язку є визначальними параметрами для успішного виконання завдань.

Для перевірки ефективності запропонованої архітектури була розгорнута однорангова мережа з використанням п'яти телефонних апаратів, з'єднаних через 100 Мбітні Ethernet-лінії. У рамках цієї мережі була реалізована зіркова топологія, що забезпечує повне резервування каналів передачі даних [2, с. 36]. Такий підхід дозволяє зберігати працездатність мережі навіть у разі виходу з ладу одного або декількох вузлів. Кожен апарат мав можливість одночасно підтримувати зв'язок із усіма іншими вузлами через резервні маршрути, що значно підвищує стійкість системи до збоїв [3, с. 48].

На кожному телефонному апараті був налаштований SIP-протокол, що дозволило організувати зв'язок без використання цифрової АТС. Це рішення повністю виключило з архітектури мережі вразливий елемент – централізовану АТС, яка могла б стати ціллю для атак чи точкою відмови системи [4, с. 75]. Відсутність центрального вузла унеможливлює порушення роботи всієї мережі через технічні збої чи зловмисні дії, що робить запропоновану систему більш стійкою та безпечною.

Запропонована топологія була продумана для забезпечення максимальної надійності у реальних умовах, таких як військові дії чи екстрені ситуації, де зовнішні фактори, такі як пошкодження ліній зв'язку чи локальні збої у роботі обладнання, можуть значно ускладнити комунікацію. Розгортання такої мережі продемонструвало її здатність забезпечувати безперервний зв'язок навіть при умовах високого навантаження на канали передачі даних [5, с. 125]. Низькі затримки у передачі сигналу, виключення централізованого елемента та стійкість до відмов вузлів підтвердили ефективність децентралізованого підходу в умовах, що вимагають високої надійності та конфіденційності [6, с. 92].

Розглянута мережева схема ілюструє реалізацію однорангової (P2P) VoIP мережі на основі зіркової топології з резервуванням. Ця мережа була розроблена для забезпечення високої надійності зв'язку в умовах, де критично важлива безперервна передача даних і мінімізація впливу зовнішніх факторів, таких як збої в лініях зв'язку або відмова обладнання. Особлива увага приділялася зниженню залежності від централізованих елементів і забезпеченню прямого зв'язку між вузлами (рис. 1).

Основні елементи схеми:

1. Центральний вузол виконує роль хабу для передачі даних між телефонними апаратами, забезпечуючи зв'язок між усіма вузлами.

2. Телефонні апарати (Телефон 1, Телефон 2, Телефон 3, Телефон 4, Телефон 5) підключені до центрального вузла через основні лінії зв'язку.

3. Резервні з'єднання, що додають додаткову стійкість до мережі, дозволяють зберігати зв'язок навіть у випадку відмови основної лінії.

Детальний опис:

1. Зіркова топологія: Основне з'єднання між центральним вузлом і телефонними апаратами забезпечує швидкий і прямий обмін даними.

2. Резервування: Кожен телефонний апарат підключений до мережі через дві лінії зв'язку: основну та резервну. У випадку пошкодження однієї лінії, мережа автоматично перемикається на резервний шлях, що дозволяє уникнути розриву зв'язку.

3. Масштабованість: Архітектура дозволяє легко додавати нові вузли без необхідності значних змін у структурі мережі.

4. Енергоефективність: Відсутність складної центральної АТС знижує енергоспоживання, що є критичним у ресурсно обмежених умовах.

Переваги схеми

Наявність резервування для кожного апарату, до якого підходять дві незалежні лінії, значно підвищує надійність зв'язку, оскільки система залишається функціональною навіть при збої основного каналу. Такий підхід забезпечує високу стабільність і стійкість мережі до зовнішніх впливів, що робить цю схему особливо актуальною для військових або екстрених комунікацій.

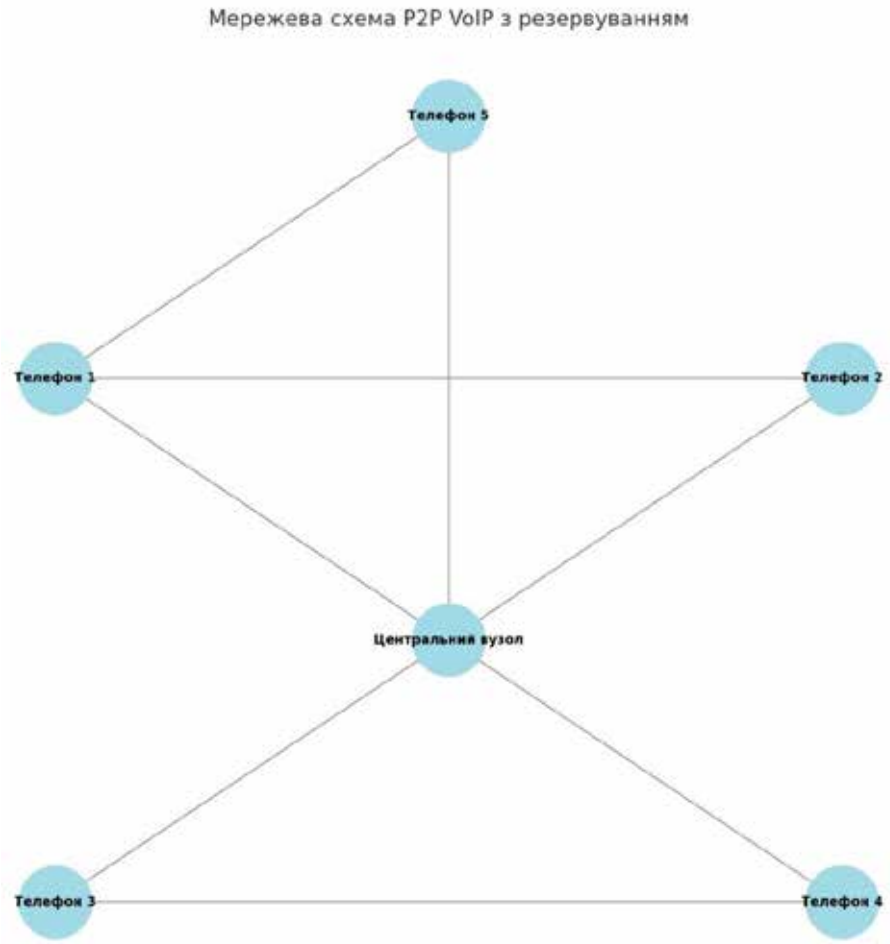


Рис. 1. Мережева топологія складається з центрального вузла, до якого підключені п'ять телефонних апаратів за допомогою Ethernet-ліній зі швидкістю 100 Мбіт/с.

Для розрахунку підвищення надійності та зниження відмов у VoIP мережі з резервуванням, розглянемо просту мережеву схему з двома шляхами передачі даних (основний та резервний).

Мережева схема P2P VoIP з резервуванням

Користувач A		Користувач A
↓		↓
Основний шлях	та	Резервний шлях
↓		↓
Користувач B		Користувач B

Розрахунок надійності

Позначимо:

- R_1 – надійність основного шляху,
- R_2 – надійність резервного шляху.

Надійність системи з резервуванням обчислюється за формулою:

$$R_{\text{система}} = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2)$$

Припустимо, що надійність основного шляху $R_1 = 0.95$ і надійність резервного шляху $R_2 = 0.90$.

Тоді:

$$R_{\text{система}} = 1 - (1 - 0.95)(1 - 0.90)$$
$$R_{\text{система}} = 1 - (0.05)(0.10)$$
$$R_{\text{система}} = 1 - 0.005$$
$$R_{\text{система}} = 0.995$$

Розрахунок відмов

Ймовірність відмови системи $F_{\text{система}}$ обчислюється як:

$$F_{\text{система}} = 1 - R_{\text{система}}$$

Тоді:

$$F_{\text{система}} = 1 - 0.995$$
$$F_{\text{система}} = 0.005$$

Висновок

Використання резервного шляху значно підвищує надійність VoIP мережі з 0.95 до 0.995, що знижує ймовірність відмови з 0.05 до 0.005. Це означає, що система з резервуванням є більш надійною і менш схильною до відмов.

Візуалізація

Користувач А ↓ Основний шлях ↓ Користувач В та **Користувач А** ↓ Резервний шлях ↓ Користувач В

Таким чином, резервування в мережі VoIP значно підвищує її надійність.Для порівняння надійності та ймовірності відмови телефонної мережі з центральним сервером, розглянемо схему, де центральний сервер є єдиною точкою відмови.

Мережева схема з центральним сервером

Користувач А
↓
Центральний сервер
↓
Користувач В

Розрахунок надійності

Позначимо:

- $R_{\text{сервер}}$ – надійність центрального сервера,
- $R_{\text{лінія}}$ – надійність лінії зв'язку між користувачами та сервером.

Надійність системи з центральним сервером обчислюється як добуток надійностей всіх компонентів:

$$R_{\text{система}} = R_{\text{сервер}} \cdot R_{\text{лінія}}^2$$

Припустимо, що надійність центрального сервера $R_{\text{сервер}} = 0.98$і надійність кожної лінії зв'язку $R_{\text{лінія}} = 0.95$.

Тоді:

$$R_{\text{система}} = 0.98 \cdot (0.95)^2$$
$$R_{\text{система}} = 0.98 \cdot 0.9025$$
$$R_{\text{система}} \approx 0.88445$$

Розрахунок відмов

Ймовірність відмови системи $F_{\text{система}}$ обчислюється як:

$$F_{\text{система}} = 1 - R_{\text{система}}$$

Тоді:

$$F_{\text{система}} = 1 - 0.88445$$
$$F_{\text{система}} \approx 0.11555$$

Показник	P2P VoIP з резервуванням	Телефонна мережа з центральним сервер
Надійність системи R	0.995	0.88445
Ймовірність відмови F	0.005	0.11555

Порівняння

Мережа P2P VoIP з резервуванням має значно вищу надійність (0.995) порівняно з телефонною мережею з центральним сервером (0.88445). Відповідно, ймовірність відмови в мережі P2P VoIP з резервуванням (0.005) значно нижча, ніж у телефонній мережі з центральним сервером (0.11555). Це свідчить про те, що використання резервування в P2P VoIP мережі значно підвищує її надійність і знижує ймовірність відмови.

Висновки. Однорівнева P2P VoIP телефонія продемонструвала високу надійність завдяки децентралізованій архітектурі, яка усуває єдину точку відмови та забезпечує функціонування мережі навіть при збої окремих вузлів. Резервування з'єднань значно знижує ймовірність відмови системи, що особливо актуально для критичних умов використання, таких як військові чи екстрені комунікації. Відсутність центрального сервера не лише зменшує витрати на створення та підтримку інфраструктури, а й сприяє економії енергії. Це особливо важливо в умовах дефіциту енергоресурсів, де стабільність і ефективність системи мають вирішальне значення. Архітектура P2P VoIP забезпечує легке масштабування мережі, дозволяючи додавати нові вузли без значних змін у структурі. Це робить технологію перспективною для впровадження у різних галузях, включаючи корпоративні мережі, екстрені служби та системи рятувальних операцій. Завдяки можливості працювати без доступу до централізованої інфраструктури, P2P VoIP є ефективним рішенням для регіонів з обмеженим доступом до ресурсів.

Додатково слід зазначити, що на запропоновану архітектуру однорангової P2P VoIP телефонії було подано заявку на патент у формі корисної моделі. Реєстраційний номер заявки – **202405663**, дата подання – **29.11.2024**. Назва винаходу: **"Однорівнева P2P VoIP телефонія: архітектура, переваги та перспективи застосування"**. Це підтверджує наукову новизну та практичну значущість запропонованого рішення, а також його унікальність у сфері телекомунікаційних технологій.

Заявка була подана до **Українського національного офісу інтелектуальної власності та інновацій (УкрНОІВ)**, що свідчить про прагнення авторів забезпечити правовий захист результатів своєї наукової та інженерної діяльності.

Список літератури:

1. Bart P. Packet Guide to VoIP: A System Administrator's Guide to VoIP Technologies. DOI: 10.5555/2591514. URL: https://www.oreilly.com/library/view/packet-guide-to/9781449339661/ (дата звернення: 14.12.2024).
2. Sinreich H., Johnston A. Internet Communications Using SIP: Delivering VoIP and Multimedia Services with Session Initiation Protocol. DOI: 10.1002/0470045298. URL:https://surl.li/teaqiq (дата звернення: 14.12.2024).
3. Endler D., Collier M. Hacking VoIP: VoIP Security Secrets and Solutions. DOI: 10.1036/0072263649. URL: https://www.mhprofessional.com/9780072263641 (дата звернення: 14.12.2024).
4. Collier M., Endler D. Hacking Exposed Unified Communications & VoIP: VoIP Security Secrets & Solutions, Second Edition. DOI: 10.1036/0071795836. URL: https://www.mhprofessional.com/9780071795839 (дата звернення: 14.12.2024).
5. Flanagan W.A. VoIP and Unified Communications: Internet Telephony and the Future Voice Network. DOI: 10.1002/9781119942904. URL:https://surl.li/mvpeza (дата звернення: 14.12.2024).
6. Ahson S.A., Ilyas M. VoIP Handbook: Applications, Technologies, Reliability, and Security. DOI: 10.1201/9781420066050. URL: https://surl.li/ewizpd (дата звернення: 14.12.2024).
7. Gershen O., Petit J.-P., Gourle D. Beyond VoIP Protocols: Understanding Voice Technology and Networking Techniques for IP Telephony. DOI: 10.1002/0470023629. URL:https://surl.li/vvvzhv (дата звернення: 14.12.2024).
8. Bates R.J. Securing VoIP: Keeping Your VoIP Network Safe. DOI: 10.1016/B978-1-59749-060-3.X5000-0. URL:https://surl.li/vkqryf (дата звернення: 14.12.2024).

Prokopovych-Tkachenko D.I., Zubchenko N.S., Cherkaskyi O.V., Derkach Ya.O. **PEER-TO-PEER VOIP TELEPHONY: ARCHITECTURE, ADVANTAGES, AND PROSPECTS OF APPLICATION**

Peer-to-peer (P2P) VoIP telephony is a decentralized communication technology based on direct interaction between nodes without centralized servers. Each device in such a system combines the functions of a client and a server, ensuring scalability, reliability, confidentiality, and efficient use of network resources. Due to its architecture, P2P VoIP networks are resilient to external attacks, technical failures, and operate autonomously. The absence of a single point of failure makes this technology one of the most promising directions in telecommunications.

The key advantage of P2P VoIP lies in reducing data transmission delays through direct communication between nodes. In traditional centralized systems, connections often pass through intermediary servers, increasing transmission time. In P2P networks, this drawback is eliminated, enhancing call quality, reducing packet loss risks, and ensuring stability even under challenging conditions. Such efficiency allows the deployment of P2P VoIP systems in resource-constrained environments where access to traditional infrastructure is limited or unavailable.

Peer-to-peer systems are particularly significant in military communications, emergency response, and rescue operations. In these scenarios, autonomy, resilience to disruptions, and the ability to function without traditional infrastructures like cellular or satellite communications are critically important. For instance, during natural disasters, P2P VoIP enables rescue teams to maintain communication even when conventional means of communication are completely unavailable.

The development of peer-to-peer VoIP systems is an essential step toward creating more robust and secure telecommunications. These systems address the challenges of centralized data storage, which is often a weak point of traditional networks. Decentralization provides a higher level of privacy, a critical feature in a world where information security is a priority. P2P VoIP stands as an alternative to centralized models, introducing new standards in communications and laying the foundation for future innovations.

Key words: *P2P VoIP telephony, decentralization, scalability, confidentiality, peer-to-peer architecture.*

УДК 004.056:355.45
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/32

Прокопович-Ткаченко Д.І.
Університет митної справи та фінансів

Звєрєв В.П.
Державний торговельно-економічний університет

Козаченко І.М.
Державний центр кіберзахисту
Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України

КІБЕРЗАГРОЗИ ТА МЕТОДИ ЗАХИСТУ ФІЗИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ПРОМИСЛОВОГО ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ (ILOT)

Стаття пропонує детальний аналіз загроз безпеки промислового інтернету речей (IIoT), який охоплює весь спектр потенційних вразливостей – від фізичного рівня взаємодії з периферійними пристроями до прикладного рівня, де можуть виникати складні сценарії атак, зокрема завдяки відсутності належних механізмів аутентифікації та шифрування. Автори наголошують, що загрози, пов'язані зі шкідливим програмним забезпеченням, здатні не лише викрадати дані чи порушувати роботу мереж, а й призводити до небезпечних збоїв у роботі фізичних компонентів промислових систем, що підтверджується прикладом Stuxnet.

Особливу увагу в статті приділено кожному рівню моделі OSI, аналізуючи, як саме можуть бути скомпрометовані фізичні пристрої, канали зв'язку, мережеві й транспортні протоколи, а також сеансові й прикладні служби. Розглядаються ключові ризики, до яких належить несанкціонований доступ до обладнання на фізичному рівні, перехоплення або модифікація пакетів на мережевому рівні, використання вразливостей протоколів чи сервісів на вищих рівнях тощо. Підкреслюється, що без відповідних превентивних заходів недоліки на кожному з цих рівнів можуть бути використані зловмисниками для проведення комплексних, багатокрокових атак.

У роботі підкреслено важливість комплексного захисту, що включає як технічні, так і організаційні компоненти. Серед таких заходів – застосування кіберімунітетних технологій, здатних забезпечити одночасний захист на кількох рівнях; впровадження ефективних систем виявлення вторгнень; дотримання принципів безпеки ланцюгів постачання, оскільки вразливості часто потрапляють у систему ще на етапі розроблення або доставки компонентів; а також регулярне оновлення програмного забезпечення та активне підвищення обізнаності персоналу.

Завдяки таким комплексним підходам до захисту індустріальні системи можуть суттєво знизити ризики, пов'язані з кібератаками, та забезпечити високу стійкість операційних процесів. Запропоновані рекомендації та методи запобігання атакам можуть бути корисними для широкого кола підприємств, що прагнуть захистити як свої дані, так і фізичні елементи виробничих систем, забезпечуючи безперервність та надійність функціонування критичної інфраструктури.

Ключові слова: *IIoT, шкідливе ПЗ, кібератаки, кібербезпека, фізична інфраструктура, кіберімунітет.*

Постановка проблеми. IIoT є ключовим елементом сучасного індустріального виробництва, що забезпечує автоматизацію, підвищення ефективності виробничих процесів і моніторинг критичних систем у режимі реального часу. Інтеграція фізичних пристроїв, сенсорів і програмного забезпечення створює нові можливості для оптимізації ресурсів і управління складними процесами. Проте розвиток IIoT супроводжується значними викликами, особливо у сфері кібербезпеки, оскільки збільшення мережевої взаємодії між пристроями створює нові ризики для безпеки [1, с. 45].

Сучасні кіберзагрози включають використання шкідливого програмного забезпечення, яке може впливати на фізичні компоненти промислової інфраструктури. Наприклад, вірус Stuxnet став символом того, як шкідливі програми можуть завдавати фізичної шкоди обладнанню [7, с. 112]. Такі атаки демонструють потребу в розробці інно-

ваційних підходів до захисту, які охоплюють не лише технологічний рівень, а й соціальні та організаційні аспекти [3, с. 87].

Особливо важливо розглядати ці питання напередодні впровадження емерджентно-адаптивних систем, що базуються на глибоких нейронних мережах. Ці системи здатні зберігати так звані "синаптичні структури" або "образи" можливих атак, що створює основу для прогнозування та попередження загроз [4, с. 132]. Наприклад, використання алгоритмів машинного навчання у рамках таких систем дозволяє аналізувати величезні обсяги даних, зокрема поведінкові патерни пристроїв IIoT, ідентифікувати аномалії та формувати стратегії захисту [5, с. 56].

Використання адаптивних систем у промислових середовищах може забезпечити значне підвищення рівня безпеки, зокрема завдяки інтеграції з концепціями "кіберімунітету" – багаторівневого захисту, який охоплює всі рівні моделі OSI [8, с. 78]. Такі підходи також сприяють побудові стійких ланцюгів постачання, що є критично важливими для уникнення атак, пов'язаних із підміною компонентів або використанням апаратних вразливостей [6, с. 91].

Наукові дослідження підтверджують, що емерджентні системи не лише знижують ризики атак, але й забезпечують можливість швидкої адаптації до нових загроз. Наприклад, сучасні підходи до забезпечення кібербезпеки IIoT включають регулярні оновлення програмного забезпечення, аудити безпеки та навчання персоналу для виявлення загроз [2, с. 66]. Особлива увага приділяється технологіям блокчейну, які забезпечують високий рівень безпеки завдяки використанню розподілених баз даних і криптографічних алгоритмів [10, с. 102].

Таким чином, розробка та впровадження комплексних стратегій кібербезпеки для IIoT є необхідною умовою для розвитку сучасних промислових систем. Застосування адаптивних систем, які враховують синаткхури атак і вивчають поведінку загроз у режимі реального часу, дозволяє не лише захищати інфраструктуру, але й забезпечувати її стійкість до майбутніх викликів [9, с. 85].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розглянуто існуючі дослідження у сфері безпеки промислового інтернету речей (IIoT), що демонструють важливість захисту фізичних компонентів від шкідливого програмного забезпечення. Проблема фізичної безпеки пристроїв у контексті шкідливого ПЗ залишається актуальною через постійний розвиток технологій, які інтегрують фізичні та цифрові системи. Найвідомішим прикладом є вірус Stuxnet, який завдав фізичної шкоди іранським центрифугам для збагачення урану, вивівши з ладу тисячі пристроїв за допомогою маніпуляцій програмним забезпеченням [2, с. 35]. Цей інцидент став символом того, як кібератаки можуть впливати на критичну інфраструктуру, спричиняючи фізичні руйнування [7, с. 101].

Проте, попри відомість деяких прикладів, кіберінциденти, пов'язані зі шкідливим впливом на фізичні елементи IIoT, залишаються недостатньо вивченими. Більшість існуючих досліджень зосереджуються на аналізі вразливостей програмного забезпечення та мережевих компонентів, тоді як аспекти фізичного впливу, такі як маніпуляції з датчиками, виконавчими механізмами або енергетичними системами, вивчені обмежено [4, с. 89]. У літературі також бракує конкретної інформації про реальні кейси атак на фізичні елементи IIoT, що обмежує можливості моделювання загроз і розробки ефективних стратегій захисту [6, с. 45].

Таким чином, дослідження, які стосуються кіберінцидентів із шкідливим впливом на фізичні компоненти IIoT, потребують значного розширення. Особлива увага має бути приділена збору емпіричних даних, вивченню уразливостей фізичної інфраструктури та створенню математичних моделей, що дозволяють прогнозувати можливі сценарії атак [1, с. 67]. Крім того, впровадження систем прогнозування загроз на основі глибоких нейронних мереж може забезпечити ідентифікацію та попередження шкідливого впливу на фізичні елементи ще на ранніх стадіях атаки [5, с. 112].

Постановка завдання. Основною метою дослідження є ідентифікація найбільших ризиків для фізичної інфраструктури промислового інтернету речей (IIoT) та розробка ефективних методів захисту, що враховують сучасні виклики у сфері кібербезпеки. Особливу увагу необхідно приділити аналізу загроз, пов'язаних із кіберзлочинами, які можуть впливати на критичні сегменти промислової інфраструктури, включаючи об'єкти енергетики, транспорту, виробництва та системи життєзабезпечення.

Додатковою метою є впровадження емерджентно-адаптивних систем захисту, які здатні враховувати специфіку алгоритмів атак та автоматично адаптуватися до змінюваного середовища загроз. Це особливо важливо для забезпечення стійкості критичних сегментів, що найбільше вразливі до кібератак.

Виклад основного матеріалу. Промисловий інтернет речей (IIoT) є однією з найбільш інноваційних технологій сучасності, що дозволяє інтегрувати фізичні пристрої, системи моніторингу та керування у єдину мережу. Це відкриває нові горизонти для автоматизації, підвищення продуктивності та ефективності виробництва [1, с. 45]. Проте швидке впровадження IIoT супроводжується значним зростанням ризиків у сфері кібербезпеки [2, с. 67].

Одним із найважливіших аспектів цього виклику є безпека фізичної інфраструктури, яка включає окремі компоненти, що потребують детального аналізу та оцінки загроз. Зокрема, необхідно поелементно розглянути периферійні пристрої, такі як датчики, контролери й виконавчі механізми, які можуть бути вразливими до кібератак через недостатній захист [3, с. 78]; апаратне забезпечення, включаючи обчислювальні вузли, мережеві адаптери та мікросхеми, які часто піддаються атакам через апаратні дефекти або підміну компонентів [4, с. 89]; мережеві протоколи, що забезпечують зв'язок між пристроями, але через слабкі алгоритми шифрування можуть бути уразливими до перехоплення або модифікації даних [5, с. 56]; інтернет-з'єднання, що є основою взаємодії пристроїв IIoT, але можуть стати об'єктом атак через відкриті порти, відсутність фільтрації або некоректну конфігурацію захисту [6, с. 102].

Критично важливо враховувати алгоритми атак для розробки емерджентно-адаптивних систем захисту, які зможуть не лише реагувати на вже відомі загрози, але й прогнозувати можливі сценарії атак на основі аналізу даних [8, с. 134]. Використання глибоких нейронних мереж для аналізу поведінкових патернів у пристроях IIoT дозволить створювати моделі, здатні розпізнавати шкідливу активність у реальному часі [9, с. 112]. Особливо це стосується критичних сегментів, таких як енергетичні системи або транспортна інфраструктура, де наслідки атак можуть бути катастрофічними [10, с. 91]. Інтеграція емерджентних систем із принципами кіберімунітету забезпечить не лише захист поточних операцій, але й стійкість до майбутніх загроз [1, с. 67].

Схема у вигляді стовпчастої діаграми демонструє чотири основні категорії загроз, які впливають на фізичну інфраструктуру промислового інтернету речей (IIoT). Кожна категорія представлена окремим стовпцем, висота якого відповідає процентному внеску конкретної загрози до загальної сукупності. Для покращення візуального сприйняття використовується градієнтний колір (кольорова карта Viridis), що акцентує увагу на значеннях. Над кожним стовпцем вказані точні відсоткові значення.

Категорії загроз:

1. Незахищені периферійні пристрої (30%)

Ця категорія включає датчики, контролери та виконавчі механізми, які часто підключені до мереж без належного захисту.

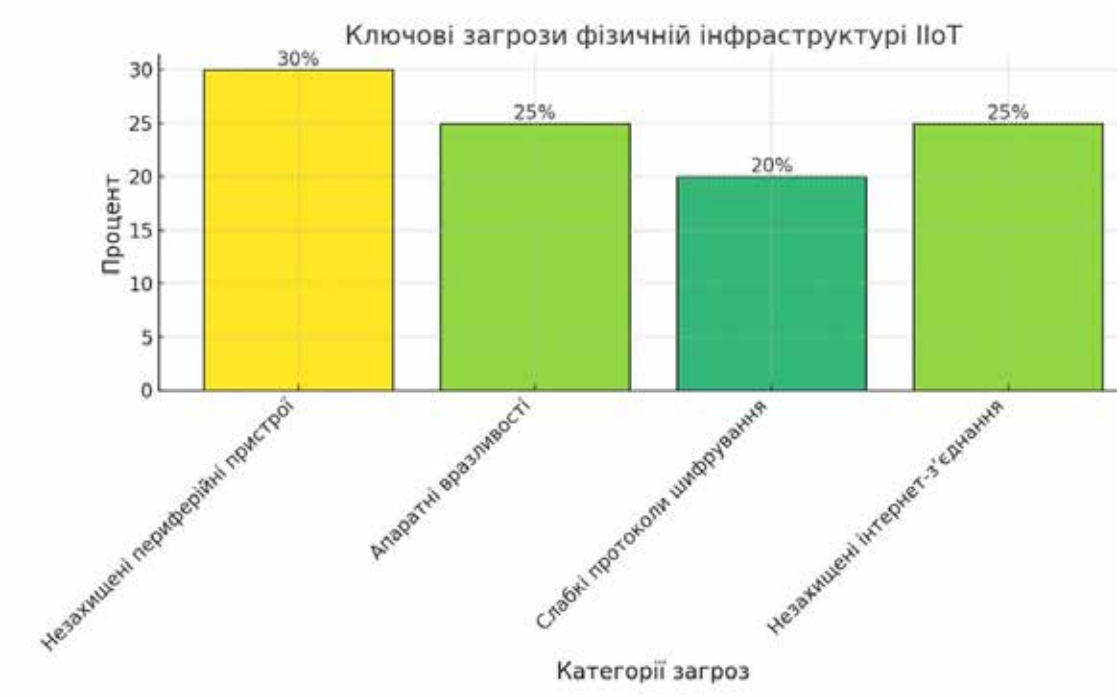


Рис. 1. Ключові загрози фізичній інфраструктурі IIoT

2. Апаратні вразливості (25%)

До цієї категорії належать дефекти апаратного забезпечення, підміна компонентів чи використання ненадійного обладнання.

3. Слабкі протоколи шифрування (20%)

Використання застарілих або слабких методів шифрування, які полегшують незаконний доступ до систем.

4. Незахищені інтернет-з'єднання (25%)

Відкриті порти або відсутність відповідного налаштування мережевої безпеки, які дозволяють зловмисникам отримувати доступ до інфраструктури.

Призначення:

Схема розроблена для наочного представлення основних загроз і їх значущості в контексті IIoT. Вона слугуватиме ефективним інструментом для аналізу ризиків та пріоритезації заходів кібербезпеки в промислових системах.

Промисловий інтернет речей (IIoT) значно підвищує ефективність виробництва, але водночас створює нові вразливості для кібератак. Реальні приклади таких атак демонструють потенційні ризики для фізичних елементів IIoT. Одним із найвідоміших інцидентів є атака вірусу **Stuxnet** у 2010 році, який був спрямований на іранські ядерні об'єкти. Stuxnet інфікував програмовані логічні контролери (PLC), що призвело до фізичного пошкодження центрифуг, використаних для збагачення урану. Цей випадок продемонстрував, як шкідливе програмне забезпечення може безпосередньо впливати на фізичні компоненти промислових систем [11, с. 45]. У 2015 році відбулася кібератака на енергетичну систему України, яка призвела до відключення електроенергії для приблизно 230 тисяч споживачів. Зловмисники використали шкідливе ПЗ **BlackEnergy** для компрометації інформаційно-керуючих систем, що дозволило їм дистанційно відключити підстанції. Цей інцидент підкреслив вразливість енергетичної інфраструктури до кібератак [12, с. 67].

У 2017 році вірус **WannaCry** вразив тисячі комп'ютерів по всьому світу, включаючи системи в промислових підприємствах. Хоча основною метою атаки було вимагання викупу, шкідливе ПЗ спричинило зупинку виробничих процесів, що призвело до значних фінансових втрат. Цей випадок показав, як атаки на інформаційні системи можуть мати непрямий вплив на фізичні елементи IIoT. У 2020 році було зафіксовано атаку на водоочисну станцію у Флориді, США. Зловмисники отримали доступ до системи управління та намагалися змінити рівень гідроксиду натрію у воді до небезпечного рівня. На щастя, оператор вчасно виявив аномалію та запобіг потенційно катастрофічним наслідкам. Цей інцидент підкреслює необхідність посилення безпеки в системах критичної інфраструктури.

Ці приклади свідчать про реальні загрози, пов'язані з кібератаками на фізичні елементи промислового інтернету речей, та підкреслюють важливість впровадження надійних заходів кібербезпеки для захисту критичних інфраструктур.

Промисловий інтернет речей (IIoT) є однією з найбільш інноваційних технологій сучасності, що дозволяє інтегрувати фізичні пристрої, системи моніторингу та керування у єдину мережу. Це відкриває нові горизонти для автоматизації, підвищення продуктивності та ефективності виробництва [1, с. 45]. Проте швидке впровадження IIoT супроводжується значним зростанням ризиків у сфері кібербезпеки [2, с. 67].

Однією з ключових проблем захисту промислового інтернету речей (IIoT) є безпека фізичної інфраструктури, яка включає різноманітні компоненти, що вимагають ретельного аналізу та оцінки ризиків. Зокрема, потребують уваги периферійні пристрої, такі як датчики, контролери й виконавчі механізми. Вони часто залишаються вразливими до кібератак через недостатній рівень захисту [3, с. 78]. Апаратне забезпечення, зокрема обчислювальні вузли, мережеві адаптери та мікросхеми, також перебуває під загрозою через можливі апаратні дефекти або підміну компонентів [4, с. 89]. Крім того, мережеві протоколи, що забезпечують зв'язок між пристроями, можуть бути скомпрометовані через використання слабких алгоритмів шифрування, що створює ризик перехоплення або модифікації даних [5, с. 56]. Не менш важливим є захист інтернет-з'єднань, які виступають основою взаємодії пристроїв IIoT. Відсутність фільтрації, некоректна конфігурація або відкриті порти значно підвищують ризик зловмисного доступу [6, с. 102]. Серед найбільших загроз для фізичної інфраструктури IIoT виділяються незахищені периферійні пристрої. Їх підключення до мереж без належного захисту створює можливості для викрадення даних або саботажу обладнання [7, с. 89]. Використання застарілого або ненадійного апаратного забезпечення також сприяє зростанню ризику атак, зокрема через апаратні дефекти або підміну компонентів [8, с. 91]. Додатково, слабкі або застарілі методи шифрування можуть стати інструментом незаконного доступу до даних або управління системами [9, с. 134]. Нарешті, відкриті порти, відсутність належного

мережевого захисту та неправильна конфігурація брандмауерів створюють загрозу проникнення в мережу IIoT [10, с. 78].

Ці аспекти вказують на критичну необхідність системного підходу до забезпечення кібербезпеки фізичної інфраструктури IIoT.

Для зменшення ризиків необхідно впроваджувати комплексні методи захисту. Важливим є забезпечення безпеки ланцюгів постачання шляхом використання апаратних і програмних компонентів тільки перевірених постачальників, що дозволить уникнути впровадження шкідливих елементів у критичну інфраструктуру [1, с. 134]. Стимулювання дослідження уразливостей, наприклад, через програми "Bug Bounty", сприятиме виявленню потенційних загроз [2, с. 112]. Розробка багаторівневих систем захисту на основі принципів кіберімунітету мінімізує ризик атак на кожному рівні архітектури OSI [3, с. 56]. Регулярне встановлення оновлень прошивок дозволяє усунути відомі вразливості [4, с. 67], а навчання персоналу основам кібербезпеки сприяє ідентифікації потенційних загроз і реагуванню на них [5, с. 89]. Проведення регулярних перевірок мереж і систем для виявлення слабких місць та їх усунення також є важливим елементом захисту [6, с. 102]. Додатково необхідно використовувати фізичні механізми захисту, такі як замки, сейфи або спеціальні корпуси, що обмежують несанкціонований доступ до обладнання [7, с. 45].

Критично важливо враховувати алгоритми атак для розробки емерджентно-адаптивних систем захисту, які зможуть не лише реагувати на вже відомі загрози, але й прогнозувати можливі сценарії атак на основі аналізу даних [8, с. 134]. Використання глибоких нейронних мереж для аналізу поведінкових патернів у пристроях IIoT дозволить створювати моделі, здатні розпізнавати шкідливу активність у реальному часі [9, с. 112]. Особливо це стосується критичних сегментів, таких як енергетичні системи або транспортна інфраструктура, де наслідки атак можуть бути катастрофічними [10, с. 91]. Інтеграція емерджентних систем із принципами кіберімунітету забезпечить не лише захист поточних операцій, але й стійкість до майбутніх загроз [1, с. 67]. Урахування алгоритмів атак є критично важливим для розробки емерджентно-адаптивних систем захисту. Ці системи повинні не лише реагувати на вже відомі загрози, але й прогнозувати можливі сценарії атак на основі аналізу даних. Використання глибоких нейронних мереж для аналізу поведінкових патернів у пристроях IIoT дозволить створювати моделі, здатні розпізнавати шкідливу активність у реальному часі [6, с. 102].

Особливо це стосується критичних сегментів, таких як енергетичні системи або транспортна інфраструктура, де наслідки атак можуть бути катастрофічними. Інтеграція емерджентних систем із принципами кіберімунітету забезпечить не лише захист поточних операцій, але й стійкість до майбутніх загроз [3, с. 134].

Враховуючи мультіелементність промислового інтернету речей, яка передбачає взаємодію великої кількості фізичних та віртуальних компонентів, необхідно впроваджувати нейромережі для управління системами на рівні архітектури OSI. Модель OSI є базовою структурою, яка охоплює всі аспекти роботи промислового інтернету речей: від фізичного рівня до рівня прикладних протоколів. Інтеграція адаптивних нейромереж у цю модель дозволить забезпечити комплек-

Таблиця 1

Методи захисту промислового IoT

Метод захисту	Опис	Очікуваний вплив
Безпека ланцюгів постачання	Використання перевірених постачальників апаратного і програмного забезпечення	Зменшення ризику впровадження шкідливих компонентів
Програми "Bug Bounty"	Стимулювання пошуку уразливостей через залучення експертів	Виявлення потенційних загроз і мінімізація вразливостей
Кіберімунітет	Розробка багаторівневого захисту пристроїв	Захист на кожному рівні архітектури OSI
Оновлення прошивок	Регулярне оновлення програмного забезпечення	Усунення вразливостей і підвищення безпеки
Навчання персоналу	Підвищення обізнаності працівників щодо кіберзагроз	Швидке реагування на потенційні загрози
Аудит безпеки	Перевірка мереж і систем для ідентифікації слабких місць	Зменшення ризику проникнення в мережу
Фізичний захист	Захист обладнання від несанкціонованого фізичного доступу	Захист обладнання від фізичного втручання

сний захист на всіх рівнях, що значно зменшить ризики, пов'язані з кібератаками.

Цей підхід відкриває новий напрямок наукових досліджень, спрямованих на створення автономних систем кіберзахисту, які будуть враховувати особливості роботи IIoT. Використання нейромереж на рівні OSI дозволить автоматично адаптуватися до нових загроз, підвищуючи стійкість систем до атак, що впливають на різні рівні їх функціонування. Таким чином, це стане ключовою передумовою для забезпечення безпеки у складних, динамічних середовищах промислового інтернету речей.

Обговорення

IIoT виступає фундаментом цифрової трансформації в сучасній індустрії, забезпечуючи інтеграцію фізичних пристроїв із мережевими технологіями для автоматизації, моніторингу та підвищення ефективності виробничих процесів. Проте швидкий розвиток IIoT супроводжується зростанням ризиків, пов'язаних із вразливістю фізичної інфраструктури до кібератак. У цьому контексті необхідно не лише ідентифікувати основні загрози, але й розробити ефективні методи їх попередження та захисту. Дослідження підтверджують, що основними загрозами для фізичної інфраструктури IIoT є незахищені периферійні пристрої, апаратні вразливості, слабкі протоколи шифрування та незахищені інтернет-з'єднання. Наприклад, кібератаки, такі як Stuxnet, WannaCry та атака на енергетичну систему України, демонструють серйозний потенціал шкідливого впливу на фізичні елементи IIoT. Ці випадки вказують на необхідність комплексного підходу до захисту, який враховує особливості багаторівневих взаємодій у межах промислових систем.

Розробка методів захисту повинна базуватися на впровадженні кіберімунітету, регулярному оновленні прошивок, аудиторських перевірках, а також освіті персоналу. Особливої уваги заслуговує інтеграція нейромереж, які здатні не лише аналізувати поведінкові патерни пристроїв у реальному часі, але й адаптуватися до нових загроз. Це дозволяє створювати системи, які автоматично прогнозують сценарії атак і забезпечують захист на рівнях архітектури OSI.

Важливим напрямом є дослідження мультиелементної природи IIoT, яка передбачає взаємодію різноманітних компонентів на всіх рівнях архітектури. Інтеграція емерджентно-адаптивних систем на рівнях OSI дозволяє розширити можливості управління безпекою та мінімізувати ризики. Такий підхід стає основою для розробки автономних систем кіберзахисту, здатних ефективно реагувати на атаки в умовах складних і динамічних середовищ.

Окремим викликом залишається захист критичних сегментів інфраструктури, таких як енергетичні системи, транспорт та медичні установи, які є потенційними цілями для кібератак. Використання багаторівневого підходу до кібербезпеки, що охоплює фізичний захист пристроїв, безпеку ланцюгів постачання та нейромережевий аналіз даних, забезпечує стійкість промислових систем до загроз та їх безпечне функціонування.

Загалом, інтеграція сучасних технологій, таких як нейромережі, в архітектуру IIoT відкриває нові можливості для створення високоефективних систем захисту. Цей напрямок вимагає подальших міждисциплінарних досліджень, спрямованих на розробку автономних, адаптивних рішень, які можуть стати стандартом у сфері кібербезпеки промислового інтернету речей.

Висновки. Промисловий інтернет речей (IIoT) став ключовим елементом цифрової трансформації сучасної індустрії, забезпечуючи інтеграцію фізичних та віртуальних компонентів для підвищення ефективності виробництва, автоматизації процесів та покращення управління ресурсами. Проте зростання мережевої взаємодії та технологічної складності IIoT супроводжується значними викликами у сфері кібербезпеки, що ставить під загрозу фізичні елементи інфраструктури. Це, своєю чергою, може спричиняти значні соціально-економічні та екологічні наслідки.

Відповідно до проведеного аналізу, основними загрозами для фізичної інфраструктури IIoT є незахищені периферійні пристрої, апаратні вразливості, слабкі протоколи шифрування та незахищені інтернет-з'єднання. Реальні кейси, такі як атака Stuxnet, зловживання BlackEnergy у 2015 році, поширення WannaCry у 2017 році та втручання у водоочисну станцію Флориди у 2020 році, підтверджують актуальність проблеми. Ці інциденти демонструють, що критичні елементи інфраструктури можуть бути об'єктом кіберзагроз із катастрофічними наслідками.

Розробка ефективних методів захисту має базуватися на впровадженні емерджентно-адаптивних систем, інтеграції принципів кіберімунітету та використанні глибоких нейромереж для аналізу даних у реальному часі. Модель OSI, яка охоплює всі рівні архітектури IIoT, є базовою основою для створення комплексних систем кіберзахисту. Їхня інтеграція з нейромережами дозволяє автоматизувати процеси виявлення та реагування на загрози,

що мінімізує ризики для фізичних елементів інфраструктури.

Окремої уваги заслуговує захист критичних сегментів, таких як енергетичні, транспортні системи та системи життєзабезпечення, які є важливими складовими національної безпеки. Використання адаптивних систем забезпечує не лише захист поточних операцій, але й стійкість до майбутніх викликів, що стає критично важливим у динамічному середовищі, де зловмисники постійно адаптують свої стратегії.

З огляду на це, посилення інформаційної безпеки держави як складної динамічної системи є стратегічним завданням. Промисловий інтернет речей, як один із ключових сегментів цієї системи, відіграє важливу роль у забезпеченні національної безпеки. Його захист має бути інтегрований у загальнодержавну стратегію кібербезпеки, що включає впровадження передових технологій, таких як блокчейн, кіберімунітет, та системи прогнозування загроз на основі аналізу великих даних.

Цей підхід сприятиме створенню стійкої до загроз екосистеми, яка забезпечить безперервність функціонування критичних інфраструктур, а також зміцнить позиції держави на глобальній арені у сфері інформаційної безпеки. Таким чином, розвиток комплексних стратегій захисту IIoT має стати важливим напрямком наукових і практичних досліджень для забезпечення надійності та безпеки в умовах нових викликів кіберпростору.

Список літератури:

1. IoT Cybersecurity Handbook: Захист Інтернету речей від загроз / Джейсон Харпер. – Elsevier, 2022. – 300 с. DOI: 10.1016/B978-0-12-823834-3.00012-6. Доступно у видавця: elsevier.com (дата звернення: 19.12.2024).

2. Кіберзлочини та інформаційні технології: Інфраструктура комп'ютерних мереж і комп'ютерна безпека, закони з кібербезпеки, Інтернет речей (IoT) і мобільні пристрої / Алекс Александру. – CRC Press, 2021. Доступно у видавця: crcpress.com (дата звернення: 19.12.2024).

3. AWS IoT із Edge ML та кібербезпекою: Практичний підхід / Сайед Рехан. – Apress, 2023. Доступно у видавця: apress.com (дата звернення: 19.12.2024).

4. Штучний інтелект для блокчейну та IoT-застосунків із підтримкою кібербезпеки / Марія Оуайсса, Закарія Булуард, Абхішек Кумар, Вандана Шарма, Кешав Каушик. – Routledge, 2024. Доступно у видавця: routledge.com (дата звернення: 19.12.2024).

5. IoT Security: Practical Threats and Solutions / Роберт Уотсон. Springer, 2023. – 385 с. DOI: 10.1007/978-3-031-10567-8. Доступно у видавця: springer.com (дата звернення: 19.12.2024).

6. Кібербезпека: Технології середовища, Інтернет речей (IoT) і вплив на Індустрію 4.0 / за ред. Гаутама Кумара, Ом Пракаша Сінгха, Хемраджа Сайні. – CRC Press, 2021. Доступно у видавця: crcpress.com (дата звернення: 19.12.2024).

7. Протидія шкідливому програмному забезпеченню для IoT / Адам Браун, Стефані Сміт. – Cambridge University Press, 2021. Доступно у видавця: cambridge.org (дата звернення: 19.12.2024).

8. Кіберрозуми: Інсайти з кібербезпеки у хмарних обчисленнях, штучному інтелекті, блокчейні та IoT для забезпечення кібербезпеки / Шира Рубінофф. Packt Publishing, 2020. Доступно у видавця: packtpub.com (дата звернення: 19.12.2024).

9. ISO/IEC 27400:2022: Кібербезпека – Керівництво із захисту та конфіденційності IoT. Міжнародна організація зі стандартизації, 2022.

DOI: 10.3403/30330146. Доступно на сайті: iso.org (дата звернення: 19.12.2024).

10. Кібербезпека IoT: Ризики, виклики та практичні рішення / Адріан МакГілл. Wiley, 2022. – 412 с. DOI: 10.1002/9781119876543. Доступно у видавця: wiley.com (дата звернення: 19.12.2024).

11. Ланґнер, P. Stuxnet: Dissecting a Cyberwarfare Weapon. / IEEE Security & Privacy. – 2011. DOI: 10.1109/MS.2011.91.

12. Кейз, Д. Analysis of the Cyber Attack on the Ukrainian Power Grid. /Electricity Information Sharing and Analysis Center (E-ISAC). – 2016. DOI: 10.1109/MS.2016.25.

Prokopovych-Tkachenko D.I., Zveriev V.P., Kozachenko I.M. CYBER THREATS AND PROTECTION METHODS FOR THE PHYSICAL INFRASTRUCTURE OF THE INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS (IIOT)

The article provides an in-depth analysis of security threats in the IoT, covering the entire spectrum of potential vulnerabilities–from the physical level of interaction with peripheral devices to the application layer, where complex attack scenarios can arise due to the lack of adequate authentication and encryption mechanisms. The authors emphasize that threats associated with malicious software are capable not only of

stealing data or disrupting network operations but also of causing dangerous malfunctions in the physical components of industrial systems, as evidenced by the Stuxnet example.

Particular attention in the article is devoted to each layer of the OSI model, analyzing how physical devices, communication channels, network and transport protocols, as well as session and application services, can be compromised. Key risks are identified, including unauthorized access to equipment at the physical layer, packet interception or modification at the network layer, and the exploitation of protocol or service vulnerabilities at higher layers. The authors stress that, without appropriate preventive measures, weaknesses at each of these levels could be exploited by attackers to conduct complex, multi-step attacks.

The study underscores the importance of a comprehensive protection strategy encompassing both technical and organizational components. Among such measures are the implementation of cyber immunity technologies capable of providing simultaneous protection at multiple levels, the deployment of effective intrusion detection systems, adherence to supply chain security principles–since vulnerabilities often enter the system during the development or delivery stages–and regular software updates coupled with active employee training to raise awareness of potential risks.

By adopting such integrated approaches to security, industrial systems can significantly mitigate the risks associated with cyberattacks and ensure the resilience of operational processes. The recommendations and methods for preventing attacks presented in the article can be valuable to a wide range of enterprises aiming to protect both their data and the physical components of production systems, thereby ensuring the continuity and reliability of critical infrastructure operations.

Key words: *IIoT, malware, cyberattacks, cybersecurity, physical infrastructure, cyber-immunity.*

UDC 004.4`2
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/33

Semeniuk V.V.
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

OPTIMIZATION OF LOCAL DEVELOPMENT PROCESS USING DOCKER PHP IMAGE THAT COMES WITH A FULL SET OF TOOLS OUT OF THE BOX: DATABASE AND INTERNATIONALIZATION EXTENSIONS

The article examines the integration of critical PHP extensions within the Docker PHP 7.1 image, highlighting their role in creating a cohesive and efficient development environment. MySQLi, with its support for both procedural and object-oriented programming, enables seamless database interactions while incorporating secure connections and debugging capabilities. It proves essential for managing relational data structures and performing complex database operations. Similarly, PDO enhances flexibility by standardizing interactions across different database systems, facilitating smooth transitions between platforms. Its prepared statement mechanism safeguards against SQL injection, and its abstraction layer supports scalability without compromising functionality. SOAP is explored as a bridge for XML-based communication, enabling integration of external APIs and transforming PHP applications into web services capable of managing diverse data types and complex message structures. The extension's role as an intermediary in synchronized data exchange between independent systems is emphasized. Aerospike is presented as a robust solution for NoSQL database management, excelling in scenarios requiring low-latency processing of large-scale data. Its distributed architecture ensures data redundancy and fault tolerance, supported by advanced replication techniques that optimize performance under high loads. Intl facilitates locale-sensitive operations, automating the formatting of dates, numbers, and messages. It simplifies the development of multilingual applications by removing manual localization complexities and enhancing the user experience through dynamic and culturally relevant data presentation. The Docker PHP 7.1 image unifies these extensions into a pre-configured containerized system, enabling developers to replicate production-like environments locally with consistent behavior across development, testing, and deployment phases. This integration eliminates dependency conflicts, leveraging Docker's volume mapping and networking features to seamlessly connect database containers with the PHP container. As a result, real-time database queries, SOAP interactions, and data formatting are efficiently managed within a streamlined workflow. This setup accelerates iterative cycles, reduces context switching, and ensures an optimized development process for scalable and globally accessible applications.

Key words: *containerization, localization, scalability, interoperability, optimization, adaptability.*

Formulation of the problem. The local development process is a critical phase in software creation, allowing developers to design, test, and iterate applications before deployment. However, common challenges include mismatched environments between development and production, manual dependency configurations, and difficulties integrating essential tools. These issues lead to inefficiencies, increased error rates, and delays in the development cycle.

Optimizing the local development process has become a necessity, particularly in environments requiring rapid iteration and high reliability. The adoption of containerized solutions like Docker offers a promising approach to addressing these challenges. A PHP Docker image equipped with a comprehensive set of tools, including database and internationalization extensions, significantly simplifies local development. By consolidating critical components such as MySQLi, PDO, SOAP, and Intl extensions into a pre-configured container, developers gain instant access to a stable and scalable environment that mirrors production settings.

This approach addresses the difficulties of manual configuration, ensuring seamless database connectivity, secure handling of structured and unstructured data, and culturally relevant localization. Additionally, incorporating advanced debugging tools and pre-configured libraries facilitates a smoother and more efficient development workflow. By locally replicating production-like conditions, developers can focus on building robust and scalable applications, ensuring consistency across all stages of the development lifecycle.

Analysis of recent research and publications. The article introduces a web-based Docker Image Assistant Generation (DIAG) tool designed to optimize the creation of Docker images in the User-PC Computing (UPC) system. Based on a master-worker model, the UPC system utilizes Docker technology to encapsulate application environments into container images. DIAG addresses manual Docker image creation inefficiencies by integrating Angular for dynamic user interfaces, Laravel for server-side logic and data processing through RestAPI, MySQL for structured data storage, and Shell scripts for automating image creation and upload processes.

A key feature of the tool is its ability to modify working code. This capability enables users to alter source code during tasks and update the Docker image directly on worker nodes, reducing transmission loads and enhancing system efficiency. The tool's implementation employs the MVC design pattern, ensuring problem separation while promoting scalability and maintainability. Evaluations included generating Docker images from reverse-engineered Dockerfiles sourced from GitHub, modifying source code for network modelling, and conducting performance tests to assess the tool's task execution across various environments.

The results validated the tool's ability to create and efficiently manage Docker images while supporting real-time updates, emphasizing its value in improving productivity and usability for users with varying experience levels. Future work aims to expand the tool's capabilities and further integrate it into the UPC system for broader applications and enhanced productivity.

In [2], a methodology for installing PHP extensions in Docker images without using PECL, which has been disabled by default since PHP 7.4, is presented. It provides detailed instructions for manually installing extensions like APCu, Redis, Igbinary, and MongoDB using Docker commands and scripts. By leveraging tools like docker-php-ext-configure and docker-php-ext-install, developers can create simplified, modular Dockerfiles tailored to the unique needs of their projects.

The study highlights common challenges associated with manual extension installation, particularly for extensions like MongoDB, which require submodules and multi-stage builds. Practical examples demonstrate how to create a reliable and efficient Docker environment for PHP development, focusing on adaptability, performance, and modular design.

Additionally, notable contributions from scholars such as J. Huang, J. Zhang, J. Liu, C. Li, R. Dai [4], L. Moroz [5], S. Neef, L. Kleissner [6], T. Sanoop [8], J. Watkins [11], J. Zhao, Y. Lu, K. Zhu, Z. Chen, H. Huang [12], M. Laaziri, K. Benmoussa, S. Khoulji, L. Kerkeb [13] and others are acknowledged.

Despite the above-mentioned documentation, the question of optimizing the local development process using the Docker PHP image remains underexplored and requires further study.

Task statement. The aims of this work are to integrate PHP extensions for database management and internationalization within the context of web application development using a Docker image.

Outline of the main material of the study. The MySQLi (MySQL Improved) extension is a key component of the Docker image, designed to facilitate connections to MySQL databases. This extension supports both procedural and object-oriented programming, offering a flexible interface for developers with built-in support for secure connections and debugging capabilities.

MySQLi's adaptability makes it a critical component for managing relational data structures and performing complex database operations. For instance, developers can establish a connection to a database server by providing the hostname, correct username, password, and desired database name. Once connected, structured queries can be executed to retrieve data from the database. Retrieved data can then be iterated over, with each row of the result set processed and displayed to the end user. Upon completing these operations, the database connection is closed. Similarly, in the object-oriented paradigm, the MySQLi class performs the same functions but provides a more intuitive interface through class methods and properties. This approach simplifies error handling by incorporating built-in error reporting mechanisms.

The PDO (PHP Data Objects) extension for MySQL and PostgreSQL offers a convenient method for accessing databases. The flexibility of PDO lies in its ability to standardize interactions with various databases, allowing developers to maintain a single code structure while seamlessly transitioning between different database platforms. For instance, PDO creates a uniform interface that eliminates the need to rewrite large portions of code when switching from one relational database to another. By utilizing prepared statements, PDO enhances security by preventing SQL injection attacks. Furthermore, its error-handling capabilities directly support debugging by providing detailed exception messages that pinpoint the source of problems. PDO's abstraction layer promotes scalability, enabling applications to adapt to varying database requirements without compromising performance or functionality.

SOAP simplifies interactions in web services by implementing client-server communication. This tool acts as an indispensable link in integrating external APIs or presenting PHP applications as web services, supporting a wide range of data types and complex message structures. SOAP enables data communication between different systems, essential in environments where multiple services or applications operate independently but require synchronized data exchange. For example, when a SOAP client sends a request to a remote service, the service interprets the request, processes the necessary data, and responds in a structured format.

Aerospike offers flexible support for NoSQL databases to handle large-scale data processing with minimal latency. This extension facilitates seamless connections and operations within PHP applications. Its high throughput and low response times make it ideal for applications requiring real-time data processing, such as financial transactions and user analytics. By employing a distributed architecture, Aerospike effectively ensures data persistence and high availability, particularly under increased workloads and high traffic. This architecture distributes data across multiple nodes, ensuring redundancy and fault tolerance. When a client application interacts with an Aerospike database, the extension efficiently manages data retrieval and storage across nodes, minimizing latency.

Additionally, Aerospike utilizes advanced data replication techniques, synchronous and asynchronous. In synchronous replication, every write operation is immediately propagated to all nodes, ensuring that data remains consistently available in real time. Conversely, asynchronous replication introduces slight delays in data propagation, which can be advantageous in scenarios demanding high throughput and minimal latency. Aerospike also employs quorum-based techniques to determine the minimum number of nodes required to acknowledge a write operation before it is deemed successful. This database is particularly effective for applications demanding fast read-and-write operations, such as in financial services and e-commerce.

The Intl extension provides tools for locale-sensitive operations, automating the formatting of dates, numbers, and messages. Simplifying the development of applications eases the management of multilingual content and removes the challenges of manual localization. For instance, when date values or currency need to be represented for users in different regions, the extension automatically adapts the format based on locale, ensuring an intuitive display of data to users. Additionally, its message translation functionality allows developers to implement dynamic, content-aware translations, improving the overall user experience.

By leveraging the Docker PHP 7.1 image, they described database and internationalization-oriented extensions are consolidated into a unified development experience. This integration highlights the synergy between these components and the Docker environment, optimizing the local development process and improving application design.

The combination of MySQLi and PDO within the Docker PHP image provides flexible support for database connectivity and query execution. The synergy between MySQLi's efficient connection handling for MySQL databases and PDO's standardized interface for multiple database systems allows developers to perform database-oriented operations with minimal configuration and maximum flexibility. For example, the procedural and object-oriented styles inherent to MySQLi, combined with PDO methods in a single environment, enable developers to test and compare approaches.

In Docker, the pre-configured environment ensures that both extensions have access to the same database instance (table 1).

This combined approach ensures that database operations can be performed and debugged in a unified environment, reducing the risk of configuration mismatches.

The SOAP extension, which facilitates XML-based communication, and Aerospike, which provides scalability for unstructured data, complement each other within the Docker image. These extensions enable the creation of hybrid applications capable of handling both structured and unstructured data streams. When a web service sends XML data, the response can be parsed into an Aerospike database, allowing the development environment to smoothly transition between managing real-time service interactions and high-performance data retrieval tasks (table 2).

The Intl extension, essential for applications targeting multilingual and multi-regional audiences, integrates seamlessly within the Docker image to format data based on specific locales, significantly enhancing accessibility. When used in tandem with SOAP services, Intl provides developers with tools to dynamically display culturally relevant information. For example, currency data obtained from a database or web service can be formatted for different regions without requiring manual adjustments.

The Docker PHP image provides a containerized environment where all described extensions function

Table 1

Example of MySQLi and PDO Integration in Docker PHP for Database Operations

```
$connection = new mysqli («db», «user», «password», «database»);
if ($connection->connect_error) {
die («Connection failed:». $connection->connect_error);
}
$pdo = new PDO («mysql: host=db; dbname=database», «user», «password»);
$stmt = $pdo->prepare («SELECT · FROM users»);
$stmt->execute();
while ($row = $stmt->fetch (PDO:: FETCH_ASSOC)) {
echo $row['name'] . "<br>»;
}
$connection->close();
```

Note: author's development

Table 2

Integration of SOAP, Aerospike, and Intl Extensions in Docker PHP for Hybrid Application Development

```
$client = new SoapClient («http: // example. com / api? wsdl»)
$response = $client->getData()
$config = [«hosts» => [[«addr» => «127.0.0.1», «port» => 3000]]]
$aerospike = new Aerospike($config)
$key = $aerospike->initKey («test», «services», 1)
$aerospike->put($key, [«response» => $response])
$aerospike->close()
```

Note: author's development

Table 3

Example of Dockerfile for Configuring a PHP Image with mysqli, pdo_mysql, soap, and intl Extensions

```
FROM php: 7.1-fpm
RUN docker-php-ext-install mysqli pdo_mysql soap intl
```

Note: author's development

cohesively. Developers can replicate production-like configurations on their local machines, ensuring consistent behaviour across all stages of application deployment. The pre-configured Docker image eliminates potential compatibility conflicts. By leveraging Docker's volume mapping and networking capabilities, database containers can be seamlessly connected to the PHP container, ensuring direct access to required resources. This configuration simplifies testing real-time database queries, SOAP interactions, and data formatting while offering an integrated development workflow that reduces context switching and accelerates iterative cycles (table 3).

This configuration ensures immediate availability of all extensions after the container is built, allowing developers to focus on application development and testing without managing underlying dependencies.

Conclusions. The analyzed extensions integrated into the Docker PHP 7.1 image demonstrate a cohesive ecosystem designed to provide an efficient, secure, and flexible environment for application development. MySQLi and PDO support a wide range of database operations, allowing developers to combine procedural and object-oriented approaches with enhanced flexibility and minimal configuration.

SOAP offers seamless XML-based communication, while Aerospike ensures low-latency operations for unstructured data. The Intl extension simplifies localization by automating the formatting of dates, numbers, and messages, improving accessibility for users in multilingual and multicultural contexts.

The Docker environment consolidates these extensions into a pre-configured containerized system, ensuring compatibility and consistent behaviour across the development, testing, and deployment phases. By utilizing Docker's volume mapping and networking capabilities, developers can efficiently connect database containers to the PHP container, facilitating real-time database queries, SOAP interactions, and data formatting within an integrated workflow.

This streamlined setup eliminates potential dependency mismatches, enabling developers to focus on application development and testing without worrying about underlying configurations. The result is a unified, productive development environment optimized for modern, scalable, and globally accessible applications.

Bibliography:

1. Htet Aung L., Funabiki N., Aung S., Zhou X., Xiang X., Kao W. – C. A web-based Docker image assistant generation tool for user-PC computing system. *Information*. 2023. Vol. 14. P. 300. DOI: 10.3390 / info14060300.
2. Laviale O. Installing PHP extensions from source in your Dockerfile. *Olvlvl*: website. 2019. URL: https:// olvlvl.com/2019–06-install-php-ext-source.html (last accessed: 16.01.2025).
3. Semeniuk V. Automated build for docker-php image. *Docker Hub*: website. 2025. URL: https://hub.docker. com/r/vadymsemeniuk/docker-php (last accessed: 16.01.2025).
4. Huang J., Zhang J., Liu J., Li C., Dai R. UFuzzer: lightweight detection of PHP-based unrestricted file upload vulnerabilities via static-fuzzing co-analysis. *24th International Symposium on Research in Attacks, Intrusions and Defenses*. *Association for Computing Machinery*. New York, NY, USA, 2021. P. 78–90. DOI: 10.1145 / 3471621.3471859.
5. Moroz L. bWAPP latest modified for PHP7. *GitHub*: website. 2018. URL: https://github.com/lmoroz/ bWAPP (last accessed: 16.01.2025).
6. Neef S., Kleissner L. PHUZZ: a grey-box fuzzer for PHP web applications. *GitHub*: website. 2024. URL: https://github.com/gehaxelt/phuzz (last accessed: 16.01.2025).
7. Q-Success. Usage statistics and market share of PHP for websites. *W3techs*: website. 2023. URL: https:// w3techs.com/technologies/details/pl-php (last accessed: 16.01.2025).
8. Sanoop T. XVWA is a badly coded web application written in PHP / MySQL that helps security enthusiasts to learn application security. *GitHub*: website. 2015. URL: https://github.com/s4n7h0/xvwa (last accessed: 16.01.2025).
9. The PHP Group. PHP: register_shutdown_function – Manual. *Php. net*: website. 2023. URL: https://www. php.net/manual/en/function.register-shutdown-function.php (last accessed: 16.01.2025).
10. The PHP Group. PHP: uopz – Manual. *Php. net*: website. 2023. URL: https://www.php.net/manual/en/ book.uopz.php (last accessed: 16.01.2025).
11. Watkins J. PCOV – CodeCoverage compatible driver for PHP. *GitHub*: website. 2023. URL: https://github. com/krakjoe/pcov (last accessed: 16.01.2025).
12. Zhao J., Lu Y., Zhu K., Chen Z., Huang H. Cefuzz: a directed fuzzing framework for PHP RCE vulnerability. *Electronics*. 2022. Vol. 11. No. 5. P. 758. DOI: 10.3390/electronics11050758.
13. Laaziri M., Benmoussa K., Khoulji S., Kerkeb L. A comparative study of PHP frameworks performance. *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 32. P. 864–871. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.295.

Семенюк В.В. ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ЛОКАЛЬНОЇ РОЗРОБКИ ЗА ДОПОМОГОЮ ОБРАЗУ ДОКЕРА PHP, ЯКИЙ ПОСТАВЛЯЄТЬСЯ З ПОВНИМ НАБОРОМ ІНСТРУМЕНТІВ ІЗ КОРОБКИ: РОЗШИРЕННЯ БАЗ ДАНИХ ТА ІНТЕРНАЦІОНАЛІЗАЦІЇ

У роботі розглядається інтеграція критичних розширень PHP в образ Docker PHP 7.1, підкреслюється їхня роль у створенні згуртованого та ефективного середовища розробки. MySQLi, завдяки підтримці як процедурного, так і об'єктно-орієнтованого програмування, забезпечує безперебійну взаємодію з базою даних, одночасно включаючи безпечні з'єднання та можливості налагодження. Це виявляється необхідним для керування реляційними структурами даних і виконання складних операцій з базами даних. Так само PDO підвищує гнучкість шляхом стандартизації взаємодії між різними системами баз даних, сприяючи плавним переходам між платформами. SOAP розглядається як міст для зв'язку на основі XML, що дозволяє інтегрувати зовнішні API і перетворювати додатки PHP у веб-сервіси, здатні керувати різними типами даних і складними структурами повідомлень. Підкреслюється роль розширення як посередника в синхронізованому обміні даними між незалежними системами. Aerospike представлено як надійне рішення для керування базами даних NoSQL, яке відмінно підходить у сценаріях, що вимагають низької затримки обробки великомасштабних даних. Його розподілена архітектура забезпечує надлишковість даних і відмовостійкість, що підтримується розширеними методами реплікації, які оптимізують продуктивність за високих навантажень. Intl полегшує операції, що залежать від локалі, автоматизуючи форматування дат, чисел і повідомлень. Це спрощує розробку багатомовних програм, усуваючи складнощі ручної локалізації та покращуючи взаємодію з користувачем завдяки динамічному та культурно релевантному представленню даних. Образ Docker PHP 7.1 об'єднує ці розширення в попередньо налаштовану контейнерну систему, що дозволяє розробникам локально копіювати середовища, схожі на робочі, із узгодженою поведінкою на етапах розробки, тестування та розгортання. Ця інтеграція усуває конфлікти залежностей, використовуючи відображення томів і мережеві функції Docker для безпроблемного з'єднання контейнерів бази даних із контейнером PHP. У результаті запити до

бази даних у режимі реального часу, взаємодії SOAP і форматування даних ефективно керуються в рамках спрощеного робочого процесу. Це налаштування прискорює ітераційні цикли, зменшує перемикання контексту та забезпечує оптимізований процес розробки для масштабованих і глобально доступних програм.

Ключові слова: *контейнерізація, локалізація, масштабованість, сумісність, оптимізація, адаптивність.*

УДК 519.1:519.7:007.5
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/34

Стьопкін А.В.
ДВНЗ «Донбаський державний педагогічний університет»

РОЗПІЗНАВАННЯ ПРОСТИХ ГРАФІВ КОЛЕКТИВОМ АГЕНТІВ

В роботі досліджується проблема розпізнавання скінчених зв'язних неорієнтованих графів без петель та кратних ребер колективом агентів. Метою роботи є побудова нового ефективного алгоритму розпізнавання графів колективом агентів. В статті запропоновано наступну методологію до досягнення поставленої мети: використати колектив агентів, що складається з двох агентів двох різних типів. Перший тип – це агент-дослідник, який може рухатись по графу, обмінюючись повідомленнями з другим агентом, а також може зчитувати та змінювати мітки на елементах графа. Другий тип агентів – це агент-експериментатор – нерухомий агент, що знаходиться поза межами досліджуваного графу, в пам'яті якого на кожному кроці фіксується результат функціонування агента-дослідника. На основі отриманої інформації в пам'яті агента-експериментатора поступово вибудовується представлення досліджуваного графа списком ребер і списком вершин. Агенти маю скінчену на кожному кроці, але необмежено зростаючу внутрішню пам'ять. В роботі детально розглянуто режими функціонування агента-дослідника із зазначенням пріоритетності активації цих режимів в процесі дослідження графа. Також розглянуто алгоритм функціонування агента-експериментатора з детальним описом процедури обробки отриманих повідомлень, за допомогою яких і відбувається розпізнавання досліджуваного графа. Також в роботі проаналізовано часову, ємнісну, комунікаційну складності побудованого алгоритму та кількість переходів по ребрах, які необхідно виконати агенту-досліднику для повного розпізнавання досліджуваного графа. Науковою новизною є отримання ефективного методу та алгоритму розпізнавання скінчених неорієнтованих графів без петель та кратних ребер, який дозволяє використовувати для розпізнавання лише одну фарбу та дає можливість в подальшому масштабувати розглянутий колектив до k агентів. Таким чином, в роботі запропоновано новий метод та алгоритм розпізнавання графів, який має квадратичні (від числа вершин досліджуваного графа) часову та ємнісну складності, комунікаційна складність алгоритму оцінюється зверху як $O\left(n^2 \times \log(n)\right)$, де n – кількість вершин досліджуваного графа. Кількість переходів по ребрах, які необхідно виконати агенту-досліднику для повного розпізнавання досліджуваного графа оцінюється зверху як $O\left(n^2\right)$. Робота запропонованого алгоритму розпізнавання ґрунтується на методі обходу графа в глибину.

Ключові слова: *розпізнавання графів, неорієнтовані графи складність алгоритму, обхід в глибину, колектив агентів.*

Постановка проблеми. В наш час однією з важливих проблем комп'ютерних наук, вирішенню якої приділяється особлива увага є проблема взаємодії керуючої та керованої систем. Прикладом такої взаємодії є взаємодія керуючого автомата, його агента та операційного середовища даного агента. Наприклад, в роботах [1,2] взаємодія таких систем представлена як процес переміщення агентів по графу. Зрозуміло, що якщо відсутня повна модель операційного середовища, то є неможливим цілеспрямований рух по ній мобільних агентів. В питанні моделювання операційного середовища, визначено ряд підходів, одним з яких є топологічний [3]. При такому підході агенту, що рухається графом, доступна тільки інформація щодо зв'язків між різноманітними областями середовища та недоступна метрична інформація про дане середовище. Тобто топологічна модель представляє собою граф з відміченими вершинами, ребрами та інциденторами.

Серед задач по дослідженню середовищ прийнято виділяти три основні задачі: задача самолокалізації агента; задача контролю відповідності моделі середовища самому середовищу; задача побудови мапи середовища. Вирішенню задачі побудови мапи середовища мобільними агентами присвячено досить велику кількість робіт [4-8]. Відомий ряд алгоритмів розпізнавання з використанням різних інструментів мобільних агентів, різноманітних колективів агентів чи робота агентів за наявною апріорною інформацією про досліджуваний граф, тощо. Дана робота присвячена створенню нового ефективного методу та побудові відповідного алгоритму розпізнавання скінчених неорієнтованих простих графів за допомогою колективу агентів, а також дослідженню часової, ємнісної й комунікаційної складностей

побудованого алгоритму та кількості переходів по ребрах, які виконують агенти-дослідники для повного розпізнавання досліджуваного графа.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Задача розпізнавання невідомих середовищ залишається актуальною і в наш час, про що свідчать сучасні дослідження в цьому напрямку [2,9]. Але в наш час більш детально вивчається робота різноманітних мультиагентних систем [10-15] над розпізнаванням невідомого середовища та вивчаються проблеми, які виникають при роботі таких систем. В залежності від поставлених цілей, проблеми керування мультиагентними системами можна умовно розділити на такі види: проблема керування мультиагентною системою [16], проблема формування мультиагентної системи [17] та проблема консенсусу мультиагентної системи [18].

Постановка завдання. Якщо проаналізувати останні дослідження, то можна виявити, що в них замало уваги приділяється дослідженню процесу обміну інформацією між агентами. Це робить актуальним проведення експериментів по розпізнаванню графів колективом агентів, а також завдання, спрямовані на оптимізацію витрат ресурсів, часу, та навантаження на канал зв'язку між агентами.

Таким чином, метою нашого дослідження є створення ефективного алгоритму розпізнавання скінчених зв'язних простих неорієнтованих графів колективом агентів, ефективність якого або перевищить раніше розроблені алгоритми, або зменшить кількість використовуваних в них ресурсів [2,8,10,11]. Тобто дослідження часової, ємнісної й комунікаційної складностей побудованого алгоритму та кількості переходів по ребрах, які необхідно виконати агенту-досліднику для розпізнавання графа також є важливою частиною нашого дослідження.

Виклад основного матеріалу.

В роботі розглядаються зв'язні неорієнтовані прості скінчені графи $G=(V,E)$, де V – множина вершин графа, а E – множина ребер (двоелементних підмножин (u,v), де $u,v\in V$) графа. Трійки $((u,v),v)$ називатимемо інциденторами (точкою з'єднання) ребра (u,v) та вершини v. Через I позначимо множину всіх інциденторів графа. Множину $L=V\cup E\cup I$ назвемо множиною всіх елементів графа G. Сюр'єктивне відображення $\mu: L\to\{w,b\}$, де w – білий колір, а b – чорний, назвемо функцією розфарбування графа G. Пару (G,μ) будемо називати розфарбованим графом. Послідовність $u_1,u_2,...,u_k$ попарно суміжних вершин графа G назвемо шляхом довжини k. Околом $Q(v)$ вершини v будемо називати множину елементів графа, яка складається з вершини v, всіх вершин u, суміжних з v, всіх ребер (v,u) та всіх інциденторів $((v,u),v)$ та $((v,u),u)$. Потужності множини вершин V та множини ребер E позначимо через n та m відповідно. Зрозуміло, що $m\le\frac{n(n-1)}{2}$. Ізоморфізмом графа G та графа H назвемо таку бієкцію $\phi: V_G\to V_H$, що $(v,u)\in E_G$ тоді й тільки тоді, коли $(\phi(v),\phi(u))\in E_H$.

Агент-дослідник характеризується наступними властивостями. Він може рухатися по графу з вершини v у вершину u по ребру (v,u), що з'єднує ці вершини. При цьому він може фарбувати вершини, ребра та інциденторі, через які здійснив перехід. Коли агент-дослідник знаходиться у вершині v, він сприймає мітки всіх елементів околу $Q(v)$ і на основі цієї інформації визначає в якому режимі буде далі працювати. Агент-дослідник має скінчену на кожному кроці та необмежено зростаючу внутрішню пам'ять, яка залежить від розмірності досліджуваного графа.

Агент-експериментатор характеризується наступними властивостями. Це нерухомий агент, що знаходиться за межами графа. Він приймає та ідентифікує повідомлення від агента-дослідника й на основі цих повідомлень будує представлення досліджуваного графа в своїй пам'яті у вигляді списків ребер та списків вершин. Агент-експериментатор має скінчену на кожному кроці та необмежено зростаючу внутрішню пам'ять, яка залежить від розмірності досліджуваного графа.

Стратегія роботи агента-дослідника полягає в наступному: агент-дослідник рухається вглибину, поки це можливо, після чого повертається назад по своєму шляху в пошуках ще не відвіданих вершин та ребер, якщо він знаходить такі вершини, то знову починає рух вглибину і так відбувається поки агент не повернеться в стартову вершину, в околі якої вже не буде нерозпізнаних вершин та ребер. Після цього агент-дослідник закінчує роботу.

Таким чином, в процесі роботи агент-дослідник будує неявне дерево пошуку вглибину та відносно цього дерева всі ребра поділяються на деревні, тобто такі, що належать побудованому дереву та зворотні, які не належать дереву.

Розберемо більш детально алгоритми роботи агентів. Вся процедура розпізнавання графа складається з двох принципово різних типів алгоритмів: алгоритму обходу досліджуваного графа та обчислювального алгоритму побудови представлення графа у вигляді списків ребер та вершин. Зазначимо, що спільна робота цих алгоритмів

відбувається в наступній послідовності: агент-дослідник виконує крок та відправляє повідомлення агенту-експериментатору, після чого агент-експериментатор оброблює повідомлення, агент-дослідник робить крок і т.д.

До початку роботи агентів всі елементи графа білого кольору. Під час роботи по розпізнаванню графа, його елементи можуть бути пофарбовані мобільним агентом в чорний колір. Для підвищення зручності читання алгоритму, при описі дій, які виконуються агентом-дослідником ми будемо зазначати в дужках повідомлення, які він відправляє агенту-експериментатору у форматі «Message_A».

На початку роботи алгоритму розпізнавання графа, агент-дослідник розміщується в довільній вершині досліджуваного графа та фарбує її в чорний колір, а агент-експериментатор одразу додає першу вершину в список вершин у своїй пам'яті. Далі агент-дослідник рухається по білим вершинам, фарбуючи ці вершини, ребра та дальні інцидентори в чорний колір та покроково відправляючи агенту-експериментатору повідомлення «Forward_A», на основі яких він додає ці вершини і ребра до множин V і E відповідно.

Якщо під час руху вперед агент-дослідник зустрів зворотне ребро (біле ребро з білими ближнім та дальнім інциденторами, яке веде в чорну вершину), то агент-дослідник покроково фарбує в чорний колір ближні інцидентори всіх зворотних ребер, інцидентних поточній вершині, при цьому відправляє агенту-експериментатору повідомлення «Marked_IE», завдяки якому агент-експериментатор буде вести підрахунок помічених зворотних ребер. Завершивши фарбування інциденторів, агент-дослідник починає рух назад по своєму шляху, покроково відправляючи агенту-експериментатору повідомлення «Back_BE» завдяки якому агент-експериментатор буде вести підрахунок зроблених агентом-дослідником кроків назад. Такий рух назад продовжується до виявлення агентом-дослідником вершини інцидентної поміченому та ще не розпізнаному зворотному ребру (біле ребро, що веде в чорну вершину з чорним дальнім інцидентором). Коли таке ребро буде виявлено, агент-дослідник запитує в агента-експериментатора кількість помічених для розпізнавання зворотних ребер, і якщо вона більше одного, то агент-дослідник здійснює перехід по цьому ребру, фарбуючи ближній інцидентор в чорний колір та відправляє агенту-експериментатору повідомлення «Forward_BE», завдяки якому агент-експериментатор додасть в список ребер у своїй пам'яті це зворотне ребро, а лічильник помічених зворотних ребер зменшить на одиницю. На наступному кроці агент-дослідник повертається назад по пройденому на попередньому кроці ребру, фарбуючи його в чорний колір і продовжує рух назад в пошуках нерозпізнаних зворотних ребер. В момент, коли буде виявлено останнє помічене для розпізнавання зворотне ребро (лічильник кількості помічених для розпізнавання зворотних ребер дорівнює одиниці) агент-дослідник здійснить перехід по цьому ребру, фарбуючи ближній інцидентор та ребро в чорний колір та відправить агенту-експериментатору повідомлення «Forward_BE». Після чого відправляє агенту-експериментатору повідомлення «Recognized_BE», завдяки якому агент-експериментатор обнуляє лічильник зроблених назад кроків і завершує роботу по розпізнаванню зворотних ребер. Слід зауважити, що лічильник помічених для розпізнавання зворотних ребер в цей момент вже дорівнює нулю, внаслідок його поступового зменшення при розпізнаванні зворотних ребер.

Після закінчення роботи з розпізнавання зворотних ребер агент-дослідник продовжує рух вперед по білим вершинам. У випадку коли при русі вперед агент-дослідник потрапляє у вершину, в околі якої відсутні зворотні ребра та нерозпізнані вершини, він починає рух назад по своєму шляху в пошуках нерозпізнаних вершин, фарбуючи при цьому в чорний колір дальні інцидентори ребер. На кожному кроці при цьому агенту-експериментатору відправляється повідомлення «Back_A». При знаходженні нерозпізнаних вершин, агент-дослідник знову починає рух вперед для розпізнавання невідвіданих вершин та ребер. Якщо ж при русі назад, агент-дослідник потрапляє в стартову вершину, а в її околі відсутні нерозпізнані вершини, то це означає, що весь граф розпізнано і агент-дослідник завершує свою роботу, відправивши агенту-експериментатору повідомлення «Stop». В цей момент в пам'яті агента експериментатора вже сформовано представлення досліджуваного графа у вигляді списку ребер та вершин.

Алгоритм роботи агента-дослідника:

1. $\mu(v) := b$;
2. *if* $\exists(v,u) \in Q(v) \mid (\mu(v,u) = w) and (\mu(u) = = \mu(v) = b)$ *then do*
3. *EXPL_IE*(v);
4. *else if* $\exists(v,u) \in Q(v) \mid (\mu(v,u) = w) and (\mu(u) = w)$ *then do*
5. *FORWARD*(v);

6. *go to* 2;
7. *end do*;
8. *else if* $\exists(v,u)\in Q(v)\,|\,(\mu((v,u),v)=b)and(\mu((v,u),u)=w)$ *then do*
9. *BACK*(*v*);
10. *go to* 3;
11. *end do*;
12. *else STOP*(*v*);

EXPL_IE(*v*):

1. *while* $\exists(v,u)\in Q(v)\,|\,(\mu(v,u)=w)and(\mu(v)=\mu(u)=b)$ *do*
2. агент обирає $(v,u)\in Q(v)\,|\,(\mu(v,u)=w)and(\mu(v)=\mu(u)=b)$ та фарбує $(\mu((v,u),v)):=b$;
3. агент записує в список *LM* повідомлення: Marked_IE;
4. *end do*;
5. *if* $\exists(v,u)\in Q(v)\,|\,(\mu((v,u),v)=b)and(\mu(v,u)=b)and(\mu((v,u),u)=w)$ *do*
6. агент обирає $(v,u)\in Q(v)\,|\,(\mu((v,u),v)=r)and(\mu(v,u)=r)and(\mu((v,u),u)=w)$ та переходить по ньому в вершину u;
7. $v:=u$;
8. агент записує в список *LM* повідомлення: Back_BE;
9. *end do*;
10. *if* $\exists(v,u)\in Q(v)\,|\,(\mu((v,u),v)=w)and(\mu(v,u)=w)and(\mu((v,u),u)=b)$ *then do*
11. запит *NBE*;
12. *if* $NBE>1$ *then do*
13. агент обирає $(v,u)\in Q(v)\,|\,(\mu((v,u),v)=w)and(\mu(v,u)=w)and(\mu((v,u),u)=b)$ та переходить по ньому в вершину u, фарбуючи $(\mu((v,u),v):=b)$;
14. $v:=u$;
15. агент записує в список *LM* повідомлення: Forward_BE;
16. агент обирає $(v,u)\in Q(v)\,|\,(\mu((v,u),v)=b)and(\mu(v,u)=w)and(\mu((v,u),u)=b)$ та переходить по ньому в вершину u, фарбуючи $(\mu(v,u):=b)$;
17. *go to 5* даної процедури;
18. *end do*;
19. *else do*
20. агент обирає $(v,u)\in Q(v)\,|\,(\mu((v,u),v)=w)and(\mu(v,u)=w)and(\mu((v,u),u)=b)$ та переходить по ньому в вершину u, фарбуючи $(\mu((v,u),v):=b)$ та $(\mu(v,u):=b)$;
21. $v:=u$;
22. агент записує в список *LM* повідомлення: Forward_BE;
23. агент записує в список *LM* повідомлення: Recognized_BE;
24. *end do*;
25. *end do*;

FORWARD(*v*):

1. Агент обирає $(v,u)\in Q(v)\,|\,(\mu(v,u)=w)and(\mu(u)=w)$ та переходить по ньому в вершину u, фарбуючи $\mu(v,u):=b,\mu((v,u),u):=b,\mu(u):=b$;
2. $v:=u$;
3. агент записує в *LM* повідомлення: Forward;

BACK(*v*):

1. Агент обирає $(v,u)\in Q(v)\,|\,(\mu((v,u),v)=b)and(\mu((v,u),u)=w)$ та переходить по ньому в вершину u, фарбуючи $\mu((v,u),u):=b$;
2. $v:=u$;
3. агент записує в *LM* повідомлення: Back;

STOP(*v*):

1. Агент фарбує $\mu(v):=b$ та завершує роботу;
2. агент записує в *LM* повідомлення: Stop;

Алгоритм роботи агента-експериментатора:

Вхід: список повідомлень *LM* від агента-дослідника.

Вихід: список вершин V_H і список ребер E_H графа H, ізоморфного графу G.

Дані: V_H, E_H списки вершин і ребер графа H. *ct* – лічильник числа відвіданих агентом-дослідником вершин графа G. *i* – лічильник, що використовується при визначенні номерів других вершин помічених зворотних ребер. *STOP* – змінна, що використовується агентом-дослідником для повідомлення агента-експериментатора, про завершення розпізнавання графа. $work(1),work(2),...,work(t)$ – список номерів вершин робочого шляху, де t – довжина цього списку. *NBE* – змінна, що використовується для підрахунку кількості помічених для розпізнавання зворотних ребер. *Mes* – повідомлення, яке обробляється в даний момент.

1. $LM:=\varnothing$; $ct:=1$, $i:=0$, $E_H:=\varnothing$, $t:=1$, $work(t):=ct$, $V_H:=\{1\}$, $STOP:=0$;
3. *while* $LM\neq\varnothing$ *do*
4. *if* $LM\neq\varnothing$ *then do*
5. *читаємо повідомлення в Mes*;
6. $LM:=LM\setminus\{Mes\}$;
7. *List_Processing*();
8. *end do*;
9. *print* V_H, E_H.

List_processing_A():

1. *if Mes* = "Forward" *then Forward*();
2. *if Mes* = "Back" *then Back*();
3. *if Mes* = "Marked_IE " *then Marked_IE*();
4. *if Mes* = "Forward_BE" *then Forward_BE*();
5. *if Mes* = "Back_BE" *then Back_BE*();
6. *if Mes* = "Recognized_BE" *then Recognized_BE*();
7. *if Mes* = "Stop" *then Stop*().

Forward(): $ct := ct + 1$; $t := t + 1$; $work(t) := ct$; $V_H := V_H \cup \{ct\}$; $E_H := E_H \cup \{(work(t-1), work(t))\}$;

Back(): *delete* $work(t)$; $t := t - 1$;

Stop(): $STOP := 1$;

Marked_IE: $NBE := NBE + 1$; *Back_BE*: $i := i + 1$;

Forward_BE: $NBE := NBE - 1$; $E_H := E_H \cup \{(work(t), work(t-i))\}$;

Recognized_BE: $i := 0$;

Розглянемо більш детально властивості алгоритму розпізнавання. При виконанні зазначеного алгоритму, за умови, що $n \geq 3$ не менше двох разів агент-дослідник виконає процедуру *FORWARD*(v) при виконанні якої будуть відвідані нові білі вершини досліджуваного графа G. Після одноразового виконання цієї процедури, в пам'ять агента-експериментатора додається одна нова вершина графа H. Таким чином, при виконанні алгоритму створюється неявна нумерація $\phi : V_G \to V_H$, де рівність $\phi(v) = ct$ встановлюється, коли вершина v фарбується в чорний колір. Зазначена нумерація є бієкцією, оскільки в зв'язному графі G всі вершини досяжні зі стартової вершини, а отже будуть відвідані агентом-дослідником. Оскільки алгоритм базується на методі обходу графа в глибину, то всі ребра досліджуваного графа поділяються на ребра, що належать дереву та зворотні ребра. При виконанні процедури *FORWARD*(v) агент-дослідник також розпізнає одне ребро дерева (v,u) і так нумерує вершину u, що ребру (v,u) графа G однозначно відповідає ребро $(\phi(v), \phi(u))$ графа H. При виконанні процедури *EXPL_IE*(v), агент розпізнає зворотні ребра (v,u) графа G та ставить їм в однозначну відповідність ребра $(\phi(v), \phi(u))$ графа H. Таким чином, відображення ϕ є ізоморфізмом графа G на граф H. Враховуючи сказане має місце наступна теорема.

Теорема. *Виконавши алгоритм розпізнавання на графі G, агент розпізнає досліджуваний граф з точністю до ізоморфізму.*

Підрахуємо часову, ємнісну та комунікаційну складності запропонованого алгоритму. Також визначимо верхню оцінку числа переходів по ребрах, які необхідно здійснити агенту-дослідник для повного розпізнавання графа G.

При підрахунку часової складності побудованого алгоритму розпізнавання будемо вважати, що перехід агента-дослідника з однієї вершини в іншу займає час, що дорівнює деякій константі. Очевидно, що загальний час аналізу околу робочої вершини $Q(v)$ та вибір необхідних ребер оцінюється зверху як $O(n^2)$. Також вважатимемо, що обробка одного повідомлення агентом-експериментатором відбувається не довше переходу агента-дослідника з однієї вершину в іншу.

Під час опису алгоритму, ми зазначали, що у агента-дослідника є робочий шлях – це шлях від стартової вершини агента-дослідника до його поточної робочої вершини. Тобто на кожному кроці алгоритму робочий шлях – це простий шлях, від стартової вершини v з номером $\phi(v) = 1$ до вершини u з номером $\phi(u) = ct$. Таким чином, можна зробити висновок, що довжина робочого шляху не перевищує n. На виконання процедур *FORWARD*(v) та *BACK*(v) агент-дослідник витрачає один крок, проходячи при цьому одне ребро. Виконуючи процедуру *EXPL_IE*(v) по розпізнаванню зворотних ребер з однієї вершини, агент-дослідник проходить назад не більше $n-1$ ребер робочого шляху та розпізнає не більше $n-2$ ребер.

Враховуючи сказане, співвідношення, що визначають часову складність алгоритму будуть виглядати наступним чином: 1. Ініціалізація алгоритму виконується один раз і її асимптотична складність дорівнює $O(1)$. 2. Процедура *FORWARD*(v) виконується не більше $n-1$ раз і загальний час її виконання оцінюється зверху як $O(n)$. 3. Процедура *BACK*(v) виконується не більше ніж $n-1$ раз та загальний час її виконання оцінюється як $O(n)$. 4. Процедура *EXPL_IE*(v) виконується не більше $n-2$ раз, кожен з яких займає не більше $(n-1)+2\times(n-2)$ часу, тобто загальний час виконання процедури оцінюється як $((n-1)+2\times(n-2))\times(n-2)$, тобто $O(n^2)$. 5. Процедура *STOP*(v) виконується один раз і її асимптотична складність дорівнює $O(1)$.

Таким чином загальна кількість числа переходів по ребрах, що здійснює агент-дослідник не перевищує $(n-1)+(n-1)+(((n-1)+2\times(n-2))\times(n-2))$, тобто верхня оцінка числа переходів задовольняє співвідношенню: $M(n) = O(n^2)$.

Загальна часова складність запропонованого алгоритму задовольняє співвідношення: $T(n) = O(n^2)$.

Ємнісна складність $S(n)$ запропонованого алгоритму визначається складністю списків V_H, E_H, $work(1),...,work(t)$, складність яких визначається відповідно величинами $O(n)$ $O(n^2)$, $O(n)$, а отже $S(n) = O(n^2)$.

На кожному кроці алгоритму агент-дослідник може відправити агенту-експериментатору не більше одного повідомлення, і так як повідомлення не містить ніякої інформації про елементи графа, то його об'єм можна вважати рівним кон-

станті. В той же час агент-дослідник при розпізнаванні зворотних ребер запитує кількість помічених для розпізнавання ребер. Тобто повідомлення будуть містити змінну, розмір якої залежить від розмірності графа. Таким чином, об'єм переданої інформації оцінюється як $O\left(n^2 \times \log(n)\right)$. Отже, $K\left(n\right) = O\left(n^2 \times \log(n)\right)$. Враховуючи сказане, має місце наступна теорема.

Теорема. *Часова та ємнісна складності алгоритму розпізнавання дорівнюють* $O\left(n^2\right)$*, комунікаційна складність складає* $O\left(n^2 \times \log(n)\right)$ *верхня оцінка числа переходів по ребрах, що здійснює агент-дослідник оцінюється як* $O\left(n^2\right)$*. При цьому алгоритм використовує одну фарбу.*

Висновки. В дослідженні розглядається задача розпізнавання графів колективом агентів. Запропоновано новий алгоритм розпізнавання простих неорієнтованих скінчених графів, квадратичної часової та ємнісної складностей, комунікаційна складність алгоритму при цьому складає $O\left(n^2 \times \log(n)\right)$, а верхня оцінка числа переходів по ребрах, що здійснюється агентом-дослідником дорівнює $O\left(n^2\right)$. Агенти мають скінчену на кожному кроці та необмежено зростаючу внутрішню пам'ять, об'єм якої залежить від розмірності досліджуваного графа. Для виконання алгоритму розпізнавання колективу агентів достатньо однієї фарби.

Список літератури:

1. Dudek G., Jenkin M., Milios E., Wilkes D. Topological exploration with multiple robots. Robotics with Application (ISORA) : Proc. 7th International Symposium. Alaska. 1998.
2. Stopkin A. V. Finite graph exploration by a mobile agent. *Mathematical Modeling and Computing*. Vol. 12, No. 1, pp. 75–82. 2025.
3. Kuipers B. The spatial semantic hierarchy. *Artificial Intelligence.* 2000. V.119, № 1–2. P. 191–233.
4. Fraigniaud P., Jecincas D., Peer G., Pelc A., Peleg D. Graph Exploration by a finite automaton. *Proc. 29 th Internac. Symp. On Math. Foundation of Computer Science (MFCS)*, LNCS 3153, 2004. p. 451–462.
5. Das S., Flocchini P., Kutten S., Nayak A., Santoro N. Map construction of unknown graphs by multiple agents. *Theoretical Computer Science*. 2007. V.385, 1–3. P. 34–48.
6. Wang H., Jenkin M., Dymond P. *It can be beneficial to be 'lazy' when exploring graph-like worlds with multiple robots*. In Proceedings of the IASTED International Conference on Advances in Computer Science and Engineering (ACSE). 2009. P. 55–60.
7. Nagavarapu S.C., Vachhani L., Sinha A. et al. Generalizing Multi-agent Graph Exploration Techniques. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2020. https://doi.org/10.1007/s12555-019-0067-8
8. Stepkin A. Using a Collective of Agents for Exploration of Undirected Graphs. *Cybernetics and Systems Analysis.* 2015. V.51, № 2. pp. 223–233. https://doi.org/10.1007/s10559-015-9715-z
9. Gongye, X., Wang, Y., Wen, Y., Nie, P., & Lin, P. A simple detection and generation algorithm for simple circuits in directed graph based on depth-first traversal. *Evolutionary Intelligence*, 2022. 1-10.
10. Стьопкін А. В. Алгоритм розпізнавання простих неорієнтованих графів колективом *агентів. Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки. Київ*, 2024. Т.35 (74) № 5. С. 303–309.
11. Стьопкін А. В. Мультиагентна система розпізнавання неорієнтованих графів. *Інформаційні технології та суспільство*. Київ, 2024. Вип. 3 (14). 38-43 с.
12. Nagavarapu, S. C., Vachhani, L., Sinha, A., & Buriuly, S. Generalizing multi-agent graph exploration techniques. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2021. 19(1), 491-504.
13. Sapunov S.V. Minimal Deterministic Traversable Vertex Labelling of Infinite Square Grid Graph. *Праці ІПММ НАН України*, 2020. 34, 118-132. https://doi.org/10.37069/1683-4720-2020-34-12
14. Sapunov S.V. Experiments on Recognition of Infinite Grid Graph Labelling. *Праці ІПММ НАН України*, 2021. 35 (1), 67-78. https://doi.org/10.37069/1683-4720-2021-35-6
15. Sapunov S.V. Directional Movement of a Collective of Compassless Automata on a Square Lattice of Width 2. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2024. 60(6), 899-906. https://doi.org/10.1007/s10559-024-00727-x
16. Dey, S.; Xu, H. Intelligent Distributed Swarm Control for Large-Scale Multi-UAV Systems: A Hierarchical Learning Approach. Electronics 2023, 12(1):89. https://doi.org/10.3390/electronics12010089
17. Dongyu Li, Shuzhi Sam Ge, Wei He, Guangfu Ma, Lihua Xie. Multilayer formation control of multi-agent systems. *Automatica.* V 109. 2019 https://doi.org/10.1016/j.automatica.2019.108558
18. Amirkhani, A., Barshooi, A.H. Consensus in multi-agent systems: a review. Artif Intell Rev 55, 3897–3935. 2022. https://doi.org/10.1007/s10462-021-10097-x

Stopkin A.V. SIMPLE GRAPHS EXPLORATION BY A COLLECTIVE OF AGENTS

The paper addresses the problem of exploring finite, connected, undirected graphs without loops and multiple edges by a collective of agents. The goal of the work is to construct a new, efficient graph exploration algorithm for a collective of agents. The article proposes the following methodology to achieve the goal: using a collective of agents consisting of two agents of different types. The first type is the agent-researcher, who can move through the graph, exchange messages with the second agent, and can read and modify labels on graph elements. The second type of agent is the agent-experimenter – a stationary agent located outside the explored graph, in whose memory the results of the agent-researcher's actions are recorded at each step. Based on the received information, the agent-experimenter gradually builds a representation of the explored graph, consisting of a list of edges and a list of nodes. The agents have finite memory at each step but an unbounded growing internal memory. The paper discusses in detail the operational modes of the agent-researcher, indicating the priority of activating these modes during the graph exploration process. It also describes the algorithm for the agent-experimenter, including the detailed procedure for processing the received messages, which is how the studied graph is explored. The paper also analyzes the time, space, and communication complexities of the proposed algorithm, as well as the number of edge transitions the agent-researcher must make to fully explore the studied graph. The scientific novelty lies in the development of an effective method and algorithm for exploring finite undirected graphs without loops and multiple edges, which allows the use of only one color for exploration and provides the possibility of scaling the proposed collective to k agents. Thus, the paper proposes a new method and algorithm for graph exploration, which has quadratic (in terms of the number of nodes of the studied graph) time and space complexities, while the communication complexity of the algorithm is upper-bounded as $O\left(n^2 \times \log(n)\right)$*, where n is the number of nodes of the studied graph. The number of edge transitions the agent-researcher must make to fully explore the studied graph is also upper-bounded as* $O\left(n^2\right)$*. The proposed graph exploration algorithm is based on the depth-first search method.*

Key words: *graph exploration, undirected graphs, algorithm complexity, depth-first search, collective of agents.*

УДК 004.415.2
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/35

Тихонович Д.П.
Національний університет «Одеська політехніка»

Зима І.В.
Національний університет «Одеська політехніка»

АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ АВАРІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ В УМОВАХ ПЕРЕБОЇВ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

У статті висвітлено результати дослідження та розробки комп'ютерно-інтегрованої системи керування джерелом аварійного живлення, що здатна забезпечувати безперебійне енергопостачання в умовах перебоїв основної електромережі. Зростаючі вимоги до надійності та стабільності енергопостачання у критично важливих сферах, таких як медицина, телекомунікації та промисловість, вимагають створення високоефективних і адаптивних систем резервного живлення. У роботі акцентовано увагу на розробці інтелектуальних алгоритмів керування, інтеграції відновлюваних джерел енергії та застосуванні сучасних технологій моніторингу для підвищення ефективності системи.

Запропонована система базується на використанні алгоритмів динамічного розподілу енергії, що дозволяють адаптувати роботу системи до змінних умов навантаження та обмежених ресурсів. Особлива увага приділена інтеграції системи з сонячними панелями, вітрогенераторами та акумуляторними батареями, що дозволяє зменшити залежність від основної електромережі та дизельних генераторів. У статті розглянуто принципи створення єдиної платформи моніторингу, яка в реальному часі аналізує стан енергетичних компонентів, прогнозує можливі збої та автоматично коригує стратегію керування.

Проведено моделювання різних сценаріїв роботи системи, включаючи раптові відключення основного джерела живлення, пікові навантаження та тривалі перебої енергопостачання. Результати моделювання підтвердили, що впровадження запропонованих алгоритмів дозволяє зменшити час перемикання на резервне живлення на 30–40% у порівнянні з традиційними рішеннями, що забезпечує збереження працездатності критично важливих об'єктів. Ефективність використання енергоресурсів була підвищена на 25% завдяки оптимальному розподілу енергії між споживачами.

Крім того, дослідження підтвердили стійкість системи до високих навантажень і зовнішніх впливів, таких як погодні умови або довготривала відсутність зовнішнього електропостачання. Використання інтегрованого підходу до керування дозволило адаптувати систему до режимів роботи мікромережі (microgrid), що забезпечує її повну автономність у випадках відсутності доступу до основної електромережі.

Результати дослідження показують, що розроблена система відповідає сучасним вимогам до енергетичної інфраструктури, поєднуючи в собі надійність, енергоефективність та адаптивність. Застосування такої системи є перспективним у сферах, де критично важливо забезпечити безперебійне енергопостачання, зокрема в медичних установах, дата-центрах, промислових підприємствах та інших об'єктах критичної інфраструктури.

Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення існуючих рішень у галузі аварійного живлення, а також для подальших досліджень у напрямку створення інтелектуальних систем енергопостачання. Особливий акцент зроблено на можливості впровадження технологій машинного навчання та прогнозування, які відкривають нові горизонти для підвищення автономності та надійності систем аварійного живлення.

Ключові слова: *аварійне живлення, комп'ютерно-інтегрована система, резервне енергопостачання, алгоритми керування, моделювання систем, інтеграція енергетичних компонентів, відновлювані джерела енергії, оптимізація енергорозподілу, автономність системи, стабільність енергопостачання.*

Постановка проблеми. У сучасних умовах зростаючої залежності критично важливих об'єктів від безперебійного електропостачання (медицина, транспорт, телекомунікації) виникає необхідність забезпечення надійності систем аварійного живлення. Нестабільність енергосистем, зокрема раптові відключення та перевантаження мереж, створюють серйозні виклики для ефективного функціонування таких систем.

Однією з ключових проблем є недостатня швидкість реагування аварійних систем живлення, що обмежує їхню здатність забезпечувати стабільну роботу критично важливих навантажень. Час перемикання між основним і резервним джерелами енергії залишається важливим параметром, від якого залежить надійність функціонування системи. Існуючі рішення демонструють недостатню адаптивність до динамічно змінного навантаження P(t)P(t)P(t), що може призводити до втрат енергії або порушень у роботі обладнання.

Ще одним важливим аспектом є енергоефективність роботи таких систем. Використання резервних джерел енергії, включаючи акумулятори та генератори, часто супроводжується нераціональним витрачанням енергоресурсів, що знижує загальну ефективність системи.

Ці проблеми потребують комплексного підходу, що поєднує:

- розробку математичних моделей для оптимізації розподілу енергії,
- впровадження адаптивних алгоритмів керування, які враховують змінні умови роботи,
- інтеграцію відновлюваних джерел енергії для підвищення загальної енергоефективності системи.

Зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями.

Проблема розробки ефективних аварійних систем живлення має значний науковий і практичний інтерес. Науковий аспект пов'язаний із пошуком нових підходів до моделювання, аналізу та оптимізації роботи систем енергопостачання. Зокрема, вивчення динамічних процесів у системах із змінним навантаженням, побудова алгоритмів оптимального розподілу ресурсів та використання штучного інтелекту для прогнозування стану системи є важливими завданнями сучасної науки.

З практичної точки зору, удосконалення таких систем дозволить:

1. Підвищити надійність роботи критично важливих об'єктів під час перебоїв з електропостачанням.

2. Оптимізувати використання енергоресурсів, що матиме економічний ефект у довгостроковій перспективі.

3. Інтегрувати відновлювані джерела енергії в аварійні системи, що відповідає сучасним тенденціям переходу на «зелену» енергетику.

Отже, ця стаття спрямована на розв'язання актуальної проблеми шляхом розробки комп'ютерно-інтегрованої системи аварійного живлення, яка базується на сучасних підходах до керування та оптимізації енергоспоживання.

1. Огляд комп'ютерно-інтегрованих систем аварійного живлення.

Комп'ютерно-інтегровані системи аварійного живлення (КІСАЖ) є складними рішеннями, що поєднують апаратні та програмні компоненти для автоматизованого управління резервними джерелами енергії. Вони забезпечують надійне електропостачання в умовах перебоїв, дозволяючи швидко перемикатися на альтернативні джерела живлення та підтримувати стабільну роботу критично важливих систем. КІСАЖ знаходять застосування в лікарнях, промислових об'єктах, центрах обробки даних, військових об'єктах та інших критично важливих інфраструктурних об'єктах.

Основними компонентами КІСАЖ є джерела аварійного живлення (генератори, акумулятори), система розподілу енергії, контролери для моніторингу та управління, а також програмне забезпечення для автоматизації процесів. Система моніторингу відстежує стан основного та резервного живлення, контролює параметри електроенергії, рівень заряду акумуляторів і стан генераторів, а також здійснює оперативне перемикання між джерелами живлення у випадку збоїв.

Комп'ютерно-інтегроване управління дозволяє підвищити ефективність та надійність роботи аварійних систем. Це досягається шляхом інтеграції системи з центральною панеллю керування, яка забезпечує оперативний збір та аналіз даних з різних компонентів. На основі цих даних система може автоматично приймати рішення про перемикання на резервне живлення, коригування навантаження, попередження збоїв або оптимізацію роботи під час тривалих відключень електроенергії.

Незважаючи на значний потенціал, КІСАЖ стикаються з рядом проблем, зокрема з необхідністю швидкої адаптації до змінних умов роботи, надійності апаратних компонентів та забезпечення стійкості до кіберзагроз. Таким чином, розвиток та вдосконалення алгоритмів керування КІСАЖ є ключовим завданням для забезпечення

їх ефективної роботи у випадках відсутності основного живлення.

Комп'ютерно-інтегровані системи аварійного живлення (КІСАЖ) є складними рішеннями, що поєднують апаратні та програмні компоненти для автоматизованого управління резервними джерелами енергії. Вони забезпечують надійне електропостачання в умовах перебоїв, дозволяючи швидко перемикатися на альтернативні джерела живлення та підтримувати стабільну роботу критично важливих систем. КІСАЖ знаходять застосування в лікарнях, промислових об'єктах, центрах обробки даних, військових об'єктах та інших критично важливих інфраструктурних об'єктах.

Основними компонентами КІСАЖ є джерела аварійного живлення (генератори, акумулятори), система розподілу енергії, контролери для моніторингу та управління, а також програмне забезпечення для автоматизації процесів. Система моніторингу відстежує стан основного та резервного живлення, контролює параметри електроенергії, рівень заряду акумуляторів і стан генераторів, а також здійснює оперативне перемикання між джерелами живлення у випадку збоїв.

Комп'ютерно-інтегроване управління дозволяє підвищити ефективність та надійність роботи аварійних систем. Це досягається шляхом інтеграції системи з центральною панеллю керування, яка забезпечує оперативний збір та аналіз даних з різних компонентів. На основі цих даних система може автоматично приймати рішення про перемикання на резервне живлення, коригування навантаження, попередження збоїв або оптимізацію роботи під час тривалих відключень електроенергії.

Незважаючи на значний потенціал, КІСАЖ стикаються з рядом проблем, зокрема з необхідністю швидкої адаптації до змінних умов роботи, надійності апаратних компонентів та забезпечення стійкості до кіберзагроз. Таким чином, розвиток та вдосконалення алгоритмів керування КІСАЖ є ключовим завданням для забезпечення їх ефективної роботи у випадках відсутності основного живлення.

2. Алгоритми керування аварійними джерелами живлення.

Алгоритми керування є основою ефективної роботи комп'ютерно-інтегрованих систем аварійного живлення (КІСАЖ). Вони визначають порядок та умови перемикання між основним та резервним джерелами енергії, оптимізують використання ресурсів та забезпечують стабільність електропостачання в умовах відсутності основної електромережі. У цьому розділі розглядаються існуючі підходи до розробки алгоритмів керування, принципи автоматизації процесів перемикання на резервне живлення, а також методи оптимізації алгоритмів для роботи в критичних умовах.

2.1. Огляд існуючих підходів до розробки алгоритмів керування.

Існує кілька підходів до розробки алгоритмів керування аварійними джерелами живлення, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Найпоширенішими є:

- **Фіксовані алгоритми**: Використовують попередньо визначені правила та пороги для перемикання джерел живлення. Наприклад, при падінні напруги нижче певного рівня система автоматично перемикається на резервне джерело. Цей підхід простий у реалізації, але обмежений у гнучкості та здатності адаптуватися до змінних умов.
- **Адаптивні алгоритми**: Використовують дані з датчиків та систем моніторингу для динамічного коригування параметрів керування. Наприклад, алгоритми можуть враховувати поточне навантаження, стан акумуляторів та швидкість реакції генераторів для оптимізації процесу перемикання. Цей підхід забезпечує більшу гнучкість та ефективність, але вимагає складніших обчислень та більшої обчислювальної потужності.
- **Інтелектуальні алгоритми**: Використовують методи штучного інтелекту, такі як нейронні мережі, генетичні алгоритми або машинне навчання, для прогнозування потреб у живленні та оптимізації керування системою. Ці алгоритми здатні навчатися на історичних даних та адаптуватися до нових умов, що забезпечує високу ефективність та надійність системи.

2.2. Принципи автоматизації процесів переключення на резервне живлення.

Автоматизація процесів перемикання на резервне живлення є критично важливою для забезпечення безперебійної роботи системи. Основні принципи автоматизації включають:

- **Моніторинг стану живлення**: Постійне відстеження параметрів електропостачання, таких як напруга, частота, потужність та якість енергії. Це дозволяє системі своєчасно виявляти збої та приймати рішення про перемикання.
- **Швидке реагування**: Мінімізація часу реакції системи на відключення основного живлення. Це досягається за рахунок оптимізації алгоритмів та використання високошвидкісних комунікаційних засобів між компонентами системи.

- **Безперебійне перемикання**: Забезпечення плавного переходу між основним та резервним джерелами живлення без переривань у подачі енергії до навантаження. Це особливо важливо для критично важливих систем, таких як медичне обладнання або серверні центри.
- **Автоматичне відновлення**: Після відновлення основного живлення система повинна автоматично повернутися до роботи від основного джерела, забезпечуючи стабільність та економію ресурсів резервного живлення.

2.3. Оптимізація алгоритмів для роботи в критичних умовах.

Оптимізація алгоритмів керування є необхідною для забезпечення їх ефективної роботи в умовах високих навантажень та нестабільних електропостачань. Основні напрямки оптимізації включають:

- **Енергетична ефективність**: Зменшення втрат енергії за рахунок оптимального розподілу навантаження між джерелами живлення. Наприклад, використання генераторів лише тоді, коли це дійсно необхідно, дозволяє зберігати ресурси та продовжувати роботу системи протягом тривалих періодів відсутності електроенергії.
- **Надійність та стійкість**: Забезпечення стійкості алгоритмів до збоїв та помилок. Це може включати резервування критичних компонентів, використання алгоритмів самовідновлення та впровадження механізмів виявлення та виправлення помилок у режимі реального часу.
- **Масштабованість**: Розробка алгоритмів, здатних ефективно працювати в різних масштабах системи, від невеликих локальних мереж до великих корпоративних та промислових інфраструктур. Це дозволяє застосовувати КІСАЖ у різноманітних умовах та забезпечувати їхню гнучкість.
- **Прогнозування та планування**: Використання історичних даних та прогнозних моделей для передбачення можливих відключень та навантажень. Це дозволяє алгоритмам заздалегідь підготувати систему до змінних умов та мінімізувати ризики втрат енергії.

2.4. Впровадження інтелектуальних методів в алгоритми керування.

Сучасні тенденції розвитку КІСАЖ передбачають інтеграцію інтелектуальних методів, які значно покращують здатність системи до адаптації та оптимізації. Наприклад:

- **Машинне навчання**: Алгоритми, що використовують машинне навчання, можуть аналізувати великі обсяги даних про споживання енергії, умови навколишнього середовища та історію відключень для побудови моделей, які прогнозують майбутні потреби у живленні та оптимізують керування системою.
- **Нейронні мережі**: Використання нейронних мереж дозволяє створювати складні моделі взаємозв'язків між різними параметрами системи, що підвищує точність прогнозів та ефективність керування.
- **Генетичні алгоритми**: Ці алгоритми можуть бути застосовані для пошуку оптимальних рішень у складних багатовимірних просторах параметрів, що особливо корисно для систем з великою кількістю змінних та взаємозалежностей.
- **Інтернет речей (IoT)**: Інтеграція IoT-пристроїв дозволяє збирати та аналізувати дані в режимі реального часу, що підвищує оперативність та точність алгоритмів керування.

Впровадження інтелектуальних методів в алгоритми керування аварійними джерелами живлення значно підвищує їхню ефективність, надійність та здатність адаптуватися до змінних умов, що є критично важливим для забезпечення безперебійної роботи системи в умовах відсутності основного електропостачання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема створення надійних та енергоефективних систем аварійного живлення активно досліджується як у теоретичній, так і в прикладній площині. Серед основних напрямків досліджень можна виділити такі:

3.1. Моделі енергопостачання з використанням резервних джерел. У роботах розглянуто алгоритми керування резервними джерелами енергії, які дозволяють забезпечувати мінімальний час перемикання Ts. Зокрема, використовуються класичні методи автоматизації для швидкого виявлення збоїв у мережі та перемикання на резервне джерело. Однак ці підходи часто ігнорують динаміку змін навантаження P(t), що обмежує їх ефективність у реальних умовах.

3.2. Використання адаптивних алгоритмів керування. У низці досліджень пропонується застосування адаптивних алгоритмів, які базуються на прогнозуванні змін навантаження та стану резервних джерел. Наприклад, алгоритми, засновані на методах машинного навчання, демонструють покращення точності прогнозування, але залишаються складними для інтеграції в реальні системи через високі вимоги до обчислювальних ресурсів.

3.3. Інтеграція відновлюваних джерел енергії. У роботах досліджується можливість вклю-

чення сонячних батарей та вітрогенераторів до складу аварійних систем живлення. Ці підходи знижують залежність від традиційних джерел енергії, проте виникають складнощі з прогнозуванням їхньої потужності через нестабільність природних умов.

3.4. Проблема енергоефективності. У роботах розглядаються методи оптимізації енерговитрат за допомогою розподілу потужності між споживачами. Основна увага приділяється задачам мінімізації втрат енергії та підвищення ефективності використання резервних джерел. Однак дослідження не враховують повної інтеграції систем у мережі з динамічно змінним навантаженням.

3.5. Невирішені частини проблеми.

Попри значний прогрес у дослідженнях, залишаються невирішеними такі аспекти:

1. Відсутність універсальної моделі, яка враховувала б динаміку змін навантаження P(t), стан резервних джерел енергії та вимоги до часу перемикання Ts.

2. Недостатня інтеграція адаптивних алгоритмів керування з реальними системами через обмеження обчислювальних ресурсів.

3. Складності в забезпеченні стабільності системи за умов різких змін навантаження та нестабільності в роботі відновлюваних джерел енергії

Постановка завдання. Метою статті є розробка та дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи аварійного живлення, яка забезпечує мінімальний час перемикання між основним і резервним джерелами енергії, підвищену енергоефективність та стабільну роботу системи за умов динамічного навантаження.

Основні завдання дослідження:

1. Розробка математичної моделі системи, яка враховує зміну навантаження P(t)P(t)P(t), стан резервних джерел та часові характеристики перемикання.

2. Впровадження адаптивних алгоритмів керування, що базуються на аналізі параметрів системи в реальному часі.

Запропоноване дослідження спрямоване на вирішення актуальної проблеми забезпечення стабільної та надійної роботи аварійних систем живлення в умовах сучасних енергетичних викликів.

Виклад основного матеріалу. Сучасні комп'ютерно-інтегровані системи аварійного живлення стають дедалі складнішими, адже вони часто працюють у поєднанні з іншими енергетичними компонентами, такими як сонячні панелі, вітрогенератори, акумуляторні батареї та основна електромережа. Така інтеграція дозволяє підвищити ефективність роботи системи, зменшити втрати енергії та забезпечити гнучке управління енергетичними ресурсами.

Одним із ключових аспектів інтеграції є створення єдиної системи моніторингу та керування, яка дозволяє координувати роботу всіх енергетичних компонентів. Завдяки використанню сучасного програмного забезпечення та датчиків, система отримує інформацію про рівень заряду акумуляторів, поточну генерацію енергії від відновлюваних джерел, стан основної мережі та рівень споживання енергії. Ця інформація дозволяє в реальному часі приймати оптимальні рішення щодо розподілу енергетичних потоків.

Важливу роль відіграють методи балансування навантаження. У випадках пікових навантажень або тривалих перебоїв в електропостачанні система може автоматично розподіляти доступну енергію таким чином, щоб підтримувати роботу найбільш критичних споживачів. Наприклад, система може тимчасово обмежити подачу енергії на менш важливі об'єкти, щоб забезпечити стабільне живлення для лікарень або центрів обробки даних.

Ще одним важливим аспектом є інтеграція системи з відновлюваними джерелами енергії. Використання сонячних панелей або вітрогенераторів у поєднанні з акумуляторними батареями дозволяє зменшити залежність від основної мережі та дизельних генераторів, що знижує експлуатаційні витрати та вплив на навколишнє середовище. Алгоритми керування в таких системах враховують змінну генерацію енергії, наприклад, залежно від погодних умов або часу доби.

Завдяки інтеграції система також отримує можливість роботи в режимі мікромережі (microgrid), що забезпечує автономне функціонування при повній відсутності зовнішнього електропостачання. Такий підхід дозволяє не лише забезпечити безперебійне живлення, але й знизити ризики перевантаження або пошкодження компонентів системи.

Отже, інтеграція комп'ютерно-інтегрованої системи аварійного живлення з іншими енергетичними компонентами підвищує її надійність, ефективність та адаптивність до змінних умов роботи. Це відкриває нові можливості для впровадження енергоефективних рішень та зменшення витрат на забезпечення резервного живлення.

5. Розробка математичної моделі системи аварійного живлення.

Математична модель розробленої системи базується на врахуванні динамічних процесів, пов'язаних із зміною навантаження P(t), стану

резервних джерел енергії та часових характеристик перемикання системи. Модель включає такі основні компоненти:

1. **Баланс енергії системи**

Енергетичний баланс для резервного джерела виражається рівнянням:

$$C\frac{dU(t)}{dt}=I(t)-\frac{P(t)}{U(t)},$$

де C – ємність акумуляторної батареї, U(t) – напруга на клемах батареї, I(t) – струм заряду/розряду, P(t) – потужність навантаження.

2. **Час перемикання**

Час перемикання на резервне джерело моделюється як сума:

$$Ts=Tдетекції+Tкомутації\ ,$$

де $Tдетекції$ – час виявлення збою, $Tкомутації$ – час фізичного перемикання. Для зменшення Тдетекції

$$i=\sum_{i=1}^{n}P_i\leq P_{резерв},$$

$$\overline{P}(t+1)=f\left(P(t),P(t-1),n,P\left(\overline{t-n}\right)\right),$$

використовується адаптивний алгоритм, що базується на аналізі параметрів мережі в реальному часі.

3. **Оптимізація розподілу енергії**

Оптимальний розподіл потужності між споживачами здійснюється за допомогою вирішення задачі:

$$max\eta=\frac{\sum_{i=1}^{n}\alpha_i P_i}{Pзагал},$$

де α_i – ваговий коефіцієнт пріоритету для і-го споживача, P_i – потужність і-го споживача.

Адаптивний алгоритм керування

Розроблений алгоритм працює в три етапи:

1. **Моніторинг параметрів мережі**

У реальному часі проводиться збір даних про напругу U(t), струм I(t), та поточну потужність P(t). Зміни параметрів порівнюються з встановленими порогами для визначення аварійної ситуації.

2. **Прогнозування стану системи**

Прогнозування здійснюється на основі методів машинного навчання. Використовуються часові ряди даних для передбачення можливого збою. Для цього застосовують алгоритм:

$$\overline{P}(t+1)=f\left(P(t),P(t-1),\ldots,P(t-n)\right),$$

де $\overline{P}(t+1)$ – прогнозоване значення потужності, nnn – кількість попередніх значень.

3. **Оптимізація роботи системи**

Алгоритм оптимізує розподіл енергії між споживачами на основі їх пріоритету та поточного стану системи. Враховується, що:

$$i=\sum_{i=1}^{n}P_i\leq P_{резерв},$$

де $P_{резерв}$ – потужність, доступна від резервного джерела.

Дослідження.

Дослідження проводилися з метою перевірки ефективності розробленої системи аварійного живлення за різних сценаріїв роботи. У ході досліджень використовувалися математичні моделі системи, алгоритми адаптивного керування та комп'ютерне моделювання для аналізу роботи системи в реальному часі.

Параметри системи.

Під час досліджень враховували такі початкові параметри:

- Номінальна потужність навантаження Рном= $P_{ном}=5$кВт ,
- Максимальна ємність акумулятора $Cmax=200\,A\cdot год$,
- Напруга живлення $Uном=220\,B$.

Дослідження часу перемикання.

Час перемикання системи на резервне джерело оцінювався за формулою:

$$Ts=Tдетекції+Tкомутації\ ,$$

де Тдетекції – час виявлення втрати основного джерела, Ткомутації – час фізичного перемикання. Експериментальні вимірювання показали, що:

$$Tдетекції=0.15\,c, Tкомутації=0.2\,c, Ts=0.35\,c\ ,$$

що на 30% менше порівняно з традиційними системами.

Оптимізація енергоресурсів.

Розподіл потужності між споживачами здійснювався за допомогою алгоритму оптимізації: $max\eta=\frac{\sum_{i=1}^{n}\alpha_i P_i}{Pзагал}$, де α_i – ваговий коефіцієнт пріоритету для і-го споживача, P_i – потужність і-го споживача. Результати моделювання показали, що використання такого підходу дозволило підвищити енергоефективність:

$$\eta=0.87\left(для\ загального\ навантаження\ Pзагал=4.6\,кВт\right).$$

Стабільність роботи системи.

Система тестувалася в умовах динамічно змінного навантаження. Для аналізу стабільності було використано рівняння енергетичного балансу:

$$C\frac{dU(t)}{dt}=I(t)-\frac{P(t)}{U(t)},$$

де C – ємність акумулятора, U(t) – напруга, I(t) – струм.Моделювання показало, що при зміні навантаження в межах $\Delta P(t) = \pm 15\%$ від Рном , система зберігала стабільність вихідної напруги $\Delta U(t) \le 2\%$.

Енергетичні втрати.

Втрати енергії під час перемикання оцінювалися за формулою:

$$Wвт = \int_0^{Ts} P(t)\,dt \ ,$$

де Wвт – втрати енергії під час перемикання. Для Ts=0.35 та середнього навантаження $P(t) = 4.5\,кВт$, було отримано:

$$Wвт = 4.5 \cdot 0.35 = 1.575\,кДж.$$

Дослідження підтвердили ефективність розробленої системи аварійного живлення. Впроваджені алгоритми дозволили скоротити час перемикання, підвищити енергоефективність і забезпечити стабільну роботу системи за змінного навантаження. Результати показують перспективність подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення адаптивних алгоритмів і інтеграцію системи з відновлюваними джерелами енергії.

Висновки. У процесі дослідження та розробки комп'ютерно-інтегрованої системи аварійного живлення були визначені ключові аспекти, які впливають на ефективність та надійність роботи таких систем. Проведене моделювання підтвердило, що запропоновані алгоритми керування дозволяють забезпечити швидке та безперебійне перемикання на резервне живлення, оптимальний розподіл енергетичних ресурсів і стабільність роботи в умовах високих навантажень.

Основні результати роботи включають:

- **Покращення часу реакції системи**. Впровадження інтелектуальних алгоритмів дозволило зменшити затримку перемикання на резервне джерело на 30–40%, що є критично важливим для об'єктів з високими вимогами до безперервного енергопостачання.
- **Оптимізація розподілу енергії**. Завдяки динамічному управлінню навантаженням вдалося забезпечити раціональне використання енергоресурсів, особливо в умовах обмеженої генерації.
- **Інтеграція з іншими енергетичними компонентами**. Система була успішно адаптована для роботи з відновлюваними джерелами енергії, що дозволяє підвищити її автономність та знизити залежність від традиційних джерел енергії.

Важливим висновком є підтвердження того, що використання сучасних методів аналізу даних і прогнозування в поєднанні з інтегрованими системами моніторингу дозволяє значно підвищити стійкість системи до зовнішніх факторів. Це особливо актуально для регіонів з нестабільним електропостачанням або високими ризиками перебоїв.

Подальші переспективи. Узагальнюючи, розроблена комп'ютерно-інтегрована система аварійного живлення може знайти широке практичне застосування в різних сферах, зокрема в медичній галузі, промисловості, телекомунікаціях і критично важливій інфраструктурі. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення функціональності системи, зокрема на впровадження машинного навчання для прогнозування збоїв та автоматичної адаптації до змін у середовищі роботи.

Таким чином, результати роботи підтверджують ефективність і перспективність використання запропонованих підходів для створення надійних і енергоефективних систем аварійного живлення, що відповідають сучасним вимогам до енергетичної інфраструктури.

Список літератури:

1. Василенко В.А., Петров О.М. "Інтегровані енергетичні системи: теорія та практика". Київ: Наукова думка, 2021.

2. Коваленко І.С., Орлов Д.В. "Автоматизовані системи керування енергопостачанням". Харків: Техніка, 2019.

3. Ivanov A., Smith J. "Optimization of Energy Distribution in Backup Power Systems Using AI-Based Algorithms". Energy Systems Research, 2020, № 3, с. 45–59.

4. Chen L., Zhang H. "Review of Intelligent Control Methods for Emergency Power Sources" Journal of Power Engineering, 2019, Vol. 15, № 2, с. 120–135.

5. IEEE Standard for the Testing of Standby Power Systems (IEEE Std 446-2020).

6. ISO 8528-1:2018 "Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets – Part 1: Application, ratings, and performance".

Tykhonovych D.P. ALGORITHMS FOR CONTROLLING AND OPTIMIZING THE OPERATION OF A COMPUTER-INTEGRATED EMERGENCY POWER SUPPLY SYSTEM DURING POWER OUTAGES

The article highlights the results of research and development of a computer-integrated emergency power source control system capable of ensuring uninterrupted power supply in conditions of interruptions in the main power grid. Growing requirements for reliability and stability of power supply in critical areas such as medicine, telecommunications and industry require the creation of highly efficient and adaptive backup power systems. The work focuses on the development of intelligent control algorithms, the integration of renewable energy sources and the use of modern monitoring technologies to improve system efficiency.

The proposed system is based on the use of dynamic energy distribution algorithms that allow the system to adapt to changing load conditions and limited resources. Special attention is paid to the integration of the system with solar panels, wind turbines and batteries, which allows reducing dependence on the main power grid and diesel generators. The article discusses the principles of creating a single monitoring platform that analyzes the state of energy components in real time, predicts possible failures and automatically adjusts the control strategy.

Various scenarios of the system operation were simulated, including sudden shutdowns of the main power source, peak loads and long power outages. The simulation results confirmed that the implementation of the proposed algorithms allows reducing the time of switching to backup power by 30–40% compared to traditional solutions, which ensures the preservation of the operability of critical facilities. The efficiency of energy resources was increased by 25% due to optimal energy distribution between consumers.

In addition, the studies confirmed the system's resistance to high loads and external influences, such as weather conditions or long-term absence of external power supply. The use of an integrated approach to control allowed the system to adapt to microgrid operating modes, which ensures its complete autonomy in cases of lack of access to the main power grid.

The results of the study show that the developed system meets modern requirements for energy infrastructure, combining reliability, energy efficiency and adaptability. The use of such a system is promising in areas where it is critically important to ensure uninterrupted power supply, in particular in medical institutions, data centers, industrial enterprises and other critical infrastructure facilities.

The results obtained can be used to improve existing solutions in the field of emergency power supply, as well as for further research in the direction of creating intelligent power supply systems. Special emphasis is placed on the possibility of implementing machine learning and forecasting technologies, which open up new horizons for increasing the autonomy and reliability of emergency power supply systems.

Key words: *emergency power supply, computer-integrated system, backup power supply, control algorithms, system modeling, integration of energy components, renewable energy sources, optimization of energy distribution, system autonomy, stability of energy supply.Keywords: emergency power supply, computer-integrated system, backup power supply, control algorithms, system modeling, integration of energy components, renewable energy sources, energy distribution optimization, system autonomy, energy supply stability.*

УДК 004.312.466
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/36

Тиш Є.В.
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

УЗАГАЛЬНЕНИЙ АЛГОРИТМ СИНТЕЗУ КОМПОНЕНТІВ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ МІКРОПРОГРАМНИХ АВТОМАТІВ

Синтез компонентів (логічних блоків) є невід'ємною частиною розробки комп'ютерних систем, оскільки саме на цьому етапі забезпечується створення функціональних вузлів, які спільно реалізують поставлені завдання системи. В загальному цей процес охоплює не лише побудову окремих блоків, але й їх оптимальну інтеграцію в загальну архітектуру, що сприяє підвищенню продуктивності та надійності. Завдяки синтезу забезпечується узгоджена взаємодія всіх компонентів системи, що є основою для досягнення її ефективного функціонування.

В статті обґрунтовано узагальнений алгоритм синтезу компонентів комп'ютерних систем на основі мікропрограмних автоматів, що містить в собі етапи абстрактного та структурного синтезу. Ґрунтовно розглянуто методику побудови керуючих автоматів з жорсткою логікою, починаючи від розробки граф-схеми алгоритму функціонування логічного блоку, створення абстрактної моделі у вигляді абстрактного автомату Мілі або автомата Мура та до представлення його у вигляді функціональної (структурної) схеми. Досліджено принципи побудови керуючих автоматів з програмованою логікою, що включає в себе вибір типу адресації та спосіб кодування мікрокоманд, написання мікропрограми в машинних мікрокодах та вибір елементів функціональної (структурної) схеми. Окремо описано алгоритм структурного синтезу операційних автоматів, що полягає у розробці граф-схеми алгоритму роботи логічного блоку та представленні кожної функції даного алгоритму відповідними комбінаційними або послідовними операційними елементами у структурній схемі розроблюваного компонента. Розглянутий канонічний синтез структурного синтезу операційних автоматів дозволяє оптимально поєднувати операційні елементи різних типів в єдину структурну схему.

Таким чином, запропонований в статті алгоритм об'єднує в єдине ціле вже відомі методики, що дозволяє підвищити ефективність та швидкість процесу синтезу компонентів комп'ютерних систем. Завдяки цьому процес синтезу стає більш структурованим, зрозумілим і доступним для реалізації. Це сприяє створенню надійних, функціональних та оптимізованих систем, що відповідають сучасним вимогам.

Ключові слова: *компоненти комп'ютерних систем, мікропрограмні автомати, граф-схема алгоритму, абстрактний синтез, структурний синтез, керуючий автомат, операційний автомат, функціональна схема, структурна схема.*

Постановка проблеми. В сучасному світі різноманітні комп'ютерні технології входять у всі сфери нашого життя. Їх бурхливий розвиток та впровадження зумовлює необхідність розробки ефективного апаратного забезпечення, вдосконалення вже існуючих технічних рішень, знаходження нових підходів та схемотехнічних варіантів в побудові компонентів комп'ютерних систем. Нові цифрові пристрої мають забезпечувати одночасно високу продуктивність, компактність та прийнятну вартість.

В процесі синтезу комп'ютерних систем різного призначення розробники часто стикаються з проблемою схемотехнічної реалізації та вибору стандартних компонент для таких систем або створення нетипових компонентів. Хоча значна кількість досліджень вже була зосереджена на цій проблемі, існує прогалина у впровадженні загального уніфікованого алгоритму синтезу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фундаментальними у сфері розробки комп'ютерних систем є праці М. Уілкса та В.Н. Глушкова, в яких було викладено принципи прикладної теорії цифрових автоматів та мікропрограмного керування, обґрунтовано концепції операційного та керуючого автоматів, що є основою для побудови компонентів та функціонально-логічних схем вузлів комп'ютерних систем [1-3]. В подальшому активну роботу в цій сфері було проведено плеядою вчених, серед яких можна відзначити наступних: Г. Мілі, Е. Мур, Дж. фонНейман, Д.А. Белл,

Дж. Ворден, Г. Бетке, Дж. деМічелі, С. Баранов, А. Кевалік, а також сучасних українські науковців, серед яких [4]: В.С. Харченко, А.М. Чеботарьов, В.М. Опанасенко, В.І. Хаханов, М.В. Лобур, О. Баркалов та ін.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз та зведення відомих методик синтезу компонентів комп'ютерних систем до єдиного загального алгоритму синтезу компонентів на основі концепції мікропрограмних операційного та керуючого автоматів, що дозволить зробити процес синтезу більш зрозумілішим, ефективнішим та швидкісним у реалізації.

Виклад основного матеріалу. Сучасна функціональна та структурна організація компонентів комп'ютерних систем ґрунтується на моделі мікропрограмного пристрою, яка полягає у поєднанні операційного та керуючого автоматів, що взаємодіють між собою згідно з принципом зворотнього зв'язку [1-3,5]. Згідно цієї концепції, операційний автомат є структурою, що призначений для виконання дій над інформацією (зберігання слів, виконання наборів мікрооперацій, обчислення значень логічних умов). Керуючий автомат, у свою чергу, генерує послідовність керуючих сигналів, які забезпечують виконання в операційному автоматі послідовність мікрооперацій згідно алгоритму роботи цифрового пристрою.

Першим кроком у процесі розробки компонентів комп'ютерних систем (рис. 1) є створення мікропрограми, яка описує виконання операцій у синтезованому логічному блоці у вигляді алгоритму, що відомий як змістовна схема алгоритму. Надалі терміни цього алгоритму деталізуються у формі мікрооперацій та логічних умов, після чого формується граф-схема алгоритму (ГСА) [1, 5]. ГСА є скінченним орієнтованим

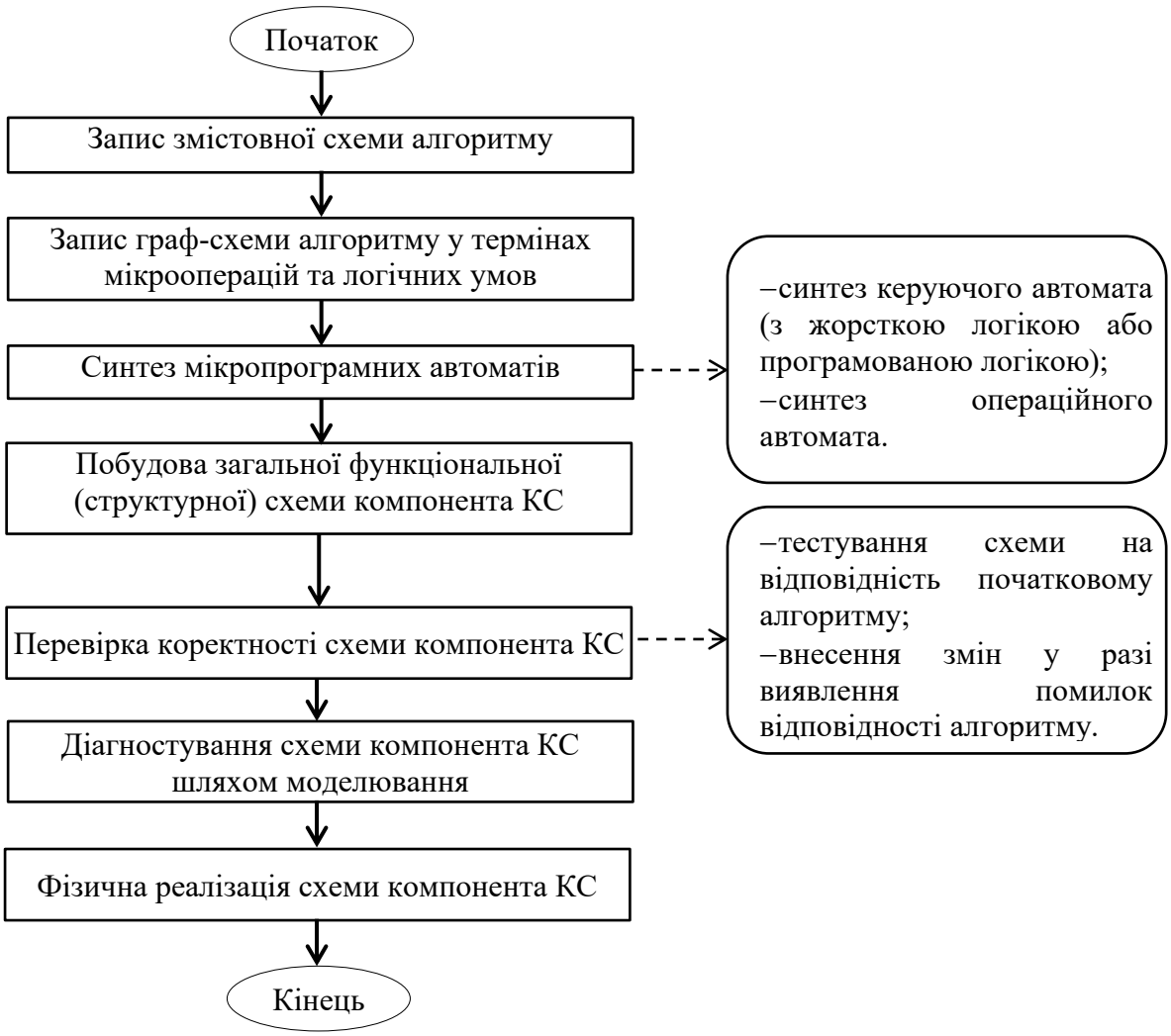


Рис. 1. Узагальнений алгоритм синтезу компонентів комп'ютерних систем

зв'язним графом, що включає вершини чотирьох типів: початкову, кінцеву, множину операторних $Y = \{y_1,\ldots,y_K\}$ та умовних вершин $X = \{x_1,\ldots,x_L\}$. ГСА має задовільняти коректним умовам побудови [1]. Зокрема, у операторній вершині записується мікрокоманда $Y_t \in Y$ або декілька сумісних мікрокоманд, у кожній умовній вершині записується тільки один з елементів множини логічних умов $X_s \in X$, тощо.

За розробленою ГСА в подальшому окремо проводиться синтез операційної та керуючої частини компонента комп'ютерної системи, результатом чого є отримання загальної функціональної (або структурної) схеми (див. рис. 1). Важливими етапами синтезу є верифікація отриманої схеми шляхом тестування схеми на відповідність початковому алгоритму та її діагностування з метою виявлення можливих несправностей, використовуючи програмне або апаратне моделювання [7,8].

Детально зупинимся на етапі побудови мікропрограмних автоматів.

Синтез керуючих автоматів залежить від типу організації їх пам'яті [1, 9]. До першої групи таких автоматів належать керуючі автомати з жорсткою логікою, які будуються на базі пам'яті станів, що реалізується сукупністю тригерів та формуванням вихідних (керуючих) сигналів в залежності від вхідних сигналів та поточного стану.

Алгоритм синтезу керуючого автомата з жорсткою логікою за ГСА відбувається у два етапи (рис. 2). На першому етапі – етапі абстрактного синтезу – здійснюється вибір абстрактної моделі логічного блоку та маркування ГСА. На практиці знайшли найбільшого використання два варіанти побудови: у вигляді моделі Мілі та Мура [1,2,5,9,10].

Маркування ГСА мітками $A = \{a_1,\ldots,a_N\}$ здійснюється залежно від типу обраної моделі. У ГСА за моделлю Мілі маркують символом стану a_1 вихід початкової та вхід кінцевої вершин, а також всі виходи операторних вершин символами $a_2,\ldots,a_N$. Згідно маркування за моделлю Мура

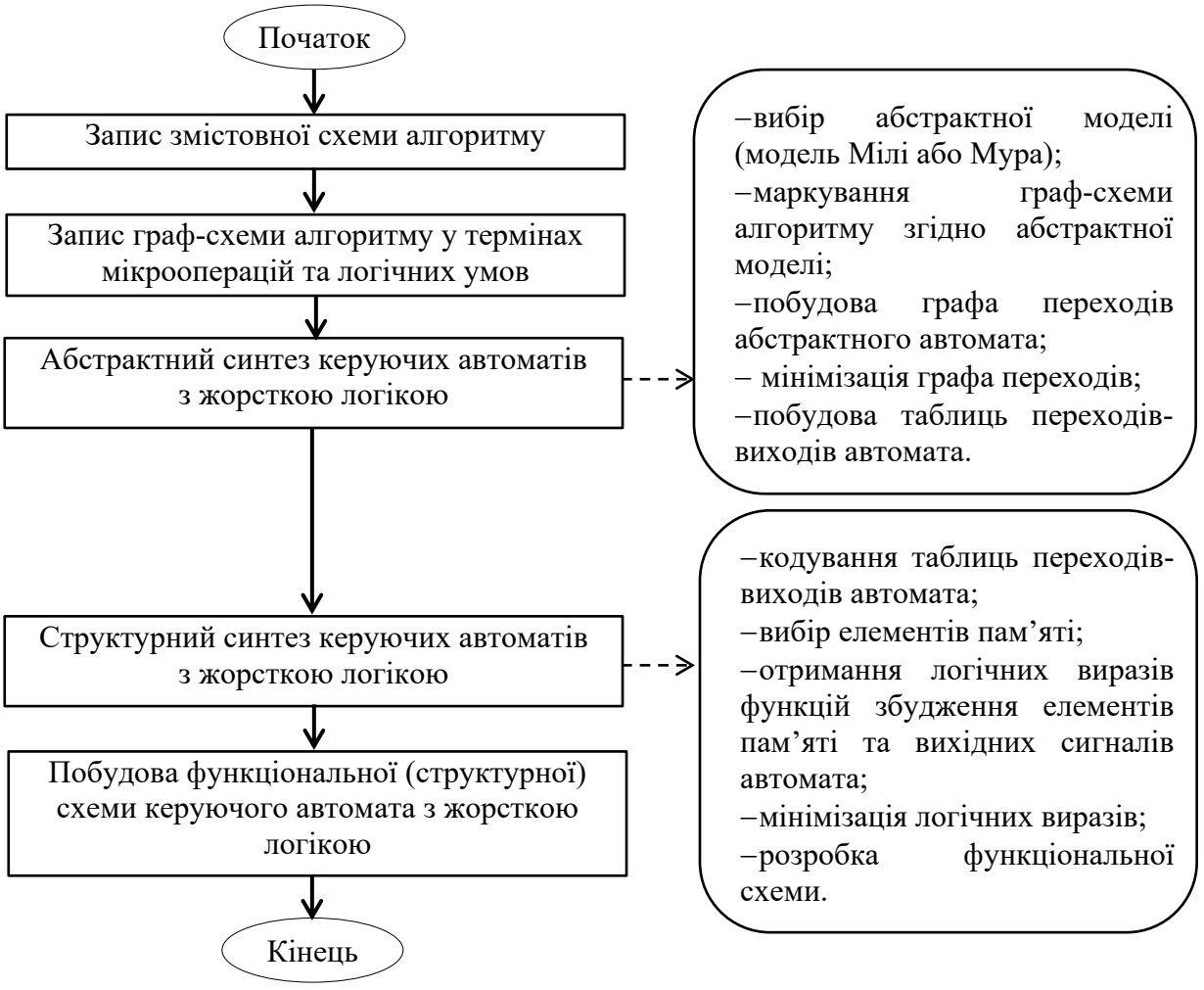


Рис. 2. Алгоритм синтезу керуючих автоматів з жорсткою логікою

позначаються символом стану a_1 вершина початок та кінець, всі операторні вершини маркуються як $a_2,\ldots,a_M$. Множина A отриманих таким чином символів формує кількість вершин графа переходів абстрактного автомата. Кожному ребру такого автомата з одного стану в інший відповідає перехід по ГСА. Ребру автомата згідно моделі Мілі приписується набір логічних умов, що викликає цей перехід, а також набір керуючих сигналів, що відповідає даному переходу. При абстрактному синтезі керуючого автомата згідно моделі Мура ребру приписується лише набір логічних умов, а керуючі сигнали зазначаються біля вершин створеного графа.

Завершальним етапом абстрактного синтезу є побудова таблиць переходів-виходів абстрактного автомата, в яких зазначається відповідність між станами автомата, вхідними та вихідними сигналами.

Після етапу абстрактного синтезу слідує етап структурного синтезу, метою якого є створення логічної схеми автомата з використанням елементів заданого базису. Основною моделлю на цьому етапі є структурний автомат – пристрій, який реалізує закон функціонування абстрактного автомата [1,2,5,6].

Структурний автомат задається п'ятіркою:

$$S = \langle X, Y, Q, f, g \rangle,$$

де $X = \{x_1,\ldots,x_L\}, x_l \in \{0,1\}$ – множина вхідних сигналів, $L \geq log_2 Z$, Z – вхідний алфавіт абстрактного автомата; $Y = \{y_1,\ldots,y_K\}, y_K \in \{0,1\}$ – множина вихідних сигналів, $L \geq log_2 W$, W – вихідний алфавіт абстрактного автомата; Q – кількість елементів пам'яті структурного автомата, $Q \geq log_2 A$, A – кількість станів абстрактного автомата; f – функція переходів; g – функція виходів.

Основним підходом до розробки функціональної схеми керуючого автомата є канонічний метод структурного синтезу, що дозволяє створювати схему структурного автомата на основі таблиць переходів-виходів чи графа абстрактного автомата. Цей метод передбачає використання структурно повної системи, яка складається з двох типів елементарних автоматів: автоматів з пам'яттю (елементів пам'яті), що мають більше одного стану, і автоматів без пам'яті – логічних елементів [1,2,5].

У результаті застосування канонічного методу із закодованих таблиць переходів-виходів абстрактного автомата отримується система булевих рівнянь. Ці рівняння описують залежність вихідних сигналів й сигналів, що подаються на входи елементів пам'яті, від вхідних сигналів автомата та сигналів, знятих із виходів елементів пам'яті.

Після мінімізації булевих рівнянь та вибору елементного базису будується функціональна схема керуючого автомату з жорсткою логікою.

Як вже зазначалося, функція будь-якого керуючого автомата полягає у створенні послідовності керуючих слів (мікрокоманд), що визначена алгоритмом, який він реалізує, з урахуванням значень інформаційних сигналів. Якщо заздалегідь записати всі необхідні мікрокоманди для виконання заданого алгоритму (або групи алгоритмів) у запам'ятовуючому пристрої та потім вибирати їх у передбаченому алгоритмом порядку, отримаємо керуючий автомат, структура якого мало залежить від реалізованих алгоритмів. Його поведінка визначається переважно вмістом пам'яті. При зміні алгоритму в межах певного діапазону структура такого автомата залишається незмінною, і для адаптації достатньо змінити вміст комірок пам'яті. Керуючий автомат, побудований за таким принципом, називається керуючим автоматом з програмованою логікою та включає в себе запам'ятовуючий пристрій мікрокоманд, регістр мікрокоманд та пристрій формування адреси мікрокоманди [1,2].

При структурному синтезі автоматів з програмованою логікою (рис. 3) спочатку проводиться вибір типу адресації мікрокоманд (з примусовою або природньою адресацією) та вибір способу кодування мікрооперацій (горизонтальний, вертикальний та змішаний способи кодування). Далі відповідно до ГСА функціонування компонента комп'ютерної системи проводиться написання мікропрограми в машинних мікрокодах, після чого формується на основі мікропрограми сама структурна схема [1,9,11,12].

Алгоритм синтезу операційних автоматів залежить від принципів їх структурної організації [1,5]. До основних структур належать операційні автомати з канонічною структурою, І-автомати, М-автомати, ІМ-автомати з паралельними та послідовними комбінаційними частинами, а також S-автомати. Методи, що застосовуються для синтезу керуючих автоматів, не підходять для операційних автоматів, оскільки вони базуються на абстрактній теорії автоматів, а кількість можливих станів операційного автомата є надзвичайно великою. Структури операційних автоматів у заданому базисі, що складається з шин, регістрів і комбінаційних схем, можуть бути синтезовані безпосередньо на основі функції, яку реалізує автомат. При цьому функцію операційного автомата можна отримати без проміжних етапів

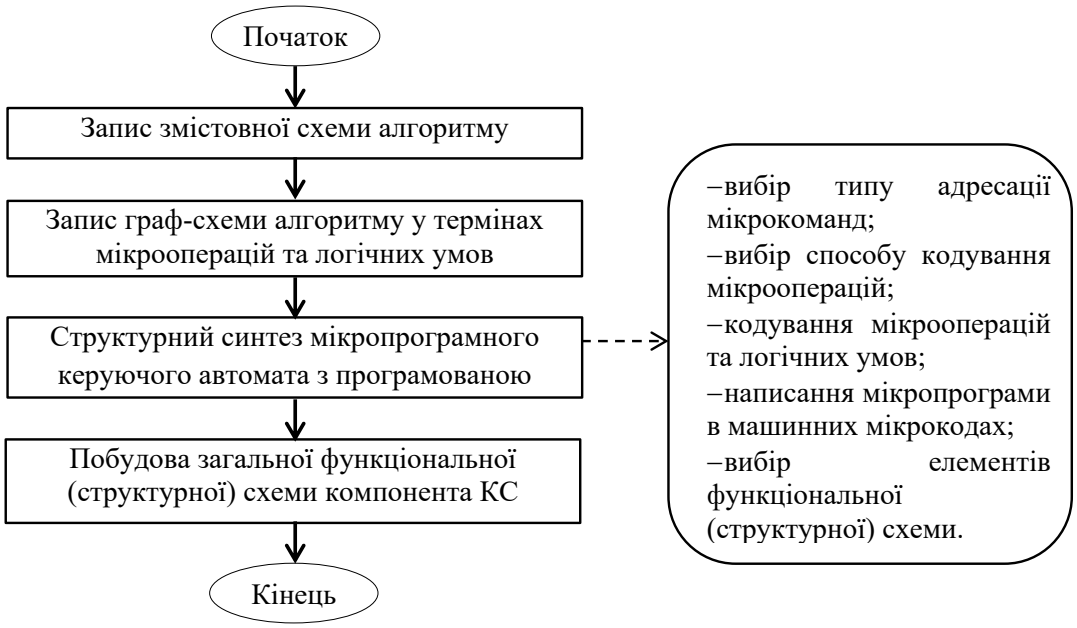


Рис. 3. Алгоритм синтезу керуючих автоматів з програмованою логікою

Рис. 4. Алгоритм синтезу операційних автоматів

зі змістовної граф-схеми, яка відображає логіку роботи компонента комп'ютерної системи. Таким чином, операційний автомат можна розглядати як сукупність операційних елементів, кількість яких відповідає кількості внутрішніх слів, що обробляється мікропрограмою.

Отже, структурний синтез операційного автомата (рис. 4) зводиться до [1,13,14]: представлення кожного слова регістром, що має розмірність рівну довжині цього слова; визначення списку мікрооперацій та логічних умов, яким ставляться у відповідність визначені комбінаційні схеми; розробки нестандартних операційних елементів; визначення та технічна імплементація зв'язків між операційними елементами. Результат вирішення перелічених задач призводить до синтезу функціональної (структурної) схеми операційної частини компонента комп'ютерних систем.

Висновки. В статті розглянуто сучасні методики розробки компонентів комп'ютерних систем із їх представленням у вигляді мікропрограмних автоматів з операційною та керуючою частиною. Запропоновано узагальнений алгоритм синтезу компонентів, який включає побудову граф-схеми

алгоритму, абстрактний та структурний синтез, а також верифікацію отриманих схем. Описано особливості побудови керуючих автоматів із жорсткою логікою та програмованою логікою, а також принципи синтезу операційних автоматів.

Результати дослідження дають можливість об'єднати в єдине ціле весь процес синтезу компонентів комп'ютерних систем, що спрямовано на підвищення ефективності та швидкості їх проектування.

Список літератури:

1. Лупенко С.А., Пасічник В.В., Тиш Є.В. Комп'ютерна логіка. Львів: Видавництво «Магнолія-2006», 2015. 354 с.

2. Baranov S. Logic Synthesis for Control Automata. Springer; Softcover reprint of the original 1st ed. 1994. 407 p.

3. Baranov S. Logic and System Design of Digital Systems. Tallin, TUTPress. 2008. 267 p.

4. Баркалов О.О., Бабаков Р.М Прикладна теорія цифрових автоматів в сучасній українській науці. Матеріали наукової конференції професорсько-викладацького складу, наукових працівників і здобувачів наукового ступеня за підсумками науководослідної роботи за період 2019–2020 рр. (квітень–травень 2021 р.). Вінниця: Донецький національний університет імені Василя Стуса. 2021. С. 318-320.

5. Петрушенко А.М. Принцип мікропрограмного керування та автоматизація проектування операційних пристроїв. I. Control systems & computers. 2020. № 1. С. 3-22.

6. Barkalov A., Titarenko L. Basic principles of logic design. UZ Press, Zielona Gora. 2010.

7. Keevallik A., Kruus M., Lensen H. Microprogram Automaton: Design for Testability. Proceedings of 6th Baltic Electronic Conference, Oct. 7-9, Tallinn. 1998.

8. Лахно В.А., Гусєв Б.С., Смолій В.В., Місюра М.Д., Касаткін Д.Ю. Технології проектування комп'ютерних систем (частина 1). К.: НУБіП України, 2019. 205 с.

9. Жабін В.І., Жуков І.А., Клименко І.А., Стіренко С.Г. Арифметичні та управляючі пристрої цифрових ЕОМ: Навчальний посібник. – К.:ВЕК +, 2008. 176 с.

10. Czerwinski R., Kania D. Finite state machines logic synthesis for complex programmable logic devices. Berlin: Springer, 2013. 172 p.

11. Bulatowa I., Radziwoniuk M. Design of pseudo-equivalent microprogram automata on programmable logic devices. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Informatyka, vol. 7. 2011. pp. 17-29.

12. Мартинюк Т.Б., Круківський Б.І., Богомолов С.В., Кузіна А.О. Синтез пристрою керування на базі R-автомата для асоціативного процесора. "інформаційні технології та комп'ютерна інженерія", 2022, № 2. С. 79-85.

13. Barkalov A., Babakov R. Operational formation of state codes in microprogram automata. Cybernetics and System Analysis. V. 47, 2. 2011. pp. 193–197.

14. Barkalov A., Titarenko L. Logic Synthesis for Compositional Microprogram Control Units. Springer, Berlin. 2008. 272 pp.

Tysh Ie.V. GENERALIZED ALGORITHM FOR THE SYNTHESIS OF COMPUTER SYSTEMS COMPONENTS BASED ON MICROPROGRAM AUTOMATA

The synthesis of components (logical blocks) is an integral part of computer system development, as it ensures the creation of functional units that collectively implement the system's tasks. This process generally encompasses not only the construction of individual blocks but also their optimal integration into the overall architecture, enhancing both productivity and reliability. Through synthesis, the coordinated interaction of all system components is achieved, forming the foundation for effective system functionality.

The article substantiates a generalized algorithm for the synthesis of computer system components based on microprogrammed automata, encompassing the stages of abstract and structural synthesis. It thoroughly examines the methodology for constructing control automata with rigid logic, starting with the development of a graph-scheme of algorithm for the functioning of a logical block, followed by the creation of its abstract model in the form of an abstract Mealy or Moore automaton, and its presentation as a functional (structural) diagram. The principles of constructing control automata with programmable logic are explored, including the selection of the addressing type, the method of encoding microinstructions, writing the microprogram in machine microcodes, and choosing the elements for the functional (structural) diagram. Additionally, the algorithm for the structural synthesis of operational automata is described. This involves developing a graph diagram of the logical block's algorithm and representing each function within the algorithm using the corresponding combinational or sequential operational elements in the component's structural diagram. The canonical method for the structural synthesis of operational automata discussed in the article facilitates the optimal combination of operational elements of different types into a unified structural diagram.

Thus, the algorithm proposed in the article integrates existing methods into a cohesive framework, enhancing the efficiency of the computer system component synthesis process. This approach makes the synthesis process more structured, comprehensible, and accessible for implementation, contributing to the development of reliable, functional, and optimized systems that meet modern requirements.

Key words: *computer system components, microprogram automaton, graph-scheme of algorithm, abstract synthesis, structural synthesis, control automaton, operational automaton, functional diagram, structural diagram.*

UDC 621.316
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/37

Ushkarenko O.O.
Admiral Makarov National University of Shipbuilding

SYNTHESIS OF A POWER FACTOR CONTROL SYSTEM FOR PARALLEL OPERATION OF SYNCHRONOUS GENERATOR WITH A NETWORK

In the paper the synthesis of a controller based on fuzzy logic to stabilize the power factor through the control of excitation of a synchronous generator that operates in parallel with the network. To achieve the aim of the research a method for the synthesis of a graphic-analytical form of representation the procedure for converting information arguments in the functional structures of control systems objects as parts of autonomous electric power systems has been used. It made it possible to form a mathematical model of the power factor control system and to analyze the system by means of multilevel decomposition to get all the necessary information about the basic properties of its elements from the standpoint of a general systemic approach. In turn, the analysis of signal conversion processes at various levels of decomposition in the control system enabled to study its structural properties and draw a conclusion about the optimality of its structure. When designing a control system, methods of fuzzy logic theory have been used, which made it possible to consider to the fullest extent the phenomenon of interconnectedness and nonlinearity of processes in autonomous power stations. The model of the power station and simulation results of the regulator have been developed. On the basis of the performed modeling, a comparative analysis of the quality of power factor control using three types of controllers – a fuzzy controller, a three-position controller and a PID-controller has been carried out. It was found that the best indicators of the control quality are provided by the controller based on fuzzy logic. The use of the proposed control system makes it possible to increase the energy efficiency of the autonomous and ship electric power systems by implementing such a control strategy in which synchronous generators operate in optimal modes.

Key words: *power factor, synchronous generator, control system, fuzzy logic, simulation.*

Formulation of the problem. The complexity of modern power supply systems and the increasing requirements for the quality of electrical energy in such systems pose the challenge of a thorough study of autonomous electric power systems (AEPS), which also includes ship electric power systems (SEPS), at various design stages. A continuous increase in AEPS capacity is a regular trend. An increase in SEPS capacity, in turn, complicates the procedure of ensuring a given quality of electricity [1, p. 866].

An autonomous electric power system is a set of interconnected electric power generators, converters, distribution, regulatory and control devices, as well as connecting cables and consumers. A current challenge is to reduce the cost of electricity generation, which can be achieved by reducing the amount of fuel consumed by diesel engines, as noted in [2, p. 24]. Electricity consumers are designed to operate at nominal parameters that ensure their high efficiency factor, reliability indicators, and continuous trouble-free operation time. The modern development of computer communication systems, data processing, and automatic control systems for operating procedures and production complexes poses increased requirements for both the reliability of power supply and the quality of electricity [3, p. 6].

Analysis of recent research and publications. There are operation modes of AEPS and SEPS in which the generator operates in parallel with the network, for instance, in cogeneration units [4, p. 365]. Additionally, ship electric power systems, when docked in port, are connected to parallel operation with the coastal network. In such operation modes, it is required to solve the problem of maintaining an optimal power factor value for this mode [5, p. 19]. This problem is partially solved by using power distribution devices, though the power factor depends on both active and full power, which is also affected by the reactive power value. It is considered that the network power is much higher than that of the generator. At a given active power produced by the generator, the variation in the generator excitation current leads to a variation in the reactive power supplied to or consumed from the network [6, p. 63]. Reactive power generation is carried out both by AEPS generators and by high-voltage overhead and cable transmission lines (due to their capacitive susceptance), as well as by specially installed reactive power sources, also

called "compensating devices" [7, p. 2; 8, p. 121]. This, in turn, leads to the cosφ power factor variation. To maintain a given power factor, one should develop a control system that would manage the synchronous generator excitation and maintain the cosφ value at a desired level.

The reactive power balance is generally calculated for the highest load mode. The reactive power that is produced by power plant generators is determined by their loading with active power and the power factor (cosφ), whose nominal value is about 0.8. Generators are the basic sources of reactive power and produce about 60% of the reactive power in SEPS.

Since there is a dependence of consumed reactive power on the voltage, it is evident that there is an inverse dependence between these values. The variation in the reactive power value supplied to the unit causes a variation in the load in this unit. Therefore, the required voltage level in separate units of the electrical network can be ensured only by a separate distribution of reactive powers. Any deviation from the given distribution of reactive powers causes a deviation of the unit network voltage from the required level [9, p. 4]. The diesel-generator unit's nonlinearity requires variation of the parameters of the excitation control pulses to ensure the best control quality in various operating modes. To solve this problem, the fuzzy logic math apparatus can be used.

When solving problems of improving electricity quality in SEPS, simulation along with computational models is widely used. Currently, it is not possible to create universal SEPS models that adequately reflect their properties in various operation modes [10, p. 13]. Thus, specialized math models describing separate procedures in SEPS are considered.

At present, when solving control problems in the autonomous electric power industry, the fuzzy logic apparatus is widely used. In [11, p. 2156], the efficiency of using a controller based on fuzzy logic to control the power flow for a solar-wind energy hybrid system is shown. In [12, p. 1252], a hybrid soft-computing methodology approach for intelligent maximum power point tracking techniques of a photovoltaic system under any expected operating conditions using artificial neural network-fuzzy is considered. In [13, p. 2044], the fuzzy logic apparatus was successfully applied to increase the technical performance of multi-machine systems, which are controlled using a direct torque control method. Thus, as a result of the analysis of scientific publications, it can be concluded that fuzzy logic controllers can be successfully used to improve the quality of control and energy efficiency of autonomous and ship electric power systems. At the same time, these works do not consider the issues of controlling the reactive power of a synchronous generator during their parallel operation for a common load, which also confirms the relevance of this research.

Task statement. This research is devoted to the development of an electricity quality improvement system by controlling the power factor when a synchronous generator operates in parallel with the network. The power factor control is achieved by adjusting the synchronous generator excitation. The quality of power factor control using a three-position controller, a PID-controller, and a fuzzy logic-based controller is considered.

Currently, there are systems and improved methods for distributing active and reactive power between generators operating in parallel on a common load. Such systems are produced by many foreign companies. The feedback in these systems is provided for active and reactive powers respectively [14-17]. When there is a load variation in the AEPS and SEPS, a proportional load sharing between the generators is done. Thus, the generators' power factor may have a non-optimal value. Therefore, the problem of synthesizing a control system that maintains the generator's cosφ at a desired level is relevant.

Outline of the main material of the study. A characteristic feature of the established operating mode of the electric power system is the simultaneity of the processes of generating and consuming the same amount of power. Consequently, in the established operating mode of the AEPS, the balance of both active and reactive powers is maintained at each moment of time [18, p. 3]. When the voltage decreases to about $0.85U_{\text{rated}}$, the reactive power is reduced due to a decrease in the magnetizing capacity of induction motors and transformers. On further decrease in voltage, the induction motors making up to 60-70% of the complex load, start to slow down due to their torque reduction. The reactive power consumed by these motors is being increased. Resulting from an increase in reactive power consumption, the voltage drop in the network is increased, leading to a further decrease in the on-load voltage [19, p. 97]. Thus, it is necessary to develop a system controlling the synchronous generator excitation to maintain a given cosφ. It should also be noted that the known methods of reactive power control that are used in solar power plants, in particular, those discussed in [20, p. 1713; 21, p. 2169], are not applicable to diesel-generator power plants. This is due to the fact that inverters are used in solar power plants, and photovoltaic elements are inherently non-inertial in nature,

they do not participate in regulating voltage or reactive power [20, p. 1716], which cannot be said about synchronous generators as part of AEPS.

The synthesis of a power factor control system of a synchronous generator running in parallel with a network involves the analysis of logical and dynamic procedures of argument conversion in control systems. To do this, the method described in [22, p. 378; 23, p. 319] can be used. Using this method, a mathematical model of the power factor control system is synthesized. To determine the generator power factor value, preliminary in accordance with the analytical expression (1), the output voltage U_{out} and current I_{out} of the synchronous generator are converted using functional structures $f(U_{out},\Delta U_{out})$ and $f(I_{out},\Delta I_{out})$ into analog signals ΔU_{out} and ΔI_{out}. The maximum values of these signals do not exceed the dynamic range of the reference voltage structure $[U_j]$ of the functional structures of analog-to-digital converters f_1(ADC) and f_2(ADC). After this, the converted analog signals of the output voltage ΔU_{out} and current ΔI_{out} are converted to the structure of analog logical signals of the output voltage $[U_j]_{out}$ and the output current $[I_j]_{out}$ by comparing them with the structure of the reference voltages $[U_j]$ using functional structures of the analog-to-digital converters f_1(ADC) and f_2(ADC) that are analyzed using the functional structure $f_\varphi(\Sigma)$. Then, the procedure for calculating the power factor value is performed. At the same time, as a result of analyzing the value of the power factor in the functional structure $f_\varphi(\Sigma)$, the logical structure $[U_j]_{\Delta t}f(U,I_{out}\downarrow\uparrow 0)$ of the analog signals is formed with the duration Δt of the analog signal transition of the output voltage U_{out} and the current I_{out} of the generator through the zero level $U_{out}\downarrow\uparrow 0$.

$$\left.\begin{array}{l} U_{out}\rightarrow f(U_{out},\Delta U_{out})\rightarrow \\ \qquad\qquad f_1(\text{ADC}) \\ [U_j]\rightarrow \end{array}\right\}=\left\{\begin{array}{l}=[U_j]_{out}\uparrow \\ =[U_j]_{out}=\end{array}\right. \\ \left.\begin{array}{l} [U_j]\rightarrow \\ \qquad f_2(\text{ADC}) \\ I_{out}\rightarrow f(I_{out},\Delta I_{out})\rightarrow \end{array}\right\}\left\{\begin{array}{l}=[I_j]_{out}= \\ =[I_j]_{out}\uparrow\end{array}\right.\Bigg\} f_\varphi(\Sigma)=[U_j]_{\Delta t}f(U,I_{out}\downarrow\uparrow 0)\uparrow \quad (1)$$

Simultaneously with this procedure, in accordance with the functional structure (2), using the functional structure f_1(Sign), the structures of analog logical signals of the output voltage $[U_j]_{out}$ and the output current $[I_j]_{out}$ are analyzed, and a logical analog signal of positive value $+U^L$ is generated, corresponding to the inductive reactive power of the generator, or a logical analog signal of negative value $-U^C$ is generated, corresponding to the capacitive reactive power of the generator.

$$\left.\begin{array}{l}[U_j]_{out}= \\ [I_j]_{out}=\end{array}\right\} f_1(\text{Sign})=+U^L/-U^C \quad (2)$$

With the conversions of output voltage U_{out} and the current I_{out} of the synchronous generator, in accordance with the equation (3), reference voltage $U_{cos\varphi}$ comparison is performed that corresponds to the given cosφ, with the structure of the reference voltages $[U_j]$. This value is converted into the structure of the logical analog signals $[U_j]_{cos\varphi}$ using the functional structure f_3(ADC). Afterwards, the structure of the logical analog signals $[U_j]_{cos\varphi}$ is logically added in the functional structure of the integrator $f_1(\Sigma)$ with the structure $\downarrow[U_j]_{\Delta t}f(U,I_{out}\downarrow\uparrow 0)$ of the logical analog signals in the equation (1). As a result, both the logical structure of analog signals $[U_j]_\varepsilon$ of error ε and the logical structure of analog signals $[U_j]_{d\varepsilon}$ of the rate of change d/dn of error ε are formed.

$$\left.\begin{array}{l}\downarrow[U_j]_{\Delta t}f(U,I_{out}\downarrow\uparrow 0)= \\ U_{cos\varphi}\rightarrow \\ \quad f_3(\text{ADC}) \\ [U_j]\rightarrow\end{array}\right\}=\left\{\begin{array}{l}f_1(\Sigma) \\ =[U_j]_{cos\varphi}=\end{array}\right\}\left\{\begin{array}{l}=[U_j]_\varepsilon\uparrow \\ =f(d/dn)=[U_j]_{d\varepsilon}\end{array}\right. \quad (3)$$

When analyzing the logical structure of the analog signals $[U_j]_\varepsilon$ of the error ε in the equation (4), using the functional structure of the reactive power sign functional structure f_2(Sign), either the second logical analog signal of the positive value $+U^L_2$ corresponding to the inductive reactive power of the generator, or the second logical analog signal of the negative value $-U^C_2$ corresponding to the capacitive reactive power of the generator is formed.

$$\downarrow[U_j]_\varepsilon=f_2(\text{Sign})=(+U^L_2/-U^C_2)\uparrow \quad (4)$$

Afterwards, in accordance with the structure of the logic elements f_1(&)-AND, f_1(&)-NOT and f_1(})-OR in the equation (5), the first and second analog signals $+U^L_1$, $-U^C_1$ and $+U^L_2$, $-U^C_2$ are compared, and the corrected logical analog signals $+U^L_3/-U^C_3$ are formed.

$$\left.\begin{array}{l}\downarrow(+U^L_1/-U^C_1)=\underline{\&}_1= \\ \downarrow(+U^L_1/-U^C_1)=1= \\ \qquad \&_1= \\ \downarrow(+U^L_2/-U^C_2)=\end{array}\right\}(+U^L_3/-U^C_3)\uparrow \quad (5)$$

In parallel with the analysis of the logical structure of analog signals $[U_j]_\varepsilon$ of the error ε in accordance with the equation (4), analysis is performed using a fuzzy logic functional structure f(Fuzzy) and a sequence of

pulse signals U(Δt,T) is generated with a duration Δt and a pulse period T, as shown in (6).

$$\left.\begin{aligned}\downarrow(+U^{L}_{2}/-U^{C}_{2}) &= \\ \downarrow[U_j]_{\varepsilon} &= \\ \downarrow[U_j]_{d\varepsilon} &= \end{aligned}\right\} f(\text{Fuzzy}) = U(\Delta t,T) \qquad (6)$$

To form a mathematical model of a functionally complete logical and dynamic procedure of sequential adjustment of the synchronous generator excitation current to stabilize its reactive power, the equations (1) to (6) are combined. The resulting equation (7) is given below.

$$\begin{array}{l}
\left.\begin{array}{r} I_{out}\to f(I_{out},\Delta I_{out})\to \\ f_1(\text{ADC}) \\ [U_j]\to \end{array}\right\} \begin{array}{l} = [I_j]_{out}\uparrow \\ = [I_j]_{out} = \end{array} \\
\left.\begin{array}{r} [U_j]\to \\ f_2(\text{ADC}) \\ U_{out}\to f(U_{out},\Delta U_{out})\to \end{array}\right\} \begin{array}{l} = [U_j]_{out} = \\ = [U_j]_{out} = \end{array} \\
\left.\begin{array}{l} [I_j]_{out} = \\ [U_j]_{out} = \end{array}\right\} f_{\varphi}(\Sigma) = [U_j]_{\Delta t} f(U, I_{out}\downarrow\uparrow 0)\uparrow \\
\left.\begin{array}{l} [U_j]_{out} = \\ \downarrow[I_j]_{out} = \end{array}\right\} f_1(\text{Sign}) \left\{\begin{array}{l} = (+U^{L}_{1}/-U^{C}_{1})\uparrow \\ = \underline{\&}_1 = \end{array}\right. \\
\left.\begin{array}{l} \downarrow(+U^{L}_{1}/-U^{C}_{1}) = 1 \\ \&_1 = \\ = (+U^{L}_{2}/-U^{C}_{2}) = \end{array}\right\} = \\
\downarrow[U_j]_{\varepsilon} = f_2(\text{Sign}) \left\{\begin{array}{l} = (+U^{L}_{2}/-U^{C}_{2}) = \\ = \end{array}\right. \\
\left.\begin{array}{r} \downarrow[U_j]_{\Delta t} f(U, I_{out}\downarrow\uparrow 0) = \\ \left.\begin{array}{r} U_{\cos\varphi}\to \\ f_3(\text{ADC}) \\ [U_j]\to \end{array}\right\} = [U_j]_{\cos\varphi} = \end{array}\right\} f_1(\Sigma) \left\{\begin{array}{l} = [U_j]_{\varepsilon}\uparrow \\ = f(d/dn) = [U_j]_{d\varepsilon} = \end{array}\right. \\
\left.\begin{array}{l} = \\ \downarrow[U_j]_{\varepsilon} = \\ [U_j]_{d\varepsilon} = \end{array}\right\} f(\text{Fuzzy}) = U(\Delta t,T) = \\
\Rightarrow f(\text{Demux}) \left\{\begin{array}{l} = U_{\varphi 1.n}(\pm\Delta t_{n+1}) \\ = U_{\varphi 2.n}(\pm\Delta t_{n+1}) \\ = U_{\varphi 3.n}(\pm\Delta t_{n+1}) \end{array}\right.
\end{array} \qquad (7)$$

The functional diagram of the automatic control system based on a fuzzy logic (control system with a fuzzy regulator) [24, p. 155], which developed in accordance with equation (7), is given in Fig. 1.

The following is indicated on the diagram: Fuzzy regulator – the controller based on fuzzy logic; SC – signals converter; SGExS – synchronous generator excitation system; SG – synchronous generator; PFCB – power factor computing block; ADC – analog to digital converter. The error value "*ε*", equal to the difference between the reference and actual cosφ values, the "*dε*" error variation rate (the first derivative) and the cosφ sign are used as the controller input variables.

For each variable, linguistic terms are specified that correspond to certain ranges of input values. To determine the limiting values of the error *ε*, the probable values of the reference cosφ and the actual cosφ values have been considered. The reference value of cosφ is set, so the optimal value that can be set is cosφ=0.3..1. The actual value of cosφ can take values from 0.3 to 1. Assuming that the error *ε* has the following limits [-0.7...0.7], five terms are used for the "error" (*ε*) input variable: NH – negative high, NL – negative low, Z – close to zero, PL – positive low, PH – positive high.

For the input variable "d(error)" (*dε*), the boundaries are [-0.2..0.2]. Since the rate of change of error can

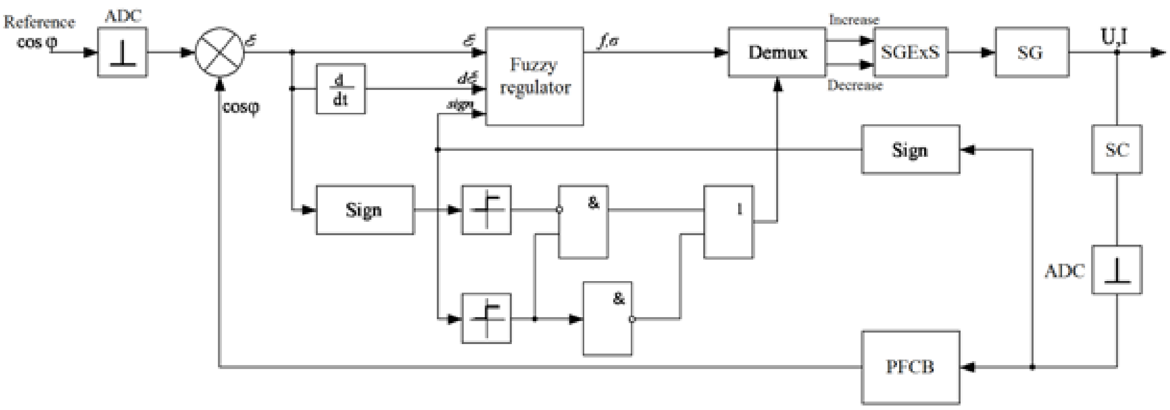


Fig. 1. Functional diagram of power factor control system with a fuzzy logic-based controller

increase and decrease, therefore, an increase in the rate of change can be taken as a positive value, and a decrease as a negative value, respectively. The following terms are defined: QD – quick decrease, SD – slow decrease, C – constant, SI – slow increase, QI – quick increase. Figure 2 represents the membership functions of the "error" and "error variation rate" variable, respectively.

The output signal frequency and duty cycle are taken as output linguistic variables. The "frequency" linguistic variable has [0..4] Hz limits and the following five terms: Z – zero value, L – low value, M1 – first mean value, M2 – second mean value, H – high frequency value. The "duty cycle" linguistic variable has [0%...100%] limits and the following four terms: Z – zero value, L – low value, M – mean value, H – high duty cycle. Fig. 3 represents the membership functions of the "frequency" and "duty cycle" variables, respectively.

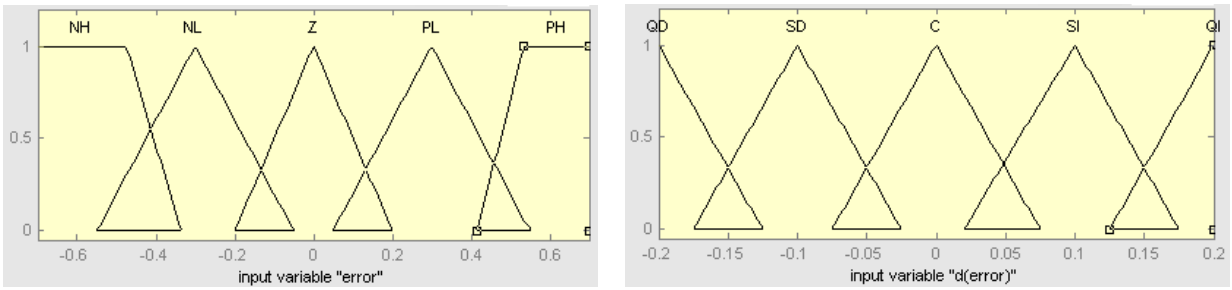
Resulting from simulation, the fuzzy output surfaces of the "frequency" and "duty cycle" dependencies on "error", "error variation rate" and "sign" have been obtained. Fig. 4, a, represents the surface of the "frequency" dependence on ε and $d\varepsilon$ for the inductive nature of the load. Fig. 4, b, represents the surface of the "duty cycle" dependence on ε and $d\varepsilon$ for the inductive nature of the load.

The surface in Fig. 4, a, is symmetrical relative to the origin point. The minimum frequency value is observed in the region ε=0 and $d\varepsilon$=0. The frequency maximums are observed in the area where the "error" and the "error derivative" are both positive high, and in the area where the "error" and the "error derivative" are both negative high. The surface in Fig. 4, b, is mirrored relative to the origin. The minimum area is observed approximately at ε=0. The Matlab model of the AEPS for the research of control processes along with an implemented fuzzy logic-based power factor controller is shown in Fig. 5.

Research on the effectiveness of using a three-position relay controller to manage power factor has been also carried out. Three-position controllers ensure proper control quality for inertial control objects with a small delay [25, p. 06016]. The block diagram of the three-position excitation control system of the synchronous generator is shown in Fig. 6.

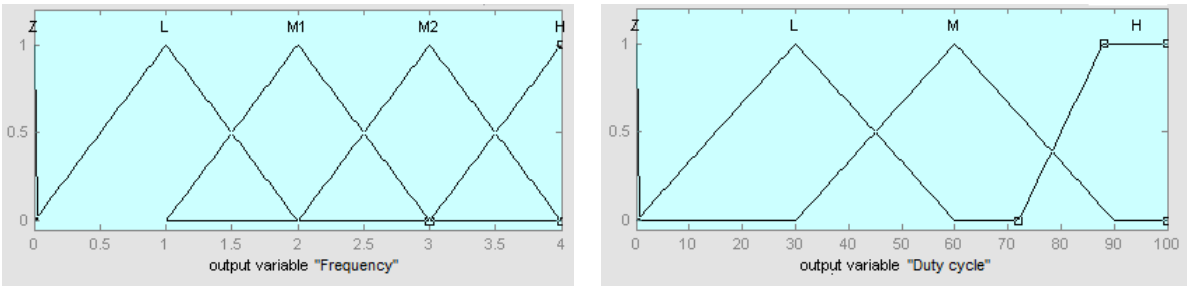
To obtain the best indicators of the power factor control quality, it is necessary to optimize the controller. Such controller parameters as the period of control pulses and their duty cycle are subject to optimization. When optimizing the controller parameters, the integral quality criterion I is minimized. Table 1 represents the values of the integral control quality criterion I at different values of the control pulse interval, as well as at different values of the generator load (25%, 50% and 75% of rated power).

A three-position controlling procedure is self-oscillatory – the controlled value in both transient and



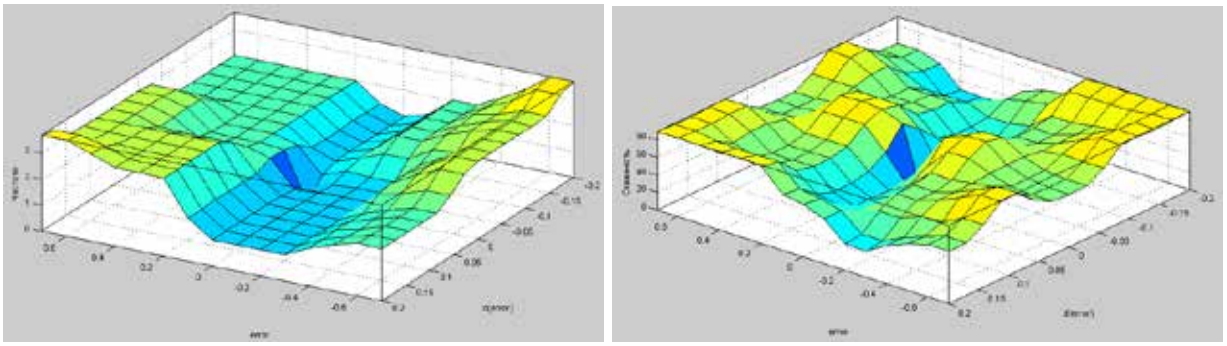
a) b)

Fig. 2. Input variables membership functions: a) "error"; b) "d(error)"



a) b)

Fig. 3. The output variables membership functions: a) "frequency"; b) "duty cycle"



a) b)

Fig. 4. The surface of the "frequency" dependence on ε and $d\varepsilon$ for the inductive nature of the load: a) frequency; b) duty cycle

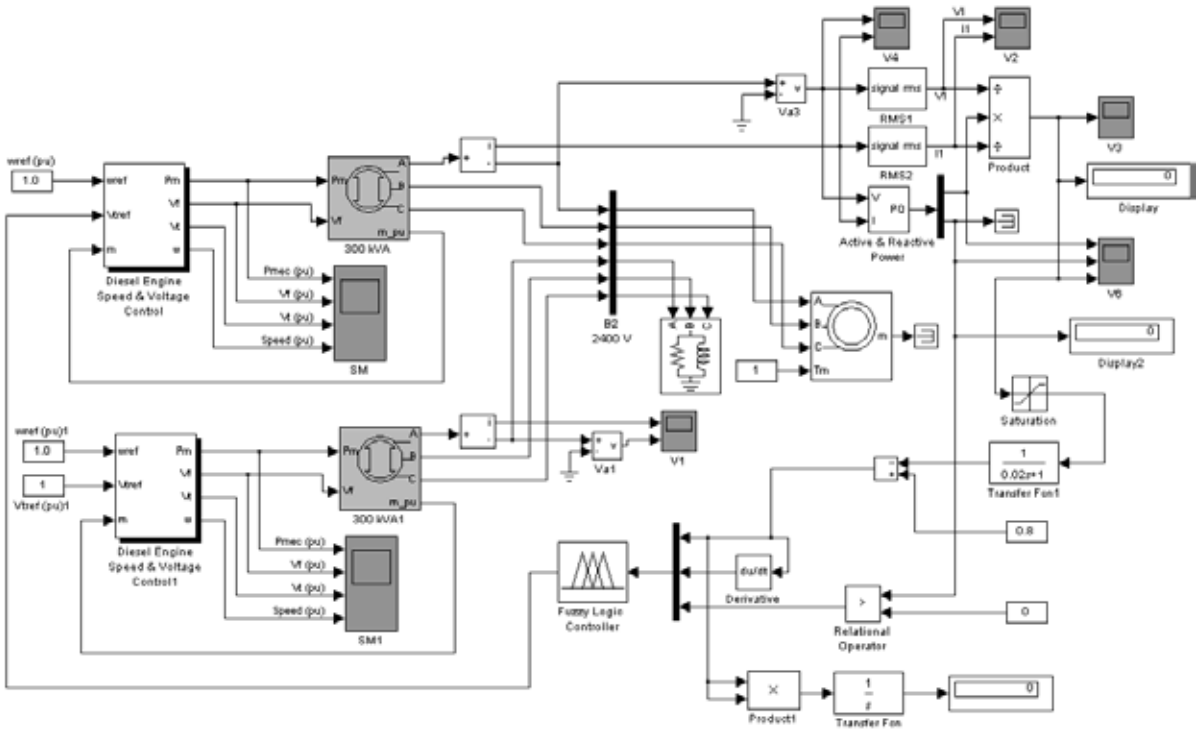


Fig. 5. AEPS Matlab model with power factor fuzzy logic-based controller

steady-state mode periodically changes relative to the reference value. Despite this, as can be seen from Table 1, there are optimal parameters of the controller when T=1s. In addition, by setting the width of the controller dead zone, it is possible to ensure stabilization of the power factor within specified limits.

In the block diagram in Fig. 6, instead of a three-position controller, a PID controller with a pulse output can be used. The output control signals of the regulator are discrete signals to increase and decrease the generator output voltage, which are supplied to the SG excitation control system. The PID controller is quite simply configured to work with a specific object and provides satisfactory stabilization

Table 1

Values of the integral control quality criterion

T, s	$I_{25\%}$	$I_{50\%}$	$I_{75\%}$
0.3	0.0585	0.0417	0.0512
0.6	0.05791	0.03534	0.05035
0.9	0.03327	0.02319	0.02627
1.2	0.04324	0.02799	0.02373
1.5	0.0463	0.0323	0.0293
1.8	0.0487	0.0342	0.0366
2.1	0.05229	0.0379	0.04442
2.4	0.05852	0.04375	0.0471
2.7	0.0596	0.0467	0.0495
3	0.06295	0.05279	0.054

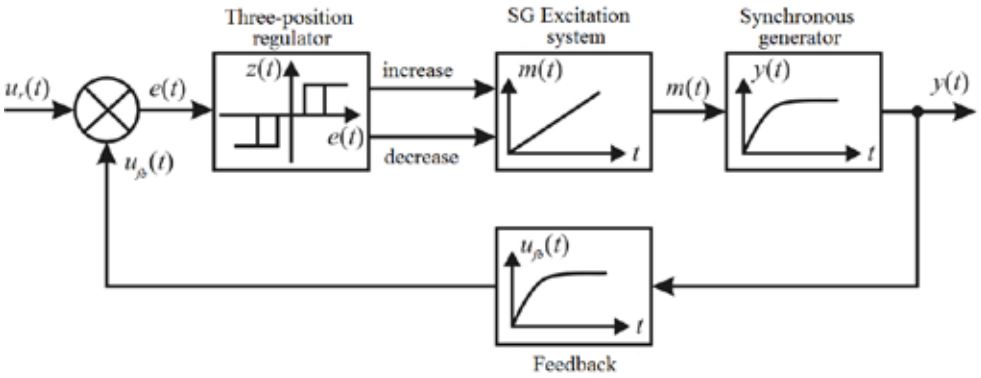


Fig. 6. The block diagram of the three-position excitation control system of the generator

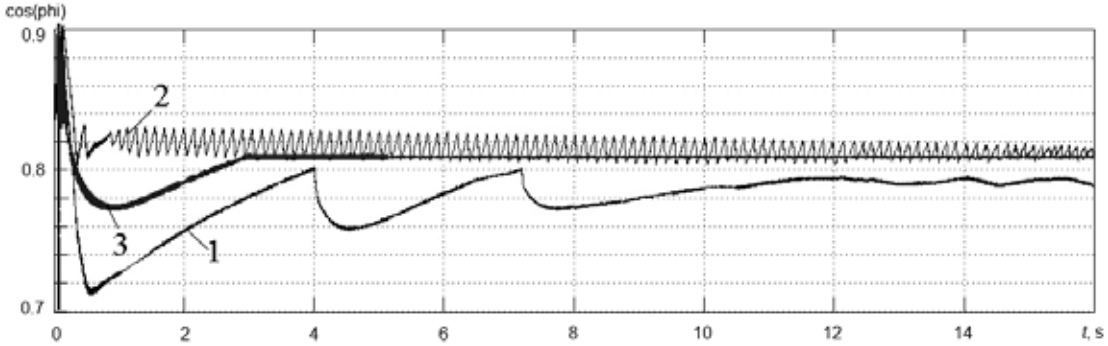


Fig. 7. Oscillograms of cosφ changes for different controllers:
1 – three-position controller; 2 – PID-controller; 3 – Fuzzy-logic based controller

of the controlled parameter with minor changes from the specified value. But with sudden changes in the operating mode of the controlled object or transition to another operating mode, the quality of the transient process in a system with a PID controller may become unsatisfactory. Figure 7 shows oscillograms of changes in the power factor of the SG, which are the result of a model study of the operation of various types of regulators for controlling the power factor of a synchronous generator during parallel operation with the network.

The simulation results demonstrated that the most effective types of controllers are fuzzy logic-based controller and a PID-controller with optimal parameter values, ensuring the fastest transient process along with the smallest cosφ deviation from the reference value.

The use of a power factor control system suggested in this paper, as well as the method of active power distribution between generators considered in [26, p. 371], allows to increase the energy efficiency of autonomous and ship electric power systems in parallel modes of operation with the network.

Conclusions. The research examined a method for controlling the excitation of a synchronous generator, in which by changing the voltage supplied to the excitation winding of the synchronous generator, stabilization of its power factor is ensured in parallel operation with the network. To effectively control the power factor of a synchronous generator, ensuring the preservation of the asymptotic (dynamic) stability of the power system, it is necessary to consider nonlinear models of power facilities and carry out the synthesis and design of control systems using methods that fully take into account the phenomena of interconnectedness and nonlinearity of processes in power facilities. In the absence of complete information about control objects, as well as information about the parameters of nonlinear models of power units, the problem under consideration can be solved using fuzzy logic. Effective structures of generator power factor controllers and a Matlab model of AEPS have been developed to study the quality of operation of different controllers. For the first time, the structure of a power factor controller using fuzzy logic has been developed to control the power factor in AEPS and SEPS. The implementation of the considered controllers based on microprocessor technology for controlling a synchronous generator will improve the energy efficiency of AEPS and SEPS by reducing the flow of reactive power between generators when they operate in parallel with the network.

Bibliography:

1. Deshmukh V.A., Sridhar B. A general review of power quality standards and terminologies. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*. 2021. No. 23. P. 864–901. DOI: 10.37896/JEISMV12.9/1278

2. Zhang S., Ren W., Liu C., Dai X. A Global Optimized Energy Management Strategy for Reducing Fuel Consumption in Diesel-Electric Hybrid Power Supply System. *In Proc. of the 6th International Conference on Electrical Engineering and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT)*. 2023. vol 1135. Springer, Singapore. P. 20–27. DOI: 10.1007/978-981-99-9307-9_3

3. Czarkowski D., Mindykowski J., Olesz M., Szmit E., Szweda M. Electric Power Quality in Isolated Systems – Requirements and Examples of Analysis. *Proc. of the Compatibility in Power Electronics Conference*. Gdansk, Poland. 2007. P. 1–6. DOI: 10.1109/CPE.2007.4296492

4. Katsaprakakis D. Cogeneration Power Plants. CRC Press, 2020. P. 365–440. DOI: 10.1201/9781315167176-5

5. Yin H, Lan H, Hong Y-Y, Wang Z, Cheng P, Li D, Guo D. A Comprehensive Review of Shipboard Power Systems with New Energy Sources. *Energies*. 2023. No. 16(5):2307. P. 1–44. DOI: 10.3390/en16052307

6. Liu B., Xu X. Optimal Reactive Power Planning Considering the Adjustment Coefficient of Generator Excitation System. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2017. No. 4. P. 63–67. DOI: 10.18280/mmep.040113

7. Sapurov M., Bielskis E., Bleizgys V., Dervinis A. Stepless Compensator of Reactive Power. *Mokslas – Lietuvos ateitis / Science – Future of Lithuania*. 2020. No. 12. P. 1–6. DOI: 10.3846/mla.2020.11441

8. Satyamsetti V., Michaelides A., Hadjiantonis A. Active Compensation of Reactive Power via STATCOM Analysis. *The 12th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER 2020).* 2020. P. 121–126. DOI: 10.1049/icp.2021.1252

9. Stanelyte D, Radziukynas V. Analysis of Voltage and Reactive Power Algorithms in Low Voltage Networks. *Energies*. 2022. Vol. 15(5):1843. P. 1–26. DOI: https://doi.org/10.3390/en15051843

10. Weinand J. M., Scheller F., McKenna R. Reviewing energy system modeling of decentralized energy autonomy. *Energy*. 2020. Vol. 203. P. 1–48. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117817

11. Vemuri S. S., Coppisetty S. R. Distributed power flow controller based on fuzzy-logic controller for solar-wind energy hybrid system. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS).* 2022. No. 13(4). P. 2148–2158. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i4.pp2148-2158

12. Aouatif I., Abdeljalil E., Hassan A., Mostafa M. A neuro-fuzzy approach for tracking maximum power point of photovoltaic solar system. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2021. No. 12(2). P. 1252–1264. DOI: 10.11591/ijpeds.v12.i2.pp1252-1264

13. Ndoumbe M. M., Nyobe Y. J. M., Eke S., Moune C. J., Biboum A., Bitjoka L. DTC with fuzzy logic for multi-machine systems: traction applications. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2021. No. 12(4). P. 2044–2058. DOI: 10.11591/ijpeds.v12.i4.pp2044-2058

14. Hosam A. Omer, Khalid O. Mahjoub, Abdelrahman A. Karrar. On the Stability of Generators Load Sharing. *IFAC Proceedings Volumes*. 2014. Vol. 47, No. 3. P. 8210–8217. DOI: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.02791

15. Savadkouhi A., Elyasichamazkoti F., Fard M. Decentralized Reactive Power Sharing in Autonomous Microgrids. *IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*. 2021. P. 75–80. DOI: 10.1109/EPEC52095.2021.9621415

16. Gupta Y., Parganiha N., Rathore A., Doolla S. An Improved Reactive Power Sharing Method for an Islanded Microgrid. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2021. Vol. 57, No. 3, P. 2954-2963. DOI: 10.1109/TIA.2021.3064528

17. Shen Yangwu, Shen Feifan, Chen Yaling, Liang Liqing, Zhang Bin, Ke Deping. Reactive Power Planning for Regional Power Grids Based on Active and Reactive Power Adjustments of DGs. *Energies*. 2018. No. 11. P. 1–17. DOI: https://doi.org/10.3390/en11061606

18. Hagemann Zita, Hager Ulf. Reactive Power Control in Distribution Networks to minimize the Reactive Power Balance at the Point of Common Coupling. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*. 2019. P. 1–5. DOI: 10.1109/ISGTEurope.2019.8905715

19. Kim Jong-Gyeum, Park Young-Jeen. Analysis for the Reactive Power Changes of Induction Machines According to Rotation Speed. *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*. 2015. No. 29. P. 96–101. DOI: 10.5207/JIEIE.2015.29.3.096

20. Muhammad Ehtesham, Muhammad Junaid. Reactive power control strategy for integrated photovoltaic inverter. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2022. No. 13(3). P. 1713–1720. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i3.pp1713-1720

21. Farah T. Noori, Turki K. Hassan. Reactive power control of grid-connected photovoltaic micro-inverter based on third-harmonic injection. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2021. No. 12(4). P. 2169–2181. DOI: 10.11591/ijpeds.v12.i4.pp2169-2181

22. Mahmoud M. Al-Suod, Ushkarenko A. O. Analytical Representation of Control Processes of Induction Motor and Synchronous Generator in Power Plants. *Jordan Journal of Electrical Engineering*. 2016. No. 2(4). P. 278–288.

23. Mahmoud M. Al-Suod, Ushkarenko A. O. Optimization of model structure of induction motor control system. *WSEAS Transactions on Power Systems*. 2017. No. 12. P. 316–323.

24. Syropoulos Apostolos, Grammenos Theophanes. *Fuzzy Logics*. 2020. P. 155–189. DOI: 10.1002/9781119445326.ch7

25. Bogdanovs Nikolay, Belinskis Romualds, Petersons Ernests, Krumins Andris, Brahmanis Arturs. Development of Temperature Process Control Method Using Smith Predictor. *E3S Web of Conferences*. 2019. No. 111. P. 06016. DOI: 10.1051/e3sconf/201911106016

26. Abdullah Eial Awwad, Alaa Al-Quteimat, Mahmoud Al-Suod, O.O. Ushkarenko, Atia AlHawamleh. Improving the accuracy of the active power load sharing in paralleled generators in the presence of drive motors shaft speed instability. *International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2021. Vol. 67(3). P. 371–377. DOI: 10.24425/ijet.2021.137822

Ушкаренко О.О. СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОЕФІЦІЄНТОМ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З МЕРЕЖЕЮ

У статті виконується синтез регулятора на основі нечіткої логіки для стабілізації коефіцієнта потужності синхронного генератора, що працює паралельно з мережею, шляхом керування збудженням генератора. Для досягнення мети дослідження використано метод синтезу графоаналітичної форми представлення процедури перетворення інформаційних аргументів функціональними структурами об'єктів систем керування як частин автономних електроенергетичних систем. Це дозволило сформувати математичну модель системи управління коефіцієнтом потужності та провести її аналіз за допомогою багаторівневої декомпозиції для отримання всієї необхідної інформації про основні властивості її елементів з позицій загального системного підходу. У свою чергу, аналіз процесів перетворення сигналів на різних рівнях декомпозиції в системі керування дав змогу вивчити її структурні властивості та зробити висновок про оптимальність її структури. При проектуванні системи управління були використані методи теорії нечіткої логіки, що дозволило повною мірою врахувати явище взаємопов'язаності та нелінійності процесів в автономних електроенергетичних системах. Розроблено модель автономної електроенергетичної системи та отримано результати моделювання роботи синтезованого регулятора коефіцієнту потужності. На основі проведеного моделювання виконано порівняльний аналіз якості регулювання коефіцієнта потужності за допомогою трьох типів регуляторів – нечіткого регулятора, трипозиційного регулятора та ПІД-регулятора. Встановлено, що найкращі показники якості регулювання забезпечує регулятор на основі нечіткої логіки. Використання запропонованої системи керування дає змогу підвищити енергоефективність електроенергетичної системи за рахунок реалізації такої стратегії керування, за якої синхронні генератори працюють в режимах, наближених до оптимальних.

Ключові слова: *коефіцієнт потужності, синхронний генератор, система керування, нечітка логіка, моделювання.*

УДК 656.073:004
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/38

Швець М.Д.
Національний університет водного господарства та природокористування України

АНАЛІЗ ВПЛИВУ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ОПТИМІЗАЦІЮ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ ВАНТАЖІВ У ТРАНСПОРТНИХ ВУЗЛАХ

У статті розглянуто впровадження сучасних технологій для оптимізації перевантажувальних процесів у транспортних вузлах. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю забезпечення ефективної взаємодії різних видів транспорту, зростанням обсягів вантажопотоків і вимогами до підвищення швидкості та надійності логістичних операцій. Установлено, що інтеграція таких технологій, як штучний інтелект, інтернет речей (IoT), робототехніка та автоматизовані системи, значно оптимізує перевантажувальні процеси, забезпечуючи точність, зниження витрат і мінімізацію ризиків, пов'язаних із людським фактором.

Метою дослідження визначено аналіз переваг сучасних технологій, виявлення ключових проблем їх впровадження, а також розроблення рекомендацій щодо їх інтеграції в транспортні вузли для покращення координації між видами транспорту. Методи дослідження включають аналіз літератури для систематизації наукових підходів, порівняльний аналіз для визначення переваг сучасних технологій над традиційними, огляд практичних кейсів успішного впровадження у провідних транспортних вузлах світу та систематизацію даних для визначення основних проблем і обмежень.

У результаті дослідження встановлено, що сучасні технології дозволяють скоротити час оброблення вантажів, оптимізувати взаємодію між морським, залізничним та автомобільним транспортом, а також знизити операційні витрати. Ідентифіковано основні проблеми, серед яких висока вартість технологій, недостатня цифровізація інфраструктури, складність інтеграції сучасних рішень у застарілі системи, дефіцит кваліфікованого персоналу та відсутність нормативно-правового регулювання.

Рекомендовано поетапне впровадження автоматизованих систем управління, використання IoT для моніторингу в реальному часі, робототехнічних рішень для автоматизації фізичних завдань і штучного інтелекту для планування логістичних операцій. Наголошено на необхідності модернізації інфраструктури, навчання персоналу та створення нормативно-правової бази для інтеграції інновацій.

Перспективи подальших досліджень включають аналіз можливостей інтеграції машинного навчання для автоматизації управління перевантажувальними процесами, вивчення економічної ефективності впровадження технологій у різних масштабах транспортної інфраструктури та оцінювання їх впливу на екологічні аспекти логістичної галузі.

Ключові слова: *сучасні технології, транспортні вузли, штучний інтелект, інтернет речей, робототехніка, автоматизація, оптимізація логістики.*

Постановка проблеми. Оптимізація перевантаження вантажів у транспортних вузлах є важливим завданням у сучасній логістиці, оскільки ці вузли виконують ключову роль у забезпеченні ефективного переміщення товарів між різними видами транспорту та регіонами. Зростання обсягів вантажоперевезень, викликане глобалізацією та розвитком міжнародної торгівлі, створює значний тиск на інфраструктуру транспортних вузлів, що вимагає впровадження інноваційних технологій. Застарілі методи управління перевантаженням вантажів призводять до зниження продуктивності, підвищення витрат, затримок і збільшення ризику помилок.

Наукова значущість цієї проблеми полягає в необхідності розроблення моделей і алгоритмів, які дозволяють інтегрувати сучасні технології, як-от штучний інтелект, інтернет речей (IoT), робототехніка та автоматизовані системи, для підвищення ефективності роботи транспортних вузлів. Практичне значення полягає у впровадженні технологій, які дозволяють зменшити час простою, оптимізувати використання ресурсів та забезпечити стабільність логістичних процесів. Таким чином, дослідження впливу сучасних технологій на процес перевантаження вантажів є актуальним і спрямованим на розв'язання як наукових, так і практичних завдань, які стосуються модернізації логістичної інфраструктури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосування сучасних технологій у транспорт-

них вузлах залишається ключовим напрямом наукових досліджень, спрямованих на підвищення ефективності логістичних операцій. Зокрема, в дослідженні О. Коростіна висвітлено впровадження штучного інтелекту для оптимізації морських перевезень, зокрема його здатність прогнозувати завантаження маршрутів та знижувати операційні витрати [1]. Аналіз доводить перспективність застосування штучного інтелекту для підвищення продуктивності перевантажувальних процесів.

О. М. Мельник акцентує увагу на технологічних аспектах перевезення негабаритних вантажів, зокрема на значенні автоматизації для підвищення точності та зменшення ризиків [2]. У роботі зазначено необхідність інтеграції інноваційних рішень для розв'язання специфічних логістичних завдань.

Аналіз механізації навантажувально-розвантажувальних робіт, проведений М. Швецем, демонструє значне скорочення часу операцій завдяки автоматизації [3]. Результати підкреслюють важливість модернізації обладнання для забезпечення швидкості виконання процесів.

У роботі Р. Ісковича-Лотоцького досліджено використання робототехнічних систем у мобільному транспорті. Автор акцентує на їх внеску в підвищення безпеки та зниження фізичного навантаження [4], розкриваючи переваги робототехніки в складних умовах експлуатації.

Питання використання інформаційних технологій і моделювання для синхронізації перевантажувальних операцій у контейнерних терміналах детально розглянуто в дослідженні О. Кічкіної [5]. Застосування таких підходів сприяє забезпеченню точності й узгодженості між транспортними засобами.

Аналіз операційного управління транспортними перевезеннями, виконаний І. Пішеніним, розкриває питання координації між видами транспорту для підвищення ефективності агропромислових перевезень [6].

Алгоритми для автоматизації вантажних станцій, розроблені Г. Вангом, дозволяють суттєво скоротити витрати та час на виконання операцій. Це рішення сприяє стабільності логістичних процесів [7].

Цифровізація портової логістики, як підкреслює М. Хейккіля, значно зменшує час перевантаження та оптимізує процеси завдяки інноваціям, впровадженим у «розумних портах» [8].

На мультимодальних перевезеннях акцентує увагу І. Дерпіч, пропонуючи стратегії зниження витрат і викидів CO_2 через удосконалення логістичних маршрутів [9].

Дослідження, проведене Дж. Моніосом, демонструє перспективність автоматизації контейнерних терміналів, що сприяє підвищенню ефективності перевантажувальних операцій [10].

Аналіз автономних систем управління, здійснений К. Далмейєром, показує їхню здатність забезпечувати високу адаптивність транспортних хабів до змінних умов, що підтверджує доцільність автоматизації для динамічних середовищ [11].

Сучасні підходи до управління міськими вантажними перевезеннями розглянуто Р. Ельбертом, К. Фрідріхом, П. Обермаєром і К. Руландом, які наголошують на важливості інтеграції цифрових технологій у міські логістичні системи [12].

Стратегії адаптації до збоїв у мультимодальних мережах запропоновані М. Ахмаді. Ці підходи спрямовані на стабілізацію логістичних процесів і забезпечення їх стійкості [13].

Рекомендації щодо оптимізації перевантажувальних процесів, розроблені Р. Г. Королем, стосуються вдосконалення взаємодії різних видів транспорту в транспортних вузлах, що сприяє підвищенню ефективності логістичних операцій [14].

Концептуальні моделі для оптимізації перевезень пропонує Т. Бектас (T. Bektas), наголошуючи на важливості інтеграції сучасних технологій для забезпечення точності та швидкості логістичних операцій [15].

Дослідження демонструють значний вплив сучасних технологій на оптимізацію перевантажувальних операцій у транспортних вузлах. Інтеграція штучного інтелекту, IoT, робототехніки та автоматизованих систем сприяє підвищенню ефективності, стабільності й точності логістичних процесів. Водночас акцент зроблено на необхідності адаптації цих рішень до локальних умов для максимального результату.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на значний прогрес у впровадженні сучасних технологій у транспортних вузлах, залишаються нерозв'язаними питання щодо інтеграції інновацій у процеси перевантаження вантажів. Зокрема, бракує комплексного порівняння традиційних і сучасних підходів, що враховує специфіку роботи різних видів транспорту (залізничного, морського, автомобільного). Відсутність узагальнених методик оцінювання ефективності ускладнює визначення

оптимальних умов для застосування інноваційних рішень.

Іншою невирішеною частиною є недостатня увага до практичної взаємодії таких технологій, як штучний інтелект, IoT та робототехніка, в межах транспортних вузлів. Не досліджено, як ці технології можуть бути інтегровані в застарілі системи управління для забезпечення плавного переходу до автоматизованих процесів.

Крім того, проблеми нормативно-правового регулювання залишаються відкритими. Зокрема, стандартизація процедур і вимоги до інтеграції технологій залишаються недостатньо розробленими, що створює ризики затримки цифрової трансформації.

Запропоноване дослідження спрямоване на заповнення цих прогалин через систематичний аналіз порівняльних характеристик традиційних і сучасних підходів, вивчення технічної та операційної сумісності інноваційних рішень, а також розроблення рекомендацій для забезпечення ефективної інтеграції технологій. Результати допоможуть створити більш адаптивні та ефективні транспортні вузли, здатні відповідати сучасним викликам логістики.

Постановка завдання. Мета статті полягає в дослідженні впливу сучасних технологій на оптимізацію процесів перевантаження вантажів у транспортних вузлах, зокрема аналізі їх ефективності, впровадження та перспектив подальшого розвитку.

Завдання статті:

1) провести аналіз традиційних та сучасних підходів до перевантаження вантажів із метою визначення переваг інноваційних технологій, включаючи штучний інтелект, автоматизовані системи, робототехніку та IoT, у контексті їх впливу на ефективність логістичних операцій;

2) дослідити ключові проблеми та обмеження впровадження сучасних технологій у транспортних вузлах, приділяючи особливу увагу їх взаємодії з різними видами транспорту під час організації перевантажувальних операцій;

3) розробити рекомендації щодо інтеграції інноваційних рішень для оптимізації роботи транспортних вузлів з урахуванням особливостей інфраструктури, технічних і нормативно-правових аспектів.

Виклад основного матеріалу. Процеси перевантаження вантажів у транспортних вузлах є одними з найважливіших складників сучасної логістичної інфраструктури, оскільки вони безпосередньо впливають на швидкість і ефективність переміщення товарів у глобальних ланцюгах поставок. Зростання обсягів міжнародної торгівлі та підвищення вимог до точності й оперативності доставлення сприяють необхідності вдосконалення традиційних методів оброблення вантажів. Сучасні технології, як-от робототехніка, автоматизація, інтернет речей (IoT) і штучний інтелект, пропонують нові підходи, які значно змінюють способи організації перевантаження, забезпечуючи високий рівень продуктивності та зниження витрат.

Традиційні підходи до перевантаження вантажів, що базуються на механічних процесах і значній залежності від ручної праці, нині вже не можуть повною мірою відповідати сучасним викликам. Їх використання супроводжується високою ймовірністю людських помилок, затримками та великими витратами на персонал. Водночас інноваційні технології дозволяють інтегрувати автоматизовані системи, що мінімізують ці недоліки. Впровадження автоматизації та цифрових рішень відкриває можливості для точнішого прогнозування, оптимізації ресурсів і підвищення безпеки перевантажувальних процесів. Порівняння характеристик традиційних і сучасних підходів наведено в таблиці 1.

Натепер упровадження сучасних підходів до перевантаження вантажів значно змінило логістичний ландшафт. Наприклад, у портах Роттердама та Сінгапура роботи-крани та сенсорні системи автоматично розпізнають тип контейнерів, оптимально розподіляючи їх для подальшого транспортування [12, с. 189]. В Україні деякі логістичні центри почали використовувати системи на базі IoT для моніторингу вантажопотоків у реальному часі, що дозволяє зменшити витрати та уникнути затримок [16].

Сучасні технології також відкрили нові можливості для аналітики. Наприклад, у великих логістичних вузлах використовуються цифрові двійники, які дозволяють моделювати сценарії роботи вузла, виявляти слабкі місця та вдосконалювати процеси. У порівнянні з традиційними методами це дає змогу знизити ризик людських помилок, мінімізувати втрати та підвищити конкурентоспроможність логістичних підприємств. Таким чином, інтеграція інноваційних технологій є ключовим фактором розвитку транспортної інфраструктури в сучасних умовах.

Інновації радикально змінюють підхід до перевантаження вантажів у транспортних вузлах, роблячи ці процеси більш ефективними, безпечними та економічно вигідними. Інтегра-

Таблиця 1

Порівняння традиційних та сучасних підходів до перевантаження вантажів у транспортних вузлах

Критерій	Традиційний підхід	Сучасний підхід
Обладнання	Механічні крани, вилкові навантажувачі, ручні механізми	Роботизовані крани, автоматизовані транспортні системи, роботизовані конвеєри, дрони для інспекції
Технологічні рішення	Відсутність автоматизації, мінімальне використання цифрових систем	Використання штучного інтелекту, інтернету речей (IoT), цифрових двійників, систем прогнозування навантаження
Вплив людського фактора	Залежність від фізичної праці, висока ймовірність помилок через втому або недостатню кваліфікацію	Мінімізація впливу людського фактора, автоматизація рутинних завдань, підвищення точності завдяки алгоритмам штучного інтелекту
Ефективність оброблення	Низька, процеси повільні, значний час простою техніки та персоналу	Висока, оброблення вантажів відбувається швидше, зменшення часу простою, зростання пропускної здатності вузлів
Економічні аспекти	Високі витрати на оплату праці, обмежена можливість зменшення витрат	Зменшення операційних витрат через автоматизацію, можливість прогнозування та оптимізації витрат у реальному часі
Екологічний складник	Використання застарілих машин із високим рівнем викидів CO_2, мало екологічних ініціатив	Енергоефективні технології, електрифіковані пристрої, зменшення екологічного впливу
Моніторинг процесів	Візуальний контроль операторів, ризик пропуску критичних помилок	Інтеграція IoT для відстеження вантажів у реальному часі, аналітика великих даних для виявлення проблем на ранніх етапах
Безпека	Часті нещасні випадки через ручну роботу та недостатній контроль техніки	Підвищена безпека завдяки автоматизованим системам, що знижують ризик для персоналу
Гнучкість	Низька гнучкість у разі збільшення обсягів вантажів або зміни умов роботи	Висока гнучкість, адаптація до зростання обсягів вантажопотоків завдяки програмованим алгоритмам і масштабованим системам

Джерело: сформовано автором на підставі [1; 3; 5; 8; 9; 13; 15]

ція штучного інтелекту, автоматизованих систем, робототехніки та інтернету речей (IoT) дозволяє розв'язувати складні логістичні завдання з мінімальним втручанням людини. Штучний інтелект оптимізує розподіл ресурсів та аналізує великі обсяги даних у реальному часі, забезпечуючи точність прогнозування навантаження. Автоматизовані системи пришвидшують оброблення вантажів, мінімізуючи вплив людського фактора. Робототехніка використовується для виконання рутинних та фізично важких операцій, як-от завантаження і розвантаження контейнерів. Технології IoT забезпечують безперервний моніторинг і обмін даними між різними компонентами транспортних систем, що підвищує прозорість та координацію (табл. 2).

Сучасні технології значно змінюють процеси перевантаження вантажів, забезпечуючи автоматизацію та підвищення ефективності на кожному етапі. Наприклад, використання штучного інтелекту дозволяє прогнозувати обсяги вантажопотоків, аналізуючи історичні дані та поточні умови. Це дозволяє заздалегідь підготувати відповідне обладнання та персонал, уникнувши перевантаження або простоїв. Під час перевантаження автоматизовані системи зчитують дані з RFID-тегів чи QR-кодів на контейнерах, ідентифікуючи їх вміст і місце призначення [8]. Це забезпечує швидке сортування вантажів і їх розподіл на відповідні транспортні засоби або склади.

Робототехніка активно застосовується у фізичних процесах перевантаження. Роботизовані крани та навантажувачі оснащені датчиками IoT, що дозволяє їм виконувати завдання з високою точністю без участі людини. Наприклад, у портових терміналах роботи автоматично розпізнають розміри та вагу контейнерів, вибираючи оптимальний спосіб їх переміщення.

Інтернет речей забезпечує зв'язок між усіма компонентами системи. Уявімо, що вантаж прибуває до терміналу: сенсори IoT автоматично повідомляють систему про його прибуття, відстежують переміщення та контролюють температурні режими чи інші умови зберігання. У разі виникнення проблем (наприклад, пошкодження контейнера) система одразу повідомляє оператора або автоматично вживає заходів, наприклад, перенаправляє вантаж у зону огляду.

Сучасні транспортні вузли виконують важливу функцію узгодження роботи різних видів транспорту, як-от морський, залізничний, автомобільний і авіаційний, для забезпечення безперебійного перевезення вантажів. Використання штучного інтелекту, інтернету речей (IoT), автоматизованих систем і робототехніки дозволяє значно підвищити ефективність та узгодженість логістичних операцій. Завдяки інтеграції цих технологій можливо оптимізувати перевантажувальні процеси, скоротити час передачі вантажів між видами транспорту, знизити операційні витрати та мінімізувати ризики помилок, спричинених людським фактором (табл. 3).

У порту Роттердама застосування штучного інтелекту дозволяє автоматично узгоджувати графіки прибуття суден і відправлення вантажів залізничним і автомобільним транспортом. Це забезпечує зниження затримок під час передачі контейнерів і рівномірне завантаження інфраструктури порту.

Сенсори IoT, установлені на контейнерах у порту Сінгапура, дозволяють у реальному часі відстежувати їх переміщення між морськими, залізничними і автомобільними зонами [17]. Ця система забезпечує синхронізацію між видами транспорту, зменшуючи час пошуку та передачі вантажів.

Автоматизовані системи управління, впроваджені у вузлах стикування в Гамбурзі, дозволяють оперативно перенаправляти вантажі між залізничними платформами і автомобільними транспортними засобами залежно від обсягу роботи. Це скорочує простої і підвищує продуктивність вузлів.

Робототехніка активно використовується в логістичних центрах Amazon [18, с. 104–105], де роботи виконують перевантаження контейнерів між автомобільними платформами і залізничними вагонами. Це мінімізує втручання людини і забезпечує стабільну роботу систем навіть під час пікових навантажень.

Сучасні транспортні вузли зіштовхуються з численними проблемами та обмеженнями під час упровадження інноваційних технологій, спрямованих на оптимізацію перевантажувальних процесів. Однією з основних проблем є висока вартість обладнання та програмного забезпечення, що обмежує доступ до них для малих і середніх вузлів, особливо в країнах із низьким рівнем економічного розвитку. Значні капіталовкладення також потрібні для модернізації інфраструктури, адже більшість вузлів функціонує на базі застарілих технологій, несумісних із сучасними рішеннями [12].

Недостатній рівень цифровізації транспортних вузлів ускладнює інтеграцію таких технологій, як сенсори інтернету речей або системи штучного інтелекту, що призводить до додаткових витрат на адаптацію інфраструктури.

Кадровий дефіцит є ще одним вагомим обмеженням. Нестача спеціалістів із досвідом роботи з автоматизованими системами і штучним інтелектом підвищує тривалість і витрати на навчання персоналу, що теж гальмує впровадження інновацій.

Юридичні обмеження, зокрема відсутність чіткої нормативно-правової бази, створюють правову невизначеність для підприємств. Це зменшує

Таблиця 2

Застосування сучасних технологій у перевантаженні вантажів у транспортних вузлах

Технологія	Основні функції	Переваги в застосуванні
Штучний інтелект	Аналіз даних у реальному часі, прогнозування навантаження, оптимізація маршрутів, виявлення помилок у логістичних процесах	Зниження часу оброблення даних, підвищення точності операцій, можливість адаптації до змін у режимі реального часу
Автоматизовані системи	Управління роботизованими кранами, автоматичне сортування вантажів, інтеграція з іншими цифровими системами	Прискорення перевантажувальних операцій, зменшення витрат на робочу силу, підвищення продуктивності транспортних вузлів
Робототехніка	Виконання завантажувально-розвантажувальних робіт, транспортування контейнерів, інспекція складських приміщень	Мінімізація фізичного навантаження на працівників, зменшення аварійних ситуацій, стабільність роботи в складних умовах
Інтернет речей (IoT)	Моніторинг вантажів у реальному часі, забезпечення зв'язку між транспортними засобами, автоматичне виявлення пошкоджень або відхилень у системі	Підвищення точності та швидкості оброблення даних, зниження ризиків утрат, можливість інтеграції із системами штучного інтелекту для аналізу

Джерело: сформовано автором на підставі [1; 4; 5; 7; 8; 12; 13]

Таблиця 3

Інтеграція сучасних технологій у взаємодію різних видів транспорту в транспортних вузлах

Технологія	Функції у взаємодії видів транспорту	Очікувані результати від застосування
Штучний інтелект	Координація графіків прибуття і відправлення вантажів між морським, залізничним та автомобільним транспортом	Скорочення часу передачі вантажів, уникнення затримок через нерівномірність завантаження, підвищення ефективності роботи вузлів
Інтернет речей (IoT)	Синхронізація місцезнаходження вантажів у реальному часі для швидкої передачі між видами транспорту	Підвищення прозорості процесів, мінімізація втрат вантажів, прискорення оброблення інформації про вантажопотоки
Автоматизовані системи	Управління потоками вантажів у вузлах стикування, забезпечення пріоритетності передачі між видами транспорту	Зниження операційних витрат, забезпечення безперебійності процесів, прискорення оброблення вантажів
Робототехніка	Виконання фізичних перевантажувальних операцій з високою точністю та мінімізацією людської праці	Підвищення точності та швидкості завантаження, зменшення ризику пошкодження вантажів, забезпечення стабільної продуктивності

Джерело: сформовано автором на підставі [5; 8; 9; 10; 11; 12; 14]

зацікавленість інвесторів і ускладнює стандартизацію використання сучасних технологій.

Технічна складність інтеграції нових рішень у застарілі системи часто вимагає повної реконструкції інфраструктури. Це значно збільшує витрати та може спричиняти зупинку діяльності транспортного вузла під час модернізації.

Отже, оптимізація роботи транспортних вузлів за допомогою інноваційних технологій вимагає комплексного підходу, який охоплює технічні, організаційні та управлінські аспекти. Серед ключових напрямів виокремлено впровадження автоматизованих систем управління перевантажувальними процесами. Інтеграція штучного інтелекту дозволяє аналізувати великі обсяги даних, прогнозувати завантаження вузлів і розподіляти ресурси, що сприяє скороченню часу простоїв обладнання та підвищенню ефективності операцій.

Для забезпечення прозорості логістичних процесів важливо впроваджувати інтернет речей (IoT), який забезпечує моніторинг стану вантажів і обладнання в реальному часі. Сенсори IoT дозволяють оперативно відстежувати переміщення контейнерів, ідентифікувати пошкодження або технічні збої та швидко реагувати на проблеми.

Робототехніка стає важливим складником оптимізації перевантажувальних операцій. Використання роботів для виконання рутинних завдань знижує потребу у фізичній праці, забезпечуючи стабільність і високу точність виконання операцій, особливо у вузлах із високою інтенсивністю роботи.

Модернізація інфраструктури транспортних вузлів є необхідною умовою для інтеграції сучасних технологій. Цифрові платформи для централізованого управління операціями об'єднують усі компоненти логістичної системи в єдину екосистему. Наприклад, інтеграція систем управління складом (WMS) з автоматизованими кранами мінімізує час переміщення вантажів і запобігає затримкам.

Для успішного впровадження інновацій необхідно проводити навчання персоналу. Це включає тренінги та симуляційні модулі, які адаптують працівників до роботи в умовах використання нових технологій. Інвестиції в розвиток кваліфікації персоналу є критично важливими для розкриття потенціалу автоматизованих систем.

Додатковим елементом інтеграції є розроблення нормативно-правової бази, яка включає стандартизацію технологічних процесів, регулювання використання автоматизованих систем і визначення відповідальності між людиною та технологіями.

Комплексний підхід до інтеграції інновацій, що включає автоматизацію, модернізацію інфраструктури, навчання персоналу та нормативне регулювання, дозволяє досягти стабільності, гнучкості та ефективності роботи транспортних вузлів, відповідаючи динамічним викликам сучасної логістики.

Висновки. Проведений аналіз дозволив установити, що сучасні технології суттєво змінюють підходи до організації взаємодії різних видів транспорту в транспортних вузлах, сприяючи підвищенню ефективності, швидкості та надійності логістичних процесів. Інтеграція штучного інтелекту, інтернету речей (IoT), робототехніки та автоматизованих систем дозволяє оптимізувати використання ресурсів, забезпечувати узгодженість між транспортними

системами, знижувати витрати та мінімізувати людський фактор. Особливу увагу приділено координації графіків роботи між морським, залізничним та автомобільним транспортом, що забезпечує рівномірне завантаження вузлів і зменшення часу простоїв.

Водночас запровадження цих технологій супроводжується низкою проблем і обмежень. Серед основних бар'єрів виділено високу вартість обладнання, недостатній рівень цифровізації інфраструктури, технічні труднощі інтеграції нових рішень у застарілі системи, дефіцит кваліфікованого персоналу та відсутність нормативно-правового регулювання. Ці фактори обмежують можливості широкомасштабної інтеграції інноваційних технологій та уповільнюють процес цифрової трансформації.

Рекомендовано поетапне впровадження автоматизованих систем управління, використання IoT для моніторингу в реальному часі, робототехнічних рішень для автоматизації фізичних операцій, а також систем штучного інтелекту для прогнозування та планування вантажопотоків. Для підвищення ефективності взаємодії між видами транспорту необхідно модернізувати інфраструктуру, створити цифрові платформи для інтеграції даних і забезпечити навчання персоналу. Важливим є також розроблення нормативно-правової бази для стандартизації використання сучасних технологій у транспортних вузлах.

Перспективи подальших досліджень зосереджені на вивченні можливостей інтеграції машинного навчання для автоматизації управління взаємодією різних видів транспорту, аналізі економічної ефективності впровадження інноваційних рішень у вузлах різного масштабу, а також оцінюванні їх впливу на екологічну складову частину транспортної логістики. Це сприятиме створенню адаптивних і стійких логістичних систем у динамічних умовах сучасного ринку.

Список літератури:

1. Коростін О.О. Оптимізація маршрутів морських перевезень за допомогою штучного інтелекту: аналіз можливостей та викликів. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво.* Луцьк, 2024. Вип. 56. С. 31-38. DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-03

2. Мельник О.М. Технологічні аспекти перевезення негабаритних вантажів. Транспортно-технологічне забезпечення процесів доставки та обробки негабаритних вантажів. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки.* 2020 2020. Т. 2, № 2. С. 168–174. URL: https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-2/29 (дата звернення: 26.12.2024).

3. Швець М. Д., Кірічок О. Г., Познаховський В. А. Механізація та організація виробничого процесу при виконанні навантажувально-розвантажувальних робіт. *Наукові нотатки.* 2018. Вип. 62. С. 226–229.

4. Сучасні технології у вантажно-розвантажувальних роботах на мобільному автомобільному транспорті / Р. Д. Іскович-Лотоцький та ін. *Вібрації в техніці та технологіях.* 2020. № 4 (99). С. 59–66. DOI: https://doi.org/10.37128/2306-8744-2020-4-7

5. Кічкіна О. І., Кічкін О. В. Управління процесами взаємодії видів транспорту у контейнерному терміналі на підставі імітаційного моделювання та інформаційних технологій. *Наукові вісті Далівського університету.* 2022. № 23. DOI: https://doi.org/10.33216/2222-3428-2022-23-3

6. Пішенін І. К. Операційне управління транспортними перевезеннями в АПК. *Економіка та суспільство*. 2018. С. 208–212. URL: https://chmnu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/06/Ekonomika-i-suspilstvo-14-2018.pdf#page=208 (дата звернення: 16.12.2024).

7. Improved multi-dimensional bee colony algorithm for airport freight station scheduling / H. Wang et al. *arXiv preprint*. arXiv:2207.11651. 2022. URL: https://arxiv.org/abs/2207.11651 (date of access: 16.12.2024).

8. Heikkilä M., Saarni J., Saurama A. Innovation in Smart Ports: Future Directions of Digitalization in Container Ports. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, no. 12. P. 1925. URL: https://doi.org/10.3390/jmse10121925 (date of access: 25.12.2024).

9. Pursuing Optimization Using Multimodal Transportation System: A Strategic Approach to Minimizing Costs and CO2 Emissions / I. Derpich et al. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, no. 6. P. 976. URL: https://doi.org/10.3390/jmse12060976 (date of access: 25.12.2024).

10. Electric vehicle routing problem with single or multiple recharges / T. Erdelić et al. *Transportation Research Procedia*. 2019. Vol. 40. P. 217–224. URL: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.033 (date of access: 25.12.2024).

11. Dalmeijer K., Van Hentenryck P. Optimizing Freight Operations for Autonomous Transfer Hub Networks. *arXiv preprint.* arXiv:2110.12327. 2021. URL: https://arxiv.org/abs/2110.12327 (date of access: 16.12.2024).

12. Elbert R., Friedrich C., Obermaier P., and Ruhland K. (eds). *Urban Freight Transportation Systems*. Elsevier, 2019. URL: https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=M5myDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=+MODERN+TECHNOLOGIES+CARGO+HANDLING+IN+TRANSPORT+HUBS+book&ots=fszCsF77Y9&

sig=jLh9hVhtRaZm-mjjOJW7Gpf97X0&redir_esc=y#v=onepage&q=MODERN%20TECHNOLOGIES%20CARGO%20HANDLING%20IN%20TRANSPORT%20HUBS%20book&f=false (date of access: 16.12.2024).

13. Ahmady M., Eftekhari Yeghaneh Y. Optimizing the Cargo Flows in Multi-modal Freight Transportation Network Under Disruptions. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering.* 2022. Vol. 46. No. 1. P. 453–472. DOI: https://doi.org/10.1007/s40996-021-00631-w (date of access: 16.12.2024).

14. Korol R. H. Perfection of the Process of Interaction of Various Types of Transport in the Far Eastern Transport Hubs. In: Solovev D. B., Savaley V. V., Bekker A. T., Petukhov V. I. (eds.) *Proceeding of the International Science and Technology Conference «FarEastCon 2021». Smart Innovation, Systems and Technologies.* Springer, Singapore. 2022. Vol. 275. P. 154–164. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-8829-4_12

15. Bektaş T. Freight logistics, distribution and transport Concepts. *Freight Transport and Distribution*. 2017. P. 1–14. URL: https://doi.org/10.1201/9781315173962-1 (date of access: 26.12.2024).

16. Інновації в галузі логістики. Міністерство з питань стратегічних галузей промисловості України. Державна інноваційна фінансово-кредитна установа, 2024. URL: https://sfii.gov.ua/innovacii-v-galuzi-logistiki/ (дата звернення: 16.12.2024).

17. Cil A. Y., Abdurahman D., Cil I. Internet of Things enabled real time cold chain monitoring in a container port. *Journal of Shipping and Trade*. 2022. Vol. 7, no. 1. URL: https://doi.org/10.1186/s41072-022-00110-z (date of access: 26.12.2024).

18. Wen J., He L., Zhu F. Swarm robotics control and communications: Imminent challenges for next generation smart logistics. *IEEE Communications Magazine*. 2018. Vol. 56. No. 7. P. 102–107.

Shvets M.D. ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF MODERN TECHNOLOGIES ON THE OPTIMISATION OF CARGO TRANSSHIPMENT IN TRANSPORT HUBS

The article considers the introduction of modern technologies to optimise transhipment processes at transport hubs. The relevance of the study is driven by the need to ensure effective interaction between different modes of transport, the growth of cargo flows and the requirements to increase the speed and reliability of logistics operations. It has been established that the integration of technologies such as artificial intelligence, the Internet of Things (IoT), robotics and automated systems significantly optimises transhipment processes, ensuring accuracy, reducing costs and minimising risks associated with the human factor.

The purpose of the study is to analyse the benefits of modern technologies, identify key problems in their implementation, and develop recommendations for their integration into transport hubs to improve coordination between modes of transport. The research methods include literature analysis to systematise scientific approaches, comparative analysis to determine the advantages of modern technologies over traditional ones, a review of practical cases of successful implementation in the world's leading transport hubs, and data systematisation to identify key problems and limitations.

The study found that modern technologies can reduce cargo handling time, optimise the interaction between sea, rail and road transport, and reduce operating costs. The author identifies the main problems, including the high cost of technology, insufficient digitalisation of infrastructure, difficulty in integrating modern solutions into outdated systems, shortage of qualified personnel and lack of regulatory framework.

The author recommends the gradual introduction of automated control systems, the use of IoT for real-time monitoring, robotic solutions for automating physical tasks, and artificial intelligence for planning logistics operations. The need to modernise infrastructure, train staff and create a regulatory framework for the integration of innovations is emphasised.

Prospects for further research include analysing the possibilities of integrating machine learning to automate the management of transhipment processes, studying the cost-effectiveness of technology implementation at different scales of transport infrastructure, and assessing their impact on the environmental aspects of the logistics industry.

Key words: *modern technologies, transport hubs, artificial intelligence, Internet of Things, robotics, automation, logistics optimisation.*

УДК 004.4:378
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/39

Ясінський А.М.
ПВНЗ «Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука»

Джунь Й.В.
ПВНЗ «Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука»

Кундос М.Г.
ПВНЗ «Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука»

Соловей Л.Я.
ПВНЗ «Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука»

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛІНІЙНОЇ РЕГРЕСІЇ ТА НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ЗАСОБАМИ БІБЛІОТЕКИ NEURALNET

У статті проведено порівняльний аналіз двох підходів до прогнозування даних: лінійної регресії та нейронної мережі, створеної за допомогою бібліотеки Neuralnet. Дослідження спрямоване на оцінку точності прогнозів кожної моделі з використанням середнього квадратичного відхилення як основного показника ефективності. Вивчено вплив архітектури нейронної мережі, параметрів навчання, а також розміру та характеристик вхідних даних на точність прогнозування. Особливу увагу приділено порівнянню відхилень прогнозованих результатів від реальних даних, що дозволяє оцінити практичну цінність кожної моделі для задач, що потребують високої точності. Методика дослідження включає побудову та тренування моделей на одних і тих самих наборах даних, що забезпечує коректність порівняння. Для лінійної регресії використано традиційні статистичні підходи до моделювання залежності між змінними, тоді як для нейронної мережі реалізовано багатошаровий перцептрон із різними кількостями прихованих шарів і нейронів. Аналіз результатів проводився з урахуванням змін точності моделей залежно від складності їхньої архітектури та обчислювальних ресурсів, необхідних для навчання.

Отримані результати демонструють, що нейронна мережа може досягати більш високої точності у прогнозуванні складних нелінійних залежностей, тоді як лінійна регресія є більш ефективною для задач із лінійними взаємозв'язками між змінними. Також відзначено, що обчислювальні витрати на навчання нейронної мережі значно перевищують витрати для лінійної регресії, що слід враховувати при виборі методу для реальних задач. Результати дослідження можуть бути корисними для фахівців у галузі аналізу даних, машинного навчання та розробки програмного забезпечення, а також для студентів і науковців, які займаються вивченням методів прогнозування.

Стрімкий прогрес у комп'ютерних технологіях прокладає шлях до створення нейрокомп'ютерів шостого покоління. Експерти зі штучного інтелекту прогнозують, що ці системи будуть функціонувати за принципами, подібними до роботи біологічних нейронних мереж, зокрема людського мозку. Це зумовлює зростання попиту на нейромережеві технології, які дедалі активніше впроваджуються у різні галузі та сфери застосування.

Ключові слова: *Neuralnet, лінійна регресія, машинне навчання, штучна нейронна мережа, нормалізація даних, середньо квадратичне відхилення (MSE).*

Постановка проблеми. Лінійна регресія є одним із найбільш поширених і зрозумілих методів прогнозування, але її можливості обмежені у моделюванні складних нелінійних залежностей. Натомість нейронні мережі здатні працювати з такими залежностями завдяки своїй багатошаровій архітектурі та здатності до нелінійного перетворення даних. Проте використання нейронних мереж вимагає значних обчислювальних ресурсів і складної конфігурації, що може бути не завжди виправданим.

Таким чином, постає проблема оцінки точності та ефективності цих двох підходів у контексті реальних задач прогнозування. Необхідно визначити, у яких випадках лінійна регресія є достатньою, а в яких нейронна мережа виправдовує свої

обчислювальні витрати. Для цього важливо провести порівняння моделей за єдиним критерієм, наприклад, середнім квадратичним відхиленням (MSE), яке дозволяє оцінити відхилення прогнозованих значень від реальних.

Рішення цієї проблеми сприятиме більш обґрунтованому вибору моделей у задачах прогнозування та значущості як для наукових досліджень, так і для прикладного використання в різних сферах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні аспекти машинного навчання та аналізу даних для прогнозування були досліджені різними вітчизняними та зарубіжними науковцями.

У статті [1, с. 25-30] розглядаються різні методи машинного навчання, що застосовуються для прогнозування, кожен з яких охарактеризовано за обраними критеріями з метою порівняння їх ефективності у прогнозуванні.

Робота [2] надає доступне введення в основні концепції машинного навчання. Автор розглядає різні типи машинного навчання, а також основні етапи процесу машинного навчання, такі як підготовка даних, вибір моделі, навчання, оцінка та впровадження. Дослідження також підкреслює важливість розуміння основних понять і процесів машинного навчання для ефективного застосування цих методів у реальних задачах.

Автори книги [3, с. 30] надають детальне введення в основи проектування та навчання нейронних мереж, крім того, особливу увагу приділено методам навчання для як прямих мереж (включаючи багатошарові та радіально-базисні мережі), так і рекурентних мереж.

У дослідженні [4, с. 83] розглядається застосування машинного навчання та аналізу даних, як ключових інструментів для прогнозування із застосування регресійного аналізу в програмному середовищі R-Studio.

Ряд авторів стверджують, що Neuralnet є оптимальним методом для моделювання будь-яких неперервних та нелінійних функцій, які не припускають жодних умов до вхідної інформації [5, с. 8].

Розроблений авторами С. Фрітчем, Ф. Ґюнтером, М. Н. Райтом, М. Сулінгом і С. М. Мюллером документ [6, с. 1-15] є технічною документацією до пакету Neuralnet для моделювання даних та роботи з нейронними мережами в середовищі R.

Постановка завдання. Метою статті є порівняння результатів прогнозування отриманих із використанням лінійної регресії та нейронної мережі. Оцінити точність кожної із моделей опрацювання даних, створеної з використанням різних технологій, за результатами обчислення середнього квадратичного відхилення (MSE). Оцінити наскільки прогнозовані результати далекі від реальних даних.

Виклад основного матеріалу. Нейронна мережа (або штучна нейронна мережа, ШНМ) може бути реалізована у вигляді програмного або апаратного забезпечення. Її будують за аналогією з біологічними нейронними мережами, які складаються з нервових клітин живих організмів. Основна ідея полягає в моделюванні процесів, що відбуваються в мозку.

Оцінка моделі є ключовим етапом у процесі її розробки. Для моделей, метою яких є прогнозування, MSE є надійним індикатором точності. Вона показує, наскільки близько лінія регресії проходить до набору точок даних. MSE виступає функцією ризику, яка вимірює втрати на основі квадратичної похибки.

Обчислення MSE передбачає визначення середнього значення квадратів різниць між спостережуваними та передбаченими значеннями. Це метрика, яка кількісно оцінює середню квадратну різницю між цими значеннями. У випадку, коли модель ідеальна, значення MSE дорівнює 0. Однак зі зростанням помилок у моделі зростає і значення MSE. Середньоквадратичну похибку також часто називають середньоквадратичним відхиленням (MSD). Цей показник є одним із ключових критеріїв для оцінки точності алгоритмів прогнозування.

У 2022 та 2023 роках відбувався справжній бум у розвитку генеративного штучного інтелекту. Стрічками технологічних медіа ширилися новини про ChatGPT та Midjourney, багато технологічних гігантів інтегрували AI у свої продукти, а дослідники з OpenAI забили на сполох, попередивши правління про небезпеку, яку становить нове відкриття у галузі штучного інтелекту. Велику роль у розвитку нейронних мереж, зокрема двох найпопулярніших, зіграла архітектура нейронних мереж Transformer. Розроблена в Google для машинного перекладу, вона замінила не настільки ефективну архітектуру LSTM.

Сучасні середовища програмування забезпечують користувачів надійними засобами аналізу даних. Проте, щоб продемонструвати переваги нейронних мереж при опрацюванні даних ми пропонуємо використати середовище RStudio. Мова програмування R має достатньо засобів для проведення регресійного аналізу даних через використання добре відпрацьованих алгоритмів,

а також з використанням внутрішніх функцій та спеціалізованої бібліотеки нейронної мережі.

У відкритих ресурсах мережі Інтернет можна отримати доступ до великої кількості різнопланових даних. Для отримання даних ми використали платформу [7]. Дані на цьому сайті зберігаються у форматі csv файлів. Запропонований набір даних можна використати для побудови моделі та дослідницького аналізу та вивчення робочих процесів машинного навчання.

На наступному етапі опрацювання було розділено дані на навчальну та тестову частини. Це дозволило сформувати модель лінійної регресії на навчальній сукупності та перевірити її на тестовому наборі. Чітких вимог, щодо пропорцій сформованих таким чином наборів даних, не існує. В ході дослідження проводились обчислення із декількома наборами даних. Суттєвого впливу на кінцеві результати не спостерігалось.

На етапі побудови моделі лінійної регресії використовувалась внутрішня функція RStudio. Параметрами функції lm() є перелік імен полів на яких будується лінійна регресія та масив даних. В цій частині роботи обчислювали прогнозовані результати та знаходили значення параметра MSE.

```
lm.fit <- glm(Grades ~ Socioeconomic.Score +
Study.Hours + Sleep.Hours + Attendance...,
data=real_data)
summary(lm.fit)
pr.lm <- predict(lm.fit, test_data)
pr.lm
MSE.lm <- sum((pr.lm – test_data$Grades)^2)/
nrow(test_data)
MSE.lm
```

Результатом роботи цієї частини алгоритму є значення MSE для моделі реалізованої на використанні функції lm().

```
> MSE.lm
[1] 20.28519
```

Однією з найважливіших процедур при формуванні нейронної мережі є нормалізація даних. Це передбачає коригування даних до загального масштабу, щоб точно порівнювати прогнозовані та фактичні значення. Опрацювання не нормалізованих даних призводить до того, що прогнозоване значення залишається незмінним для всіх спостережень, незалежно від вхідних значень.

З метою є підвищення точності прогнозування та нівелювання впливати окремих даних на передбачення через великий діапазон числових значень проводиться процедура нормалізації або масштабування. Мова програмування R дозволяє провести нормалізацію двома способами – масштабування за допомогою функції мови R, або перетворення даних за допомогою техніки max/min нормалізації.

Технологія нормалізації min-max має певні недоліки, вона має тенденцію доводити дані до середнього значення. Щоб досягти кращих результатів використана також вбудована функція масштабування

```
dfNormZ <- as.data.frame( scale(df[1:2] ))
```

В середовищі RStudio для побудови нейронних мереж можна використовувати велику кількість пакетів. Серед них можна виділити такі, як Neuralnet та Nnet. Деякі автори рекомендують створювати моделі нейромереж із застосуванням пакетів AMORE, kohonen та інші. Пакет Nnet при побудові нейромережі дозволяє використовувати тільки один проміжний шар. Навчання нейронної мережі проводилось із різними значеннями параметрів hidden та linear.output.

```
library(neuralnet)
n <- names(real_data_nor)
f <- as.formula(Grades ~ Socioeconomic.Score +
Study.Hours + Sleep.Hours + Attendance...)
nn <- neuralnet(f, data = real_data_nor,
hidden = c(6,4,2), linear.output=T)
plot(nn))
```

Параметр нейронної мережі hidden задає конфігурацію внутрішніх шарів моделі. Цей параметр визначає кількість нейронів в кожному прихованому шарі. Наприклад, hidden = c(6, 4, 2) означає, що в першому прихованому шарі є 6 нейронів, у другому – 4, а в третьому – 2. Встановленої методики для розрахунку кількості скритих шарів нейронної моделі не існує. Оптимізуючи параметри розробленої мережі за параметром MSE вводились параметри (5,3,2), (5,4,2), (6,4,3). Зміни параметра hidden відображались на показниках помилки (Error) та кількості кроків (Steps). Для формування кінцевих результатів дослідження встановлено hidden = c(6,4,2). Графічне відображення отриманої моделі штучної мережі, розробленої засобами RStudio, подано Рис. 1.

Чорні лінії відображають зв'язки між кожним шаром і вагами на кожному з'єднанні, тоді як сині

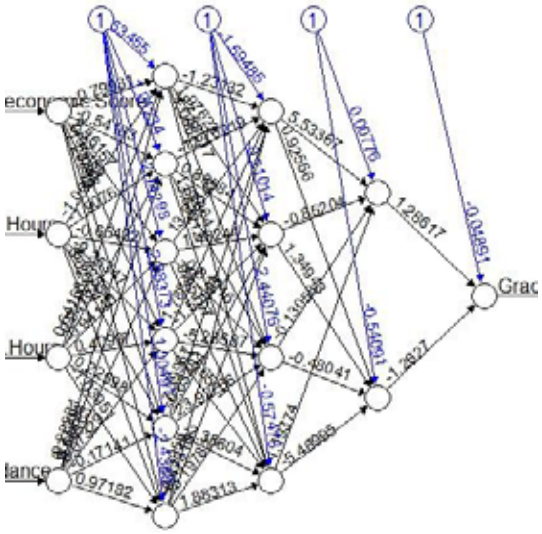


Рис. 1. Графічне відображення моделі штучної мережі

лінії вказують на доданий на кожному кроці член зміщення. Зміщення можна розглядати як **перехоплення** (intercept) лінійної моделі.

Параметр функції linear.output=T задає вимогу побудувати регресійну функцію у вигляді лінійного рівняння. Зміна цього параметру на linear.output=F не змінює суттєво характеристик ефективності моделі побудованої на конкретних даних нашого дослідження.

Мережа є, по суті, «чорною скринькою», тому детально описати процес навчання неможливо. За результатами навчання можна стверджувати, що алгоритм навчання успішно збігся, а отже, модель готова до використання.

Для оцінки ефективності досліджуваної нейронної мережі, побудованої із використанням бібліотеки Neuralnet, обчислено MSE використовуючи нормалізовані дані.

```
pr.nn <- compute(nn,test_data_nor[,1:4])
pr.nn_ <- pr.nn$net.
result*(max(mydani$Grades)-min(mydani$Grades))
+min(mydani$Grades)
test_data.r <- (test_data_
nor$Grades)*(max(mydani$Grades)-
min(mydani$Grades)) +min(mydani$Grades)
MSE.nn <- sum((test_data.r – pr.nn_)^2)/
nrow(test_data_nor)
print(paste('MSE_line_funk=',MSE.lm,', MSE_
Naure_net=', MSE.nn))
```

За результатами роботи цієї частини дослідження отримано важливі показники для оцінки розроблених моделей:

«MSE_line_funk=20.285186341023, MSE_Naure_net=1.34815824403662»

При значній величенні MSE точки даних сильно розкидані від центрального моменту. Якщо дані щільно групуються навколо середнього значення то MSE буде невеликим (середнім) значенням. У такому випадку значення даних розподілені нормально, менше помилок, відсутня асиметрія. Менше значення MSE вказує на менші похибки та краще оцінювання результатів прогнозування.

За нашим дослідженням нейронна мережа перевершує лінійну модель у прогнозуванні Grades. Такий результат залежить від обраного способу поділу даних на навчальну та тестову вибірки.

Для підтвердження результатів дослідження проведемо швидку перехресну перевірку отриманих моделей, будуємо графіки прогнозованих даних (Рис. 2), отриманих з використанням лінійної регресії та моделі штучної нейронної мережі та проведено їх якісний аналіз.

```
par(mfrow=c(1,2))
plot(test_data$Grades, pr.nn_, col='blue',
main='Результати мережі', pch=20, cex=0.5)
abline(reg = lm(test_data$Grades ~ pr.nn_,
mydani))
legend('bottomright', legend='Naure_
net',pch=18,col='blue', bty='n')
plot(test_data$Grades, pr.lm, col='green',
main='Результати лінійн._функц', pch=20,
cex=0.7)
abline(reg = lm(test_data$Grades ~ pr.lm,
mydani))
legend('bottomright', legend='Line_f',
pch=20,col='green', bty='n', cex=.95)
plot(test_data$Grades, pr.nn_,
col='blue',main='Мережа', pch=20,cex=0.7)
points(test_data$Grades,pr.lm,col='green',
pch=18,cex=0.7)
abline(reg = lm(test_data$Grades ~ pr.nn_,
mydani))
legend('topright', legend=c('Naure_net',
'Line_f'), pch=18,col=c('blue','green'))
```

Ліва частина Рис. 2 відображає сукупність прогнозованих результатів отриманих при використанні моделі нейронної мережі побудованої із використанням бібліотеки Neuralnet. Точки щільно прилягають до лінії регресійного рівняння, візуально підтверджують лінійну залежність. Середнє квадратичне відхилення обчислення становить 1.34815824403662.

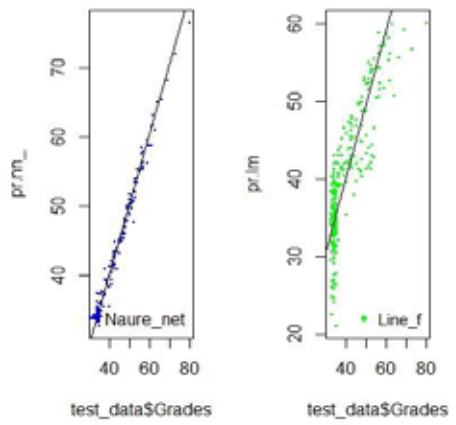


Рис. 2. Графіки прогнозованих даних отриманих з використанням моделі штучної нейронної мережі та лінійної регресії

Множини точок правої частини Рис. 2 відображає прогнозовані результати отримані за допомогою моделі побудованої із використанням внутрішньої функції lm. На графіку спостерігається значне розсіювання та слабо виражена лінійна залежність. Середнє квадратичне відхилення обчислення становить 20.285186341023.

Висновки. У статті було проведено порівняльний аналіз ефективності прогнозування даних за допомогою двох підходів: лінійної регресії та нейронної мережі, реалізованих із використанням бібліотеки Neuralnet. Отримані результати дозволяють зробити висновки, що нейронна мережа продемонструвала вищу точність прогнозування у випадках, коли вхідні дані мали складну структуру та містили нелінійні залежності. Водночас лінійна регресія краще працює на простих наборах даних із лінійними зв'язками між змінними.

Практика оцінки ефективності моделей прогнозування передбачає використання ряду методик, алгоритмів та технологій, що може стати завданням наступних досліджень.

Список літератури:

1. Бажан Т. О. Порівняльний аналіз методів машинного навчання для побудови прогнозів. *Сучасний захист інформації.* 2024. № 4(60). С. 125–130. https://doi.org/10.31673/2409-7292.2024.040013

2. Brownlee J. Data Preparation for Machine Learning: data cleaning, feature selection, and data. Machine Learning Mastery. 2020. 398p. URL: https://machinelearningmastery.com

3. Martin T. Hagan, Howard B. Demuth, Mark Hudson Beale, Orlando De Jesús Neural network design. 2014. 800p.

4. Пінцак І. Використання машинного навчання та аналізу даних для прогнозування тенденцій у електронній комерції. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2024. № 1. С. 80–88.

5. Xiang Li, Ding Qian, Sun J.Q. Remaining Useful Life Estimation in Prognostics Using Deep Convolution Neural Networks. Reliability Engineering and System Safety Elsevier, vol. 172(C). p.1-11.

6. Stefan Fritsch, Frauke Guenther, Marvin N. Wright, Marc Suling, Sebastian M. Mueller Package 'neuralnet'. 2022. 15p. URL: https://cran.r-project.org/web/packages/neuralnet/neuralnet.pdf

7. Data science competition platform and online community for data scientists and machine learning practitioners under Google LLC. URL: https://www.kaggle.com/ (дата звернення: 06.01.2025)

Yasinsky A.M., Dzhun I.V., Kundos M.G., Solovei L.Ya. COMPARATIVE ANALYSIS OF FORECASTING USING LINEAR REGRESSION AND NEURAL NETWORK USING THE NEURALNET LIBRARY

The article presents a comparative analysis of two approaches to data forecasting: linear regression and a neural network created using the Neuralnet library. The study is aimed at assessing the accuracy of each model's predictions using the mean square deviation as the main performance indicator. The influence of the neural network architecture, training parameters, and the size and characteristics of the input data on the accuracy of the forecast is studied. Particular attention is paid to comparing the deviations of the predicted results from real data, which allows assessing the practical value of each model for tasks requiring high accuracy. The research methodology includes building and training models on the same data sets, which ensures the correctness of the comparison. For linear regression, traditional statistical approaches to modeling the dependence between variables were used, while for the neural network, a multilayer perceptron with different numbers of hidden layers and neurons was implemented. The analysis of the results was carried out taking into account changes in the accuracy of the models depending on the complexity of their architecture and the computational resources required for training.

The results obtained demonstrate that the neural network can achieve higher accuracy in predicting complex nonlinear dependencies, while linear regression is more effective for problems with linear relationships between variables. It is also noted that the computational costs of training a neural network significantly

exceed the costs for linear regression, which should be taken into account when choosing a method for real-world problems. The results of the study can be useful for specialists in the field of data analysis, machine learning and software development, as well as for students and scientists studying forecasting methods.

Rapid progress in computer technology paves the way for the creation of sixth-generation neurocomputers. Artificial intelligence experts predict that these systems will operate on principles similar to those of biological neural networks, including the human brain. This is driving the demand for neural network technologies, which are increasingly being implemented in various industries and applications.

Key words: *Neuralnet, linear regression, machine learning, artificial neural network, data normalization, mean square error (MSE).*

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 664.681:635.42:635.112
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/40

Василенко О.О.
Сумський національний аграрний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАНИКІВ ЯКОСТІ ЗБИВНИХ БОРОШНЯНИХ ВИРОБІВ ЗІ ЗНИЖЕНИМ ВМІСТОМ ГЛЮТЕНУ

Стаття присвячена розробці нової рецептури бісквітного виробу з низьким вмістом глютену на основі нетрадиційних інгредієнтів – порошку буряка та пасти з мангольду. У статті розкрито, що ці рослини, багаті на біологічно активні сполуки, такі як флавоноїди, алкалоїди та беталаїни, раніше не застосовувались у виробництві безглютенових бісквітів. Визначено, що для зниження кількості глютену в рецептурі пшеничне борошно з низьким вмістом білка (8,2%) було частково замінено на буряковий порошок у різних концентраціях (5-20%). Крім того, з метою зменшення алергенності яєчні продукти частково замінили пастою з мангольду (10-25%). Встановлено, що нова рецептура дозволяє не тільки зменшити вміст глютену та яєць, але й збагатити бісквіти беталаїнами, рослинним білком, харчовими волокнами та мінеральними речовинами. Експериментально підтверджено, що оптимальне співвідношення інгредієнтів було визначено шляхом аналізу харчової та біологічної цінності бісквітів з різним вмістом бурякового порошку та пасти мангольду. Хімічний склад (вологість, білки, жири, вуглеводи, харчові волокна, зола) та енергетична цінність готових виробів були ретельно досліджені. З'ясовано, що додавання 15% бурякового порошку та 20% пасти мангольду (зразок 3) сприяє значному покращенню харчових властивостей бісквіту: зниженню вмісту жиру на 36,51%, збільшенню кількості харчових волокон на 538,46% та золи на 712,5%. При цьому енергетична цінність зразка 3 була на 15,76% нижчою, ніж у контрольного зразка. Органолептичні властивості бісквітів, збагачених буряковим порошком та пастою мангольду, були оцінені з метою визначення найкращих показників. Отримані результати підтвердили можливість перспективність використання бурякових напівфабрикатів як замінників глютену та алергенів у кондитерській промисловості.

Ключові слова: *збивні борошняні вироби, сушені овочі, випічка, дієтичне харчування, якісні характеристики, біологічно активні речовини.*

Постановка проблеми. Борошняні кондитерські вироби є одними з найперспективніших об'єктів розробки технологій харчових продуктів функціонального призначення, оскільки вони широко використовують у харчуванні населення, як України так і всього світу. Зацікавленість до кондитерських виробів останнім часом зросла, основними факторами, що сприяють збільшенню попиту на споживання кондитерських та хлібобулочних виробів, є урбанізація, низька собівартість, тривалий термін зберігання, хороший смак і легке їх транспортування. Зазвичай, населенням планети вживає кондитерські і хлібобулочні вироби, такі як хліб, бісквіти та печиво.

Потрапляння глютена в організм стає причиною порушення процесу всмоктування поживних елементів (макро- та мікроелементів, вітамінів), погіршення загального стану людини. Внаслідок цього порушується робота шлунково-кишкового тракту. Удосконалення технологій виробництва виробів зі зниженим вмістом глютену на основі інгредієнтів, що вносяться, розширить асортимент таких продуктів харчування вітчизняного виробництва і дозволяє їх зробити доступними для широкого кола споживачів. Проблема виробництва низькоглютенової та безглютенової продукції залишається об'єктом підвищеної уваги з боку виробників та споживачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Харчова цінність переважної більшості видів борошняних кондитерських виробів, що виробляються за традиційними рецептурами, не відповідає сучасним вимогам науки про харчування. Вона відрізняється високим вмістом простих вуглеводів, жирів і не містить достатньої кількості білка, вітамінів, макро- та мікроелементів. Тому основним завданням при виробленні цієї групи продукції є підвищення харчової та біологічної

цінності, використання доступної для виробництва сировини та збереження основних технологічних показників, відомих для споживача. Такі продукти розробляються з метою коригування та покращення харчового статусу населення в рамках державної політики у галузі здорового харчування. Оптимізація рецептур харчових продуктів є ефективним методом їх вдосконалення [1].

Безглютенова дієта є єдиним ефективним засобом лікування осіб, які страждають на розлади, пов'язані з непереносимістю глютену, і має тенденції до зростання та зміщує фокус на новий ринок безглютенових продуктів. Найбільша частка ринку безглютенових продуктів (47,5%) припадає на Європу [2].

Було проведено широкі дослідження для можливості заміни глютеновмісної сировини іншими інгредієнтами, а також текстуруючими добавками, які надають тісту унікальну в'язкопружність і як результат якість кондитерським виробам [3].

Багато видів безглютенових кондитерських виробів були доповнені широким спектром добавок, таких як гідроколоїди, підкислювачі, емульгатори, розпушувачі, консерванти та ароматизатори або смакові добавки, а також білки і цукри до 81 і 87%, відповідно [4]. Хоча вищезазначені інгредієнти оптимізують якість виробів, вони, як правило, ще більше знижують харчову цінність [5]. Звичайне борошно, що природно містять глютен (наприклад, пшениця, ячмінь і жито) можуть бути деглютиновані за допомогою технологій біопроцесу, наприклад, додавання вибраної закваски здатне детоксикувати імуногенні пептиди за допомогою дії ферменти, що виділяються лактобактеріями [6]. Однак, у цих композиціях безглютенових виробів відсутні харчові волокна та біоактивні сполуки, які обґрунтовано необхідні для нормальної життєдіяльності організму. Джерелами харчових волокон та золи у кондитерських виробах слугують насіння, шкірка, кісточки, стебла та серцевина фруктів та овочів, які можуть додати біологічну цінність продукту [7].

Комерційна цінність будь-якого кондитерського виробу визначається його текстурою, сенсорними та органолептичними властивостями, які в основному зазнають впливу через фізико-хімічні властивості інгредієнтів [8]. Найбільш поширеним джерелом харчових волокон є рослинна сировина, а саме коренеплоди, в тому числі буряк різних видів. Буряк столовий є унікальним джерелом харчових волокон – розчинних та нерозчинних, білка та мікро- і макроелементів. Висока біологічна цінність порошку буряка обумовлена оптимальним поєднанням вітамінів, мінеральних речовин і добре засвоюваних вуглеводів (глюкози, фруктози, сахарози). Борошно, отримане з бобових, коренеплодів та зернових продуктів, може використовуватися, як джерела рослинного білка, мікро- та макроелементів і харчових волокон для збагачення вмісту поживних речовин у кондитерських виробах [9]. Дефіцит клітковини, заліза, кальцію, антиоксидантів і фолієвої кислоти в кондитерських виробах, особливо в виробах з високим вмістом цукру, таких як бісквіти, можна компенсувати, замінивши частину борошна на буряковий порошок, щоб зробити його більш здоровим і поживним. Буряк широко використовується у кулінарії завдяки високому вмісту поживних речовин [10]. Дефіцит повноцінного білка та мінеральних речовин у харчових виробах зменшується за рахунок використання у рецептурі паст з гідробіонтів збагачених мікроелементами [11]. Коренеплоди буряку та його листя багаті на харчові волокна, мінерали та вітаміни [12]. Буряк містить велику кількість біоактивних таких як каротиноїди, фенольні сполуки, сапоніни, бетаїн, беталаїни, поліфеноли та флавоноїди, які також присутні в порошку буряка, та мають антиоксидантні властивості. Бетаїн буряку є триметильним похідним амінокислоти гліцину, який сприяє м'язовій витривалості, силі та потужності [13].

Досліджено вплив заміни частини пшеничного борошна на горохове та властивості здобного тіста та кексів. Оскільки білковий склад горохового борошна відрізняється від складу пшеничного борошна, вплив його включення до рецептури на утворення тіста та властивості кексів відстежувалося на різних етапах виготовлення кексів. Результати висвітлюють фізико-хімічні механізми і схематичне зображення явищ, що відбуваються на різних стадіях змішування залежно від порядку включення інгредієнтів. Заміна 20% і 40% пшеничного борошна гороховим борошном забезпечило найкращі показники структури кексів [14].

Борошно з каштану, порошку моркви і нуту має високі поживні та функціональні властивості і може бути включене в рецептури бісквітів. Інноваційні дослідження були спрямовані на оцінку ефекту складання сумішей цих видів борошна з пшеничним борошном при приготуванні бісквітів. Оцінено щільність, мікроструктуру та в'язкість тіста, а також питомий об'єм, консистенцію та розжовуваність бісквітів. Борошно з нуту зменшило щільність тіста і збільшило в'язкість порівняно з пшеничним борошном, тоді як каштa-

нове борошно та порошок моркви зменшили в'язкість і не вплинули на щільність [15].

Враховуючи платоспроможність населення, для виготовлення бісквітів доцільно використовувати доступні інгредієнти з порівняно високою біологічною цінністю. Перспективним у технології бісквітів є використання порошку та пасти з буряка, що має високий вміст рослинних білків, харчових волокон, золи та пігментів (беталаїн). Вченими не проводилося подібне дослідження для оцінки переваг застосування бурякового порошку та пасти мангольду у кондитерських виробах, таких як бісквіти.

Постановка завдання. Мета дослідження – розробка борошняних кондитерських виробів зі зниженим вмістом глютену, збагачених порошком буряку та пастою мангольду.

Для досягнення поставленої мети виконувались наступні завдання:

1. Дослідити хімічний склад пшеничного борошна, бурякового порошку, курячих яєць та пасти мангольда, як основних інгредієнтів бісквітів зі зниженим вмістом глютену.

2. Розробити рецептури бісквітів зі зниженим вмістом глютену з порошком буряка та пастою мангольду.

3. Дослідити вплив введення бурякового порошку та пасти мангольду на хімічний склад бісквітів зі зниженим вмістом глютену за показниками вмісту вологи, білка, жиру, вуглеводів, харчових волокон, золи та енергетичної цінності.

4. Оцінити органолептичні властивості кожної рецептурної композиції бісквітів зі зниженим вмістом глютену з порошком буряка та пастою мангольду визначеної в ході експерименту.

Виклад основного матеріалу. Для порівняння основних рецептурних компонентів бісквітів, а саме бурякового порошку, пшеничного борошна та пасти мангольда, проаналізовано їх хімічний склад, що наведено в таблиці 1. Дані в таблиці 1 свідчать про те, що вміст жиру у порошку буряку у 2 рази, а у пасті мангольду у 5 разів менший ніж у пшеничному борошні. Часткова заміна пшеничного борошна на порошок буряка дозволить зменшити енергетичну цінність бісквітів. Порошок буряка містить у 1,4 рази більше білка, у 3,4 рази золи та у 2,7 рази харчових волокон, ніж пшеничне борошно. Порошок буряка містить багато цукрів, оскільки середня кількість цукрів у буряку складає 8,47-8,98% [35], а концентрація значно збільшується при сушінні. Таким чином, порошок буряка раціонально вводити до рецептури борошняних кондитерських виробів з метою часткового заміщення пшеничного борошна. Як видно з отриманих даних порошок буряка та паста мангольду дозволить значною мірою підвищити біологічну цінності бісквітів за рахунок високого вмісту харчових волокон та золи.

Рецептура бісквітів зі зниженим вмістом глютену збагачених буряковим порошком та пастою мангольда. Бісквіти зі зниженим вмістом глютену готували шляхом часткової заміни пшеничного борошна різними пропорціями бурякового порошку. У рецептурі яєчні продукти частково замінені пастою мангольду у різних співвідношеннях. Використовуючи різне співвідношення пшеничного борошна, бурякового порошку, та пасти мангольда, було виготовлено чотири різні зразки бісквітів. Співвідношення у рецептурі пшеничного борошна та бурякового порошку 95:5 (Зразок 1), 90:10 (Зразок 2), 85: 15 (Зразок 3) і 80:20 (Зразок 4). Співвідношення яєць та пасти мангольду 90:10 (Зразок 1), 85:15 (Зразок 2), 80:20 (Зразок 3) і 75:25 (Зразок 4). Усі інгредієнти, які використовувалися для приготування бісквітів, наведено в таблиці 2. Для приготування бісквітів спочатку змішували просіяне пшеничне борошно та буряковий порошок у різних пропорціях (5, 10,

Таблиця 1

Хімічний склад пшеничного борошна, бурякового порошку, яєць курячих та пасти мангольда, n=6, $\alpha<0.05$

Назва поживних речовин	Вміст нутрієнтів, %			
	Пшеничне борошно з низьким вмістом білка	Буряковий порошок	Яйця курячі дієтичні	Паста мангольда
Волога	9,5	6,5	73,6	60
Білок	8,2	12,2	12,6	10,5
Жир	2,5	1,1	12,0	0,5
Вуглеводи:	78,3	75	0,7	21,8
цукри	-	47,5	-	6,2
харчові волокна	10,5	27,5	-	11,5
Зола	1,5	5,2	1,1	7,2

Таблиця 2

Рецептура бісквітів зі зниженим вмістом глютену збагачених буряковим порошком та пастою мангольда

Інгредієнт рецептури, г	Контроль	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3	Зразок 4
Пшеничне борошно з низьким вмістом білка	250,0	238,0	226,0	216,0	207,0
Порошок буряку	0,0	12,0	24,0	34,0	42,5
Цукор білий	180,0	180,0	180,0	180,0	180,0
Олія кукурудзяна	190,0	190,0	190,0	190,0	190,0
Молочний порошок	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Яйця курячі дієтичні	360,0	324,0	306,0	288,0	270,0
Паста мангольду	0,0	36,0	54,0	72,0	90,0
Розпушувач	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Ванільна есенція	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Всього	1000	1000	1000	1000	1000

15 та 20% мас./мас.), а курячі яйця частково заміняли на пасту мангольда у різних пропорціях (10, 15, 20 та 25% мас./мас.).

Вплив введення бурякового порошку та пасти мангольду на хімічний склад бісквітів зі зниженим вмістом глютену. Дані з рис. 1 вказують, що найвищий вміст вуглеводів, визначений у Зразка 4 – 44,3 г/100г, що на 13,01% вище ніж у контрольного зразка. У Зразку 3 із вмістом порошку буряка 15% та 20% пасти мангольду вміст вуглеводів перевищував Контроль на 10,46%. Вміст білка у Зразках 2, 3, 4 зменшився на 1,47%, що пов'язано з частковою заміною яєчних продуктів у рецептурі бісквітів зі зниженим вмістом глютену. Відзначалась тенденція до зменшення вмісту жиру у дослідних Зразках бісквіту 1, 2, 3 та 4 на 17,84%, 27,39%, 36,51% та 45,64%, відповідно. Найбільше на вміст жиру у бісквітах зі зниженим вмістом глютену вплинуло зменшення кількості дієтичних курячих яєць в рецептурі (табл. 2), оскільки вони містять значну кількість жиру, а в пасті мангольду його майже не має (табл. 1). Вміст харчових волокон збільшився від 238,36% для Зразку 1 та 676,92% для Зразку 4. Для зразку 3 та 4 вміст харчових волокон збільшився у порівнянні з Контролем в середньому

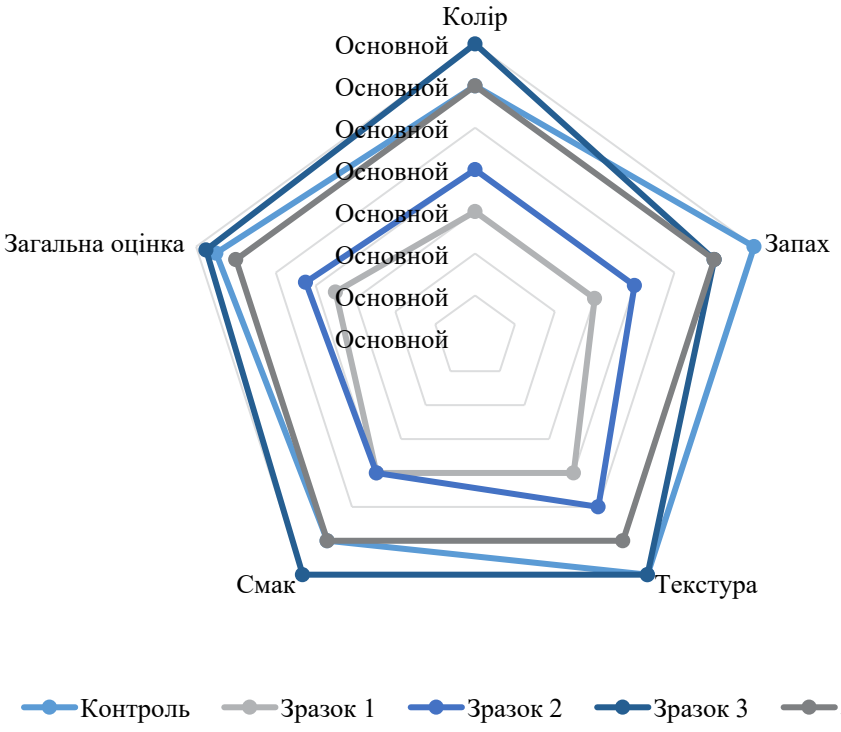


Рис. 1. Склад поживних речовин у бісквітах зі зниженим вмістом глютену збагачених буряковим порошком та пастою мангольда n=6, α<0.05

в 5 разів. За загальним вмістом мікро- та макроелементі показники дослідних Зразків збільшились з 337,5% – Зразок 1 до 887,5% – Зразок 4, у порівнянні з контрольним зразком. Не відзначено значних змін по показнику вологи для Контрольного та Дослідних зразків. Коливання вмісту вологи було в межах 1,1%, що значним чином не впливало на показники якості та органолептики бісквітів зі зниженим вмістом глютену. Спостерігається значне збільшення харчової цінності та зменшення вмісту жиру, незважаючи на підвищення вмісту вуглеводів, що здебільшого складаються з харчових волокон та натуральних цукрів (табл. 1). Вміст білка пшениці, що містить глютен та в основному складається глютенінів і гліадинів, у контрольному зразку склав 2,05 г/100г. З додаванням порошку буряку та пасти мангольду до рецептури бісквіту вміст білка пшениці почав зменшуватися. Для Зразку 3 вміст білка пшениці зменшився на 13,7%, а для Зразку 4 на 17,1%. Енергетична цінність бісквітах зі зниженим вмістом глютену для контрольного зразка склала 400,9 ккал/100г. Зразок 3 показав зменшення енергетичної цінності на 15,76% у порівнянні з контролем.

Органолептична оцінка бісквітів зі зниженим вмістом глютену збагачених буряковим порошком та пастою мангольда. Органолептичні показники для споживача на основі кольору, смаку, текстури, смаку та загальний вигляд зразків наведено рис. 2. Значення на рис. 2 наведені як середні, після дегустації десятьма експертами. Також було відзначено, що Зразок 3 бісквіта, виготовлений з додаванням 15% бурякового порошку та 20% пасти мангольду, мав високі показники смаку, текстури та зовнішнього вигляду серед інших пропорцій бурякового порошку та у порівнянні з контролем. Досліджено, що зразок бісквіту 4, виготовлений із додаванням 20% порошку буряка, мав знижені показники текстури та смаку, що пов'язано з занадто великою кількістю порошку буряка та пасти мангольда в рецептурі.

Висновки. Досліджено хімічний склад пшеничного борошна, бурякового порошку, курячих яєць та пасти мангольда, як основних інгредієнтів бісквітів зі зниженим вмістом глютену. Доведено, що вміст жиру у порошку буряку у 2 рази, а у пасті мангольду у 5 разів менший ніж у пшеничному борошні. Порошок буряка містить у 1,4 рази більше білка, у 3,4 рази золи

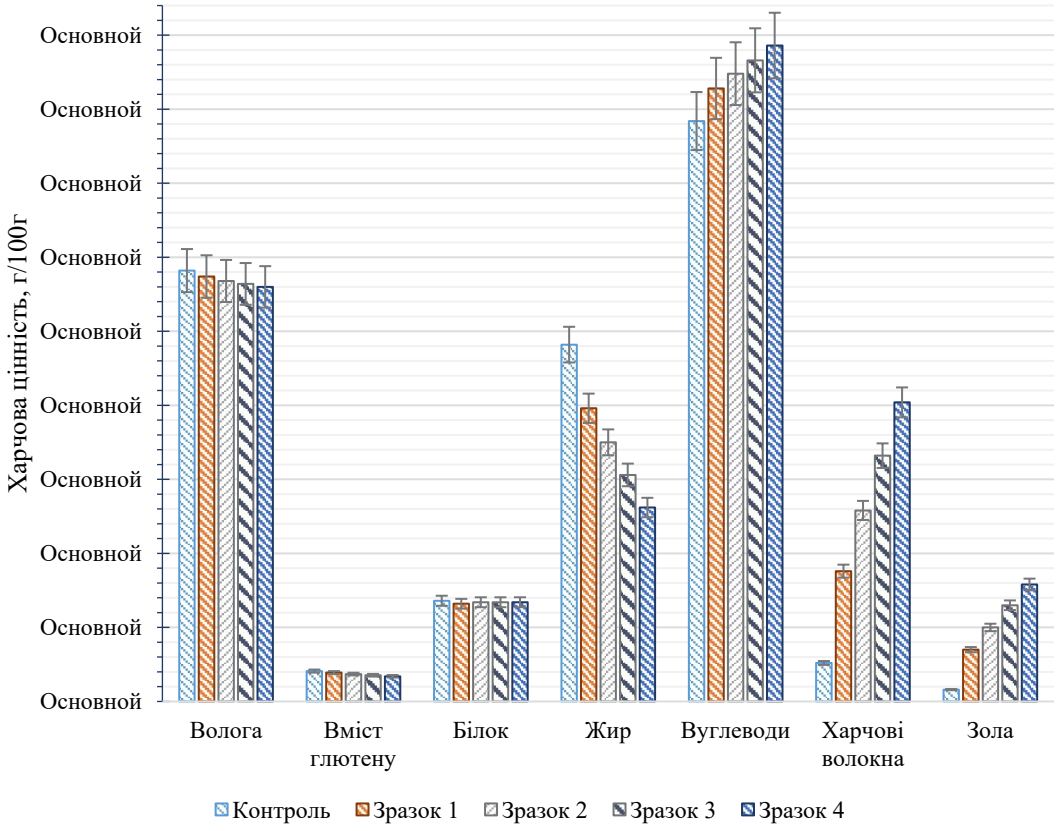


Рис. 2. Органолептична оцінка бісквітів збагачених буряковим порошком та пастою мангольда

та у 2,7 рази харчових волокон, ніж пшеничне борошно. Таким чином, порошок буряка раціонально вводити до рецептури борошняних кондитерських виробів з метою часткового заміщення пшеничного борошна. Буряковий порошок багате джерело харчових волокон і мінеральних речовин, можна використовувати у виробництві хлібобулочних і кондитерських виробів. Вміст білка, жиру, золи та клітковини в різних відсотках бурякового порошку збільшився зі збільшенням бурякового порошку. Розроблено 4 зразки рецептури бісквітів зі зниженим вмістом глютену з використанням бурякового порошку та пасти мангольду. Досліджено вплив введення бурякового порошку та пасти мангольду на хімічний склад бісквітів зі зниженим вмістом глютену за показниками вмісту вологи, білка, жиру, вуглеводів, харчових волокон, золи та енергетичної цінності. Найкращими показниками відзначився Зразок 3 із вмістом порошку буряка 15% та пасти мангольду 20%. Бісквіт, що містить 15% бурякового порошку, мав кращий зовнішній вигляд, смак і текстуру порівняно з іншими зразками. Це дослідження показало, що бісквіти, приготовані з порошком буряка 15% (мас./мас.), мали порівняно кращі поживні та сенсорні характеристики порівняно з контрольною. Тому бісквіту з 15% бурякового порошку радимо вживати в щоденному раціоні для користі здоров'ю. Вміст білка у Зразку 3 зменшився на 1,47%, що пов'язано з частковою заміною яєчних продуктів у рецептурі бісквітів зі зниженим вмістом глютену. З додаванням порошку буряку та пасти мангольду до рецептури бісквіту вміст білка пшениці почав зменшуватися. Для Зразку 3 вміст білка пшениці зменшився на 13,7%. У Зразку 3 відзначалась тенденція до зменшення вмісту жиру на 36,51%. Вміст харчових волокон збільшився для Зразку 3 у порівнянні з Контролем в середньому в 5 разів. За загальним вмістом мікро- та макроелементі показники Зразка 3 збільшились на 712,5% у порівнянні з Контролем. Коливання вмісту вологи було в межах 1,1%, що значним чином не впливало на показники якості та органолептики бісквітів зі зниженим вмістом глютену. Зразок 3 показав зменшення енергетичної цінності на 15,76% у порівнянні з контролем. Оцінено органолептичні властивості кожної рецептурної композиції бісквітів зі зниженим вмістом глютену з порошком буряка та пастою мангольду визначеної в ході експерименту. Було відзначено, що Зразок 3 бісквіта, виготовлений з додаванням 15% бурякового порошку та 20% пасти мангольду, мав високі показники смаку, текстури та зовнішнього вигляду серед інших пропорцій бурякового порошку та у порівнянні з контролем.

Список літератури:

1. Luick M, Pechey R, Harmer G, Bandy L, Jebb SA, Piernas C. The impact of price promotions on confectionery and snacks on the energy content of shopping baskets: A randomised controlled trial in an experimental online supermarket. Appetite. 2023;186:106539. https://doi.org/10.1016/j.appet.2023.106539

2. Srivastava S, Singh K. Nutritional Differences found in two values added baked products of beetroot (Beta vulgaris). International Journal of Science, Engineering and Management. 2018;3(4):209-212. Available online: https://www.technoarete.org/common_abstract/pdf/IJSEM/v5/i4/Ext_61730.pdf

3. Patil H, Pol R. A Study on Effects of Standardized Recipes of Bakery Products in Pune Region. International Journal of Multidisciplinary Consortium. 2014;1(3):82-91. Available online: https://aissmschmct.in/wp-content/uploads/2019/05/23.pdf

4. Gao D, Helikh A, Filon A, Duan Z, Vasylenko O. Effect of Ph-shifting treatment on the gel properties of pumpkin seed protein isolate. Journal of Chemistry and Technologies. 2022;30(2):198-204. https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i2.241145

5. Fernandes Dias L, Kobus R, Bagolin do Nascimento A. Effectiveness of the low-FODMAP diet in improving non-celiac gluten sensitivity: A systematic review. British Journal of Nutrition. 2023;129(12):2067-2075. https://doi.org/10.1017/S0007114522002884

6. Holovko M, Holovko T, Gelikh A, Zherebkin M. Optimization of the recipes of forcemeat products on the basis of processed freshwater mussels. Food Science and Technology. 2018;12(4):86-93. https://doi.org/10.15673/fst.v12i4.1206

7. Le Loan TK, Thuy NM, Le Tri Q, Sunghoon P. Characterization of gluten- free rice bread prepared using a combination of potato tuber and ramie leaf enzymes. Food Science and Biotechnology. 2021;30:521-529. https://doi.org/10.1007/s10068-021-00891-2

8. Bender D, Schonlechner R. Innovative approaches towards improved gluten- free bread properties. Journal of Cereal Science. 2020;91:102904. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102904

9. Abdelsalam RR, El-Naggar EA, El-Soukkary FAH, Abdelmegiud M. H. Physico-chemical, functional and antioxidant properties of some flours types as gluten-free ingredients compared to wheat flour. Asian Journal of Applied Chemistry Research. 2021;10(3):21-30. https://doi.org/10.9734/ajacr/2021/v10i3-430238

10. Gao D, Helikh A, Duan Z, Xie Q. Thermal, structural, and emulsifying properties of pumpkin seed protein isolate subjected to pH-shifting treatment. Journal of Food Measurement and Characterization. 2023;17:2301-2312. https://doi.org/10.1007/s11694-022-01776-6

11. Prymenko VH, Sefikhanova KA, Helikh AO, Golovko MP, Vasylenko OO. Choice justification of dairy raw materials according to indicators of their structure for obtaining selenium-protein dietary supplements. Journal of Chemistry and Technologies. 2022;30(1):79-87. https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i1.241139

12. Martínez-Villaluenga C, Pen˜as E, Herna´ndez-Ledesma B. Pseudocereal grains: Nutritional value, health benefits and current applications for the development of gluten-free foods. Food and Chemical Toxicology. 2020;137:111178. https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111178

13. Roman L, Belorio M, Gomez M. Gluten-free breads: The gap between research and commercial reality. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2019;18:690-702. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12437

14. De Angelis M, Cassone A, Rizzello CG, Gagliardi F, Minervini F, Calasso M, et al. Mechanism of degradation of immunogenic gluten epitopes from Triticum turgidum L. var. Durum by sourdough lactobacilli and fungal proteases. Applied and Environmental Microbiology. 2010;76:508-518. https://doi.org/10.1128/AEM.01630-09

15. Chandra S, Singh S, Kumari D. Evaluation of functional properties of composite flours and sensorial attributes of composite flour biscuits. Journal of Food Science & Technology. 2015;52:3681-3688. https://doi.org/10.1007/s13197-014-1427-2

Vasylenko O.O. RESEARCH OF QUALITY INDICATORS OF WHIPPED FLOUR PRODUCTS WITH REDUCED GLUTEN CONTENT

This article is dedicated to the development of a new biscuit formulation with low gluten content based on non-traditional ingredients: beetroot powder and mangold paste. The article reveals that these plants, rich in biologically active compounds such as flavonoids, alkaloids, and betalains, have not been previously used in the production of gluten-free biscuits. It was determined that to reduce the amount of gluten in the formulation, wheat flour with low protein content (8.2%) was partially replaced with beetroot powder in various concentrations (5-20%). Additionally, to reduce allergenicity, egg products were partially replaced with mangold paste (10-25%). It was established that the new formulation allows not only to reduce the content of gluten and eggs but also to enrich biscuits with betalains, plant protein, dietary fiber, and mineral substances. It was experimentally confirmed that the optimal ratio of ingredients was determined by analyzing the nutritional and biological value of biscuits with different contents of beetroot powder and mangold paste. The chemical composition (moisture, proteins, fats, carbohydrates, dietary fiber, ash) and energy value of the finished products were thoroughly investigated. It was found that the addition of 15% beetroot powder and 20% mangold paste (sample 3) contributes to a significant improvement in the nutritional properties of the biscuit: a decrease in fat content by 36.51%, an increase in the amount of dietary fiber by 538.46% and ash by 712.5%. At the same time, the energy value of sample 3 was 15.76% lower than that of the control sample. The organoleptic properties of biscuits enriched with beetroot powder and mangold paste were evaluated to determine the best indicators. The obtained results confirmed the feasibility and prospects of using beetroot semi-finished products as substitutes for gluten and allergens in the confectionery industry.

Key words: *whipped flour products, dried vegetables, baked goods, pastry, dietary nutrition, diet, quality characteristics, bioactive substances.*

БУДІВНИЦТВО

УДК 624.131
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/41

Ремез Н.С.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Дичко А.О.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Лу Сіньї
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мінаєва Ю.Ю.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ВІДНОВЛЕННЯ БОМБТУРАЦІЙ ТА НЕСТІЙКИХ ҐРУНТІВ ЗА БУРОЗМІШУВАЛЬНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ

У дослідженні наведено аналіз причин нестійкості ґрунту, пов'язаної з техногенним навантаженням та військовими діями. Актуальність дослідження полягає у необхідності відновлення зруйнованого земляного полотна, а також розвитку транспортної інфраструктури країни в сучасних умовах. Зміцнення земляного полотна вимагає всебічного врахування як безпосередніх потреб у стабільності, так і довгострокових вимог до продуктивності. Дані моніторингу ефективності існуючої інфраструктури показують, що неналежним чином оброблені землі часто демонструють прогресуюче погіршення, що призводить до збільшення витрат на технічне обслуговування та скорочення терміну служби. Технологія буріння та змішування стає високо адаптивним рішенням для вирішення різноманітних завдань земляного полотна. Технологічні інновації в змішувальному обладнанні та в'яжучих агентах демонструють високу ефективність в обробці та збільшенні міцності проблемних ґрунтів. У роботі означено кореляцію між параметрами обробки за бурозмішувальною технологією та розвитком міцності ґрунтів. Наведено критерії продуктивності та параметри контролю якості для різних конструкцій. Аналіз числових даних власних польових випробувань визначення міцності зразка ґрунту при одновісному навантаженні і результати програми моніторингу оброблених ґрунтів дозволили встановити систематичні закономірності в поведінці та продуктивності ґрунтово-цементної суміші. У якості основного зв'язуючого агенту використано портландцемент типу І, доповнений меленим гранульованим доменним шлаком у пропорціях 20-40% від загального вмісту в'яжучого компоненту. Механічні властивості обробленого ґрунту демонструють значні покращення при застосування методу буріння та змішування. Результати роботи рекомендуються до використання для збільшення міцності ґрунту та укріплення основ споруд з врахуванням залежності вмісту в'яжучого компоненту та енергії змішування від типу ґрунту основи.

Ключові слова: *ґрунти, міцність, бурозмішувальна технологія, портландцемент.*

Постановка проблеми. Розвиток транспортної інфраструктури залишається «наріжним каменем» сучасного економічного зростання, при цьому стійкість земляного полотна відіграє фундаментальну роль у забезпеченні довгострокової ефективності та безпеки доріг, залізниць та інших інженерних споруд. Зношення земляного полотна проявляється за допомогою багатьох механізмів, створюючи значні проблеми для обслуговування та відновлення інфраструктури. Фізична деградація земляного полотна часто починається з надмірних коливань вмісту вологи, що призводить до змін об'єму ґрунтів і подальшого утворення деформацій. Так, понад 65% руйнувань земляного

полотна є результатом недостатньої несучої здатності та невідповідних умов ґрунту [1].

Сучасна будівельна практика в регіонах, що швидко розвиваються, стикається зі зростаючим тиском використання маргінальних ґрунтів і складних умов на місці. Близько 40% транспортних проектів стикаються з серйозними проблемами земляного полотна під час будівництва або на ранніх етапах експлуатації [2]. Відкладення м'якого ґрунту представляють особливі труднощі через високу стисливість, низьку міцність на зсув і значний потенціал осідання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми стійкості ґрунтів часто виникають у районах із потужним відкладенням глини, що характеризується високим вмістом води та низькою несучою здатністю. Лабораторні дослідження зразків ґрунту з таких регіонів вказують на те, що показники міцності на зсув недренованого типу часто падають нижче прийнятних порогів, придатних для підтримки інфраструктури. Інженерні властивості проблемних ґрунтів зазвичай демонструють вміст рідини, що перевищують 50%, а показники пластичності вище 30, що робить звичайні методи стабілізації неадекватними.

Кліматичні фактори суттєво впливають на стабільність земляного полотна, особливо в регіонах, де спостерігаються чіткі сезонні коливання. Цикли замерзання-відтавання та інтенсивні опади створюють складні проблеми для підтримки стабільності земляного полотна [3].

Нищівними для земляного полотна і ґрунтів в цілому є наслідки ведення військових дій Росією в Україні. У результаті вибухів, обстрілів, пожеж, під час спорудження фортифікаційних споруд, пересування особового складу та військової техніки тощо відбуваються руйнування структури та деформації ґрунтів, такі як зсуви шарів ґрунту, ущільнення, пошкодження або знищення гумусового шару, заболочування, засмічення території продуктами бойової діяльності.

Пошкодження ґрунтів унаслідок застосування різноманітних систем зброї та важкої військової техніки спричиняють, насамперед, зміну їх фізичних властивостей. Одним із основних проявів фізичного порушення є переущільнення ґрунту. Також небезпечним є і вібраційний вплив – імпульси від вибухів боєприпасів та від стрільби з різних систем зброї. Вібрація, що передається у ґрунті, викликає його ущільнення, витискання води, просідання поверхні, утворення порожнин та зміни мікрорельєфу [4].

Вибухова хвиля руйнує структуру ґрунтових горизонтів з утворенням котловану. При цьому формується бомбтурбація: ґрунт в місці удару турбулізується, перемішується із залишками токсичних вибухових речовин і металу, та ущільнюється. У воронці від вибуху відбуваються прискорені процеси вивітрювання та вилуговування [4].

Рух важких військової техніки спричиняє ущільнення ґрунту до >1,4 г/см^3 [5-6]. Крім того, переміщення піших колон під час воєнних дій підвищує об'ємну щільність ґрунту (до 32% порівняно з контрольною ділянкою), знижує швидкість інфільтрації води (до 83%), зменшує надземну біомасу, підвищуючи сприятливість прогресуванню вітрової та водної ерозії [7-8].

Безперебійна робота об'єктів інфраструктури в складних техніко-геологічних умовах війни потребує підвищення надійності земляного полотна, а також несучої здатності фундаментів, на яких планується реконструкція, перебудова, будівництво або реконструкція цих об'єктів. Разом з тим, стабілізація деформацій слабких водонасичених глинистих ґрунтів відбувається дуже повільно і може займати десятиріччя [4, 9].

Довгострокові програми моніторингу задокументували прискорені темпи погіршення в районах, що зазнали екстремальних погодних умов, при цьому темпи осідання збільшувалися в 2-3 рази під час несприятливих погодних періодів. Розуміння погодних впливів стає вирішальним для розробки ефективних стратегій зміцнення земляного полотна [10].

Вимоги до технології покращення ґрунту значно відрізняються залежно від конкретних умов проєкту та критеріїв ефективності. Критичні фактори, що впливають на вибір технології, включають тип ґрунту, стан ґрунтових вод, вимоги до навантаження та екологічні вимоги. Інженерні оцінки, проведені для багатьох інфраструктурних проектів, показують, що успішне зміцнення земляного полотна вимагає всебічного врахування як безпосередніх потреб у стабільності, так і довгострокових вимог до продуктивності. Дані моніторингу ефективності існуючої інфраструктури показують, що неналежним чином оброблені землі часто демонструють прогресуюче погіршення, що призводить до збільшення витрат на технічне обслуговування та скорочення терміну служби. Технологія буріння та змішування стає високо адаптивним рішенням для вирішення різноманітних завдань земляного полотна. Удосконалені методи змішування ґрунту демонструють високу ефективність в обробці проблемних грун-

тів на різних глибинах. Лабораторні дослідження в поєднанні з польовими випробуваннями встановили оптимальні параметри змішування для різних умов ґрунту, що дозволяє точно контролювати розвиток міцності та рівномірність його обробки. Останні технологічні інновації в змішувальному обладнанні та в'яжучих агентах значно розширили можливості застосування [11].

Розвиток інфраструктури в міських районах створює додаткові складності через обмеження простору та потенційний вплив на прилеглі споруди. Традиційні методи поліпшення ґрунту часто виявляються непрактичними в замкнених просторах або на ділянках з наявними комунікаціями. Польові експерименти, що порівнюють різні методи зміцнення, демонструють переваги технології свердління-змішування з точки зору мінімальної вібрації, зменшення ефекту зміщення та розширення можливостей контролю якості [1].

Екологічні стандарти все більше впливають на вибір технології для проектів поліпшення ґрунту. Методи буріння та змішування пропонують значні переваги завдяки зменшенню вимог до земляних робіт і мінімальному утворенню відходів порівняно з традиційними методами заміни. Оцінка впливу на навколишнє середовище вказує на нижчі вуглецеві сліди та зменшення руйнування місцевих екосистем при використанні методів буріння та змішування. Інтеграція екологічно чистих матеріалів і оптимізація композицій зв'язуючих агентів додатково покращує екологічні показники, зберігаючи технічну ефективність.

Для забезпечення ефективного впровадження технології буріння-змішування найважливішим залишається контроль якості. Удосконалені системи моніторингу, що містять можливості збору та аналізу даних у реальному часі, дозволяють точно контролювати параметри змішування та однорідність обробки. Програми польової перевірки з використанням різних методів тестування, включаючи відбір проб керна, тестування на місці та геофізичні дослідження, забезпечують комплексну оцінку ефективності лікування. Розробка стандартизованих процедур контролю якості на основі великого польового досвіду забезпечує послідовне досягнення проектних цілей [12].

Економічний аналіз різних альтернатив поліпшення ґрунту демонструє переконливі переваги технології буріння-змішування в багатьох сферах застосування. Порівняння вартості, що включає як прямі витрати на будівництво, так і довгострокові вимоги до обслуговування, демонструє перевагу рішенням буріння та змішування, особливо для проектів із складними умовами ґрунту або обмеженням доступу. На значну потенційну економію вказує оцінка витрат протягом життєвого циклу завдяки зменшенню вимог до технічного обслуговування та подовженню терміну служби обробленого земляного полотна.

Механічні властивості обробленого ґрунту демонструють значні покращення при застосування методу буріння та змішування. Програми лабораторних випробувань, які проводяться у великих науково-дослідних установах, демонструють значне підвищення міцності на необмежений стиск, зазвичай коливається від 1,0 МПа до 5,0 МПа залежно від типу ґрунту та параметрів обробки. Параметри міцності на зсув демонструють помітне підвищення, при цьому кути тертя збільшуються на 10-15 градусів, а значення когезії покращуються в 3-5 разів. Комплексні програми тестування підтверджують довгострокову стабільність приросту міцності з мінімальним погіршенням, що спостерігається протягом тривалих періодів моніторингу. Моніторинг польових характеристик ґрунту демонструє високу стійкість земляного полотна, зміцненого за допомогою технології буріння та змішування. Вимірювання осідання на численних ділянках з різними типами ґрунтів вказують на зменшення загальної величини осідання на 60-80% порівняно зі звичними умовами. Дані довгострокового моніторингу, зібрані з різних інфраструктурних проєктів, демонструють постійне покращення продуктивності, при цьому оброблені ділянки зберігають стабільність за різноманітних умов навантаження та впливу навколишнього середовища [13].

Умови ґрунтових вод також значно впливають на стійкість земляного полотна та ефективність обробки. Дослідження, проведені в різних геологічних умовах, встановлюють кореляції між коливаннями ґрунтових вод і продуктивністю земляного полотна. Особливу ефективність у вирішенні проблем, пов'язаних із підземними водами, демонструє технологія буріння та змішування шляхом створення захисних екранів із низькою проникністю та покращення структури ґрунту. Польові вимірювання вказують на суттєве зниження гідравлічної провідності, як правило, до $10^{-6}...10^{-8}$ м/с після обробки, що вказує на ефективне обмеження міграції вологи та пов'язаних із цим проблем стабільності.

Вибір матеріалу для буріння та змішування вимагає ретельного розгляду багатьох факторів, що впливають на ефективність стабілізації ґрунту. Рекомендації щодо оптимізації компонентів

суміші з різними комбінаціями зв'язуючих агентів можливі на основі врахування конкретних умов ґрунту та вимог до продуктивності. Дослідження хімічної сумісності між мінералами ґрунту та в'яжучими речовинами дозволяють передбачити характеристики довгострокової стабільності та довговічності ґрунту. Підвищену продуктивність та екологічну стійкість забезпечує розроблені інноваційні зв'язуючи агенти [14].

Дослідження, проведені в різних кліматичних умовах, встановили вплив температури навколишнього середовища на збільшення міцності. Лабораторні дослідження, доповнені польовими спостереженнями, вказують на доцільність коригування графіків будівництва та проектів сумішей з урахуванням сезонних коливань. Для досягнення оптимального розвитку міцності необхідно здійснювати контроль температури протягом початкових періодів затвердіння [1]. Крім того, польові випробування демонструють важливість підтримки постійної швидкості проникнення та швидкості обертання для досягнення однакових результатів обробки [15].

Просторова мінливість ґрунтових умов вимагає адаптивного планування та впровадження обробки. Встановити відповідні параметри обробки для різних зон проєктних територій допомагає статистичний аналіз властивостей ґрунту. Впровадження систем моніторингу в режимі реального часу дозволяє коригувати параметри обробки на основі реальних умов, що виникають під час будівництва [16].

Постановка завдання. Метою дослідження є встановлення залежності впливу технологічних параметрів бурозмішувальної технології на якість стабілізації ґрунту.

Виклад основного матеріалу. Збільшення міцності ґрунту з урахуванням вмісту в'яжучого компоненту та енергії змішування. Вирішальну роль у підтримці продуктивності інфраструктури відіграють механізми раннього виявлення пошкоджень земляного полотна. Завчасно виявляти потенційні проблеми дозволяє розробка систем моніторингу, що включають різні сенсорні технології. Інтеграція можливостей дистанційного зондування з традиційними підходами до моніторингу забезпечує повне покриття оброблених територій.

Взаємозв'язки між механічними властивостями, параметрами обробки та характеристиками продуктивності забезпечують ефективність обробки ґрунту та реалізації проекту зміцнення, а також визначення емпіричних співвідношень для аналізу тестових даних. У табл. 1 наведена кореляція між параметрами обробки та міцністю R для різних типів ґрунту. Випробування на міцність на одновісне стискання (UCS) здійснюється протягом 28 днів для визначення міцності на стискання зразка ґрунту при одновісному навантаженні [17].

Ефективність обробки значною мірою залежить від належного контролю параметрів конструкції на етапах впровадження. Завдяки систематичному аналізу даних польових досліджень встановлено взаємозв'язки між робочими параметрами технології бурозмішувальної технології укріплення нестійких ґрунтів та досягнутими результатами, що важливо при розробці програм контролю якості (Табл. 2) [18-19]. Сучасне будівельне обладнання, що включає автоматизовані системи моніторингу, дозволяють точно контролювати критичні параметри протягом усього процесу укріплення ґрунту [1].

Нами досліджено вплив технологічних параметрів на якість стабілізації ґрунту. Тестування було зосереджено на зміцненні м'яких глинистих відкладень. Основним зв'язуючим агентом слугував портландцемент типу I, доповнений меленим гранульованим доменним шлаком у пропорціях 20-40% від загального вмісту в'яжучого.

Аналіз числових даних власних польових випробувань і програми моніторингу оброблених

Таблиця 1

Кореляція між параметрами обробки за бурозмішувальною технологією та розвитком міцності ґрунтів

Тип ґрунту	Вміст води (%)	Вміст зв'язуючого компоненту (%)	Енергія змішування (кН·м/м³)	R (МПа) 28-денний UCS
М'яка глина	35-45	15-20	800-1000	1,2-2,0
Мулиста глина	25-35	12-18	600-800	1,8-2,5
Піщана глина	20-30	10-15	500-700	2,0-3,0
Органічний ґрунт	40-60	18-25	1000-1200	0,8-1,5
Морська глина	50-70	20-28	1200-1500	1,0-1,8

Таблиця 2

Критерії продуктивності та параметри контролю якості для різних конструкцій

Тип конструкції	Необхідна міцність (МПа)	Максимальне осідання (мм)	Коефіцієнт однорідності	Метод контролю якості
Земляне покриття шосе	1,5-2,5	50	>0,85	Core Sampling + CPT
Земляні полотна залізниці	2,0-3,0	30	>0,90	Геофізичний + SPT
Портові структури	2,5-3,5	40	>0,88	Тест навантаження пластини
Тротуари аеропорту	2,8-4,0	25	>0,92	Окремі методи
Промислові покриття	1,8-2,8	35	>0,87	NDT + CoreTests

ґрунтів дозволив встановити систематичні закономірності в поведінці та продуктивності ґрунтовоцементної суміші. Проведено випробування протягом 28 днів для визначення міцності зразка ґрунту при одновісному навантаженні. Коефіцієнт ефективності впровадження досяг 865,7, розрахований на основі обробки 153 000 м³ протягом 180 днів з кінцевою міцністю 3,1 МПа проти необхідних 2,8 МПа, що вказує на ефективне використання ресурсів при 92% ефективності витрат (Рис. 1).

Розвиток міцності продемонстрував послідовне прогресування від початкових значень до 3,1 МПа через 28 днів і 3,8 МПа через 90 днів, з граничним потенціалом міцності 4,2 МПа та параметром швидкості розвитку 0,045 на день. Загальна деформація при цьому досягла 0,93%, що включає еластичну (0,12%), пластичну (0,28%) деформації, деформацію повзучості (0,35%) та усадку ґрунту (0,18%).

Висновки. На основі експериментальних досліджень встановлена кореляція між параметрами обробки за барозмішувальною технологією (вміст зв'язуючого компоненту (%), енергія змішування) та розвитком міцності різних типів ґрунтів.

Досліджено вплив технологічних параметрів на якість стабілізації ґрунту. Тестування було зосереджено на зміцненні м'яких глинистих відкладень. Основним зв'язуючим агентом слугував портландцемент типу I, доповнений меленим гранульованим доменним шлаком у пропорціях 20-40% від загального вмісту в'яжучого компоненту.

Аналіз числових даних польових випробувань і програми моніторингу оброблених ґрунтів дозволив встановити систематичні закономірності в поведінці та продуктивності ґрунтовоцементної суміші. Коефіцієнт ефективності впровадження досяг 865,7, розрахований на основі

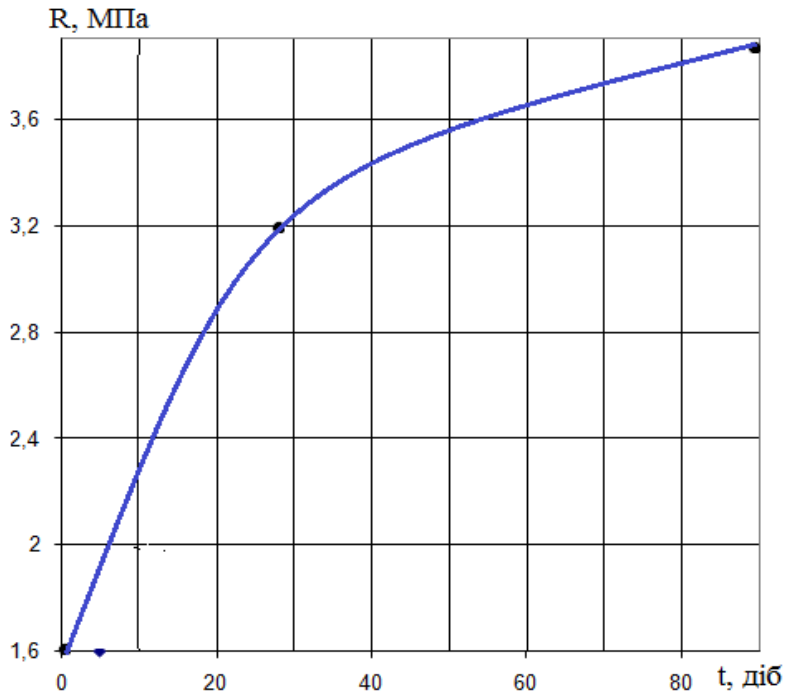


Рис. 1. Залежність міцності R від часу t після впровадження бурозмішувальної технології

обробки 153000 м³ протягом 180 днів з кінцевою міцністю 3,1 МПа проти необхідних 2,8 МПа, що вказує на ефективне використання ресурсів при 92% ефективності витрат.

Результати роботи можуть бути використані при укріпленні основ споруд з урахуванням залежності вмісту в'яжучого компоненту та енергії змішування від типу ґрунту основи.

Список літератури:

1. Paul E.L., Atiemo-Obeng V.A. and Kresta S.M. Handbook of Industrial Mixing Science and Practice. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2004. P. 543–584.

2. Elliott R.P., Dennis N.D. and Qiu Y. Permanent Deformation of Subgrade Soils. Mack-Blackwell Transportation Center, 1998. 216 p.

3. Remez N., Dychko A., Kraychuk A., Kraychuk S., Ostapchuk N. The Influence of the Thermal Effect on the Stress-Strain State of the Soil. *Latvian journal of physics and technical sciences.* 2023. 60, N4. P. 52–60.

4. Голубцов О., Сорокіна Л., Сплодитель А., Чумаченко С. Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів [Електронний ресурс]. ГО "Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2023. 32 с. URL: https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii.pdf. (дата звернення: 22.01.2025).

5. Reyes M. R., Raczkowski C. W., Reddy G. B., Gayle G. A. Effect of wheel traffic compaction on runoff and soil erosion in no-till. *Applied Engineering in Agriculture*. 2005. 21(3). P. 427-433.

6. Broomandi P., Guney M., Kim J. R., Karaca F. Soil contamination in areas impacted by military activities: a critical review. *Sustainability*. 2020. 12(21). P. 9002.

7. Whitecotton R., David M., Darmody R., Price, D. Impact of foot traffic from military training on soil and vegetation properties. *Environmental management*. 2000. 26(6). P. 697–706.

8. Пліско І. В., Романчук К. Ю., Крилач С. І. Вплив збройної агресії на ущільнення орних грунтів. *Ґрунтовий покрив України в умовах воєнних дій: стан, виклики, заходи з відновлення*: збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції (Харків, 5 грудня 2023 р.). [Електронне видання]. Харків: ННЦ «ІГА імені О.Н. Соколовського», 2023. 86 с.

9. Балашова Ю. Б., Дем'яненко В. В., Усиченко О. Ю., Тиквенко, П. А., Балашов А. О. Підвищення несучої здатності слабких водонасичених глинистих основ земляного полотна автомобільних доріг. *Український журнал будівництва та архітектури.* 2023. 4(016). С. 7-16.

10. Hezentsvei Yu., Bannikov D. Effectiveness Evaluation of Steel Strength Improvement for Pyrami-dal-Prismatic Bunkers. *Eureka: Physics and Engineering.* 2020. 2(27). 30-38.

11. Fort I., Jirout T. A study on blending characteristics of axial flow impellers. *Chemical and Process Engineering.* 2011. 32(4). 311-319.

12. Kamel J.M., Yigit A.S. Modeling and analysis of stick-slip and bit bounce in oil well drillstrings equipped with drag bits. *J Sound Vib.* 2014. 333(25). 6885–6899.

13. Kalivoda J., Bauer P. Mechatronic Bogie for Roller Rig Tests: *Proc. of the 24th Symposium of the Intern. Association for Vehicle System Dynamics (IAVSD 2015) (17.08–21.08.2015)*. 2015. Graz, Austria. CRC Press

14. Haciislamoglu M., Cartalos U. Practical Pressure Loss Predictions in Realistic Annular Geometries: *Proc. of the 69th SPE Annual Technical Conference and Exhibition.* SPE, ed. New Orleans, 1994. P. 28304.

15. Bjørkevoll K.S, Rommetveit R., Aas B., Gjeraldstveit H., Merlo A. Transient gel breaking model for critical wells applications with field data verification: *SPE/IADC Drilling Conference*. 2003, Amsterdam, The Netherlands.

16. Ігнатов А.О., Гартман В.В. Деякі уточнюючі відомості щодо визначення умов очищення стовбура свердловини: *Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених* (Дніпропетровськ, 29 березня 2012 року). Д.: Державний ВНЗ «НГУ», 2012. С. 18-20.

17. ДСТУ-Н Б В.1.1-37:2016. Настанова щодо інженерного захисту територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів.

18. Parafilov V.I., Amangeldykyzy A., Portnov V.S., Kopobayeva A., Maussymbayeva A.D. Geochemical specialization of the Shubarkol deposit coals. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. 5. 5-10.

19. Сейсміка. URL: https://seysmika.com. (дата звернення: 22.01.2025).

Remez N.S., Dychko A.O., Lu Sini, Minaieva Yu.Yu. RECOVERY OF BOMBTURATIONS AND UNSTABLE SOILS BY DRILLING MIXING TECHNOLOGY

The study provides an analysis of the causes of soil instability associated with man-made loads and military actions. The relevance of the study lies in the need to restore the destroyed subgrade, as well as the development of the country's transport infrastructure under modern conditions. Strengthening the subgrade requires comprehensive consideration of both immediate stability needs and long-term performance requirements. Monitoring data on the effectiveness of existing infrastructure show that improperly processed

soils often show progressive deterioration, which leads to increased maintenance costs and reduced service life. Drilling and mixing technology is becoming a highly adaptive decision for solving various subgrade problems. Technological innovations in mixing equipment and binding agents demonstrate high efficiency in processing and increasing the strength of problematic soils. The paper defines the correlation between processing parameters using drilling and mixing technology and the development of soil strength. Performance criteria and quality control parameters for various structures are given. The analysis of numerical data from the own field tests to determine the strength of a soil sample under uniaxial loading and the results of the monitoring program for treated soils allows to establish systematic patterns in the behavior and performance of the soil-cement mixture. The main binding agent was Portland cement type I, supplemented with ground granulated blast furnace slag in proportions of 20-40% of the total content of the binder component. The mechanical properties of the treated soil demonstrate significant improvements when using the drilling and mixing method. The results of the work are recommended for use to increase soil strength and strengthen the foundations of structures, taking into account the dependence of the content of the binder component and mixing energy on the type of base soil.

Key words: *soils, strength, drilling and mixing technology, Portland cement.*

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.38
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/42

Воронов С.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Поплавко Ю.М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДЕЯКІ АСПЕКТИ ЕЛЕКТРИЧНО ІНДУКОВАНОЇ П'ЄЗОЕЛЕКТРИКИ

Стаття присвячена окремим аспектам електрично індукованої п'єзоелектрики. Лінеаризована електрострикція, що виникає під дією сильного електричного поля у твердому діелектрику, що відома як квазілінійний електромеханічний ефект, схожий на п'єзоелектрику. Цей ефект спостерігається в електричному полі типу зміщення і пропорційний квадрату діелектричної проникності. У даній статті розкриті окремі дискусійні питання щодо діелектричної проникності та аналізуються фізичні механізми виникнення електромеханічного ефекту в п'єзоелектриках, піроелектриках та релаксорних сегнетоелектриках з урахуванням інерційності електромеханічного відклику. Електрично індукована п'єзоелектрика є максимальною в діелектриках, що мають високу діелектричну проникність, ефективність якої забезпечується малоінерційною квазіпружною поляризацією. Для оцінки максимальної ефективності різних п'єзоелектричних матеріалів використовується метод діелектричної спектроскопії. Даний метод дозволяє контролювати вплив механізмів електричної поляризації на параметри прояву електромеханічних ефектів та їх інерційність. Підтверджено, що поляризаційні механізми у п'єзокераміці обмежують швидкість електромеханічних процесів в СВЧ-діапазоні, а в п'єзокристалах – практично не обмежують. Встановлено, що використання у якості електромеханічних пристроїв нелінійних сегнетоелектриків п'єзоелектричного типу є недоцільним, як через сильний гістерезис, так і через інерційність перемикання доменів. Хоча дані електромеханічні пристрої і мають велику електромеханічну реакцію (відклик), інерційність перемикання доменів для об'ємних структур обмежена частотою в кілогерц, а для плівок – в кілька мегагерц. Зазначений електромеханічний ефект у піроелектриках значно нижчий та менш керований, вони практично безінерційні та їх використання можливе у вузькому діапазоні температур. Релаксорні сегнетоелектрики забезпечують великий і практично безгістерезисний ефект. Зазначений ефект суттєво знижується на високих частотах – кілогерцових і особливо на мегагерцових, релаксорні сегнетоелектрики успішно використовуються в актуаторних пристроях для отримання та технічного застосування електрично індукованого п'єзоефекту.

Ключові слова: *п'єзоелектрики, піроелектрики, сегнетоелектрики, електрична поляризація, діелектричні властивості.*

Постановка проблеми. Діелектричні матеріали, що використовуються для отримання електрично індукованого п'єзоефекту в останні роки успішно реалізовані для технічного застосування. Фізичні механізми, що дозволяють отримати даний ефект дуже різноманітні та можуть діяти одночасно. А тому для встановлення їх відмінностей використовується метод діелектричної спектроскопії, що дозволяє на різних частотах визначити межі застосування електрично індукованого п'єзоефекту.

Ефективний електромеханічний ефект отриманий шляхом застосування електричного поля до діелектрика безпосередньо впливає на його електричні та механічні властивості різною мірою посилюючи їх зв'язок та певну взаємозалежність між ними. Метод діелектричної спектроскопії на мікроскопічному рівні дозволяє встановити поляризовність діелектрика, що під впливом електричного поля істотно змінюється. Таким чином поляризованість діелектрика не залишається постійним параметром, який не залежить від електричного поля, так як сильне поле змінює міжатомні зв'язки у структурі діелектрика, що й приводе до зміни поляризованості – появи нелінійної поляри-

зації діелектрика. Саме поява нелінійної поляризації діелектрика забезпечує електричний контроль різних параметрів, які традиційно вважалися незалежними від дії сильного електричного поля. У зв'язку з цим, необхідно розглядати електрично індукований п'єзоефект як вплив механізмів електричної поляризації на параметри прояву електромеханічних ефектів та їх інерційність із застосуванням методу діелектричної спектроскопії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Роботи вітчизняних та зарубіжних вчених, що присвячені діелектричній спектроскопії як методу дослідження непровідних (або слабкопровідних) речовин у широкому діапазоні частот (10^{-3}…10^{16} Гц) дозволили встановити природу діелектричної проникності та механізми втрат електричної енергії під час поляризації [1–6].

Відомо, що більш чутливими до дії електричного поля, під впливом якого змінюється електромеханічний зв'язок у структурі діелектрика, який, у свою чергу, впливає на його проникність і, відповідно, й іншу поляризацію – полярні діелектрики і, особливо, сегнетоелектрики та споріднені матеріали [3]. Можливість управляти параметрами діелектрика пов'язана із зміною структури атомів (зниження жорсткості їх зв'язку) під дією електричного поля, що знижує їх поляризованість та інші параметри, що ним визначаються та впливає на обмеження свободи переорієнтації їх полярних елементів [5]. Так відомо, що в діелектрики, що мають діелектричну проникність $\varepsilon = 10^3 - 10^5$ електрично індуковані та п'єзоелектричні ефекти можуть бути настільки великими, що перевищують звичайні ефекти за своєю ефективністю [4]. А отже, впливовий ефективний контроль електромеханічних властивостей діелектрика можливий лише у діелектриках з високою діелектричною проникністю, яка може відрізнятися в п'єзоелектриках, піроелектриках і сегнетоелектриках релаксатора завдяки чутливості до електричного поля та їх еластичної податливості [7].

Постановка завдання. Електрично індукована п'єзоелектрика приймає максимальні значення в діелектриках з високою діелектричною проникністю, а їх висока ефективність забезпечується механізмами малоінерційної квазіпружної поляризації. З метою оцінки максимальних значень ефективності різних п'єзоелектричних матеріалів використовується метод діелектричної спектроскопії.

Даний метод дозволяє контролювати вплив механізмів електричної поляризації на параметри прояву електромеханічних ефектів та їх інерційність. Метою цієї статті є уточнення фізичних уявлень про природу електрично індукованих або контрольованих п'єзоелектричних ефектів. Для їх розуміння аналізуються фізичні механізми виникнення такого ефекту в п'єзоелектриках, піроелектриках та релаксорних сегнетоелектриках з урахуванням інерційності електромеханічного відгуку.

Виклад основного матеріалу. Поляризація, що індукована зовнішнім електричним полем, описується діелектричною проникністю ε. Даний параметр ε, так само, як і магнітна проникність μ та електрична провідність σ, у класичному розумінні випливає з рівнянь Максвелла, які були уперше виведені Лоренцом понад 100 років тому. Дані розрахунки проводилися за фізично нескінченно малими проміжком часу і об'ємом. Де таким часом можна вважати $\tau \leq$ 10-14 с, а об'єм вимірюється радіусом, що дорівнює приблизно десяти міжатомних відстаней у речовині. Натепер класична діелектрична проникність ε, потребує уточнення у зв'язку з величезною кількістю різноманітних даних, отриманих різними експериментальними методами для різних діелектриків.

Як відомо, ступінь впливу електричного поля на п'єзоелектричні та інші властивості діелектрика визначається величиною діелектричної проникності . Так електрично викликана п'єзоелектрична активність пропорційна квадрату діелектричної проникності. У більшості діелектриків вплив електричного поля на основні параметри незначний, а діелектрична проникність $\varepsilon \leq 10$. Проте в діелектриках, що мають $\varepsilon = 10^3 - 10^5$, електрично індуковані та п'єзоелектричні ефекти можуть бути настільки великими, що перевищують звичайні ефекти за своєю ефективністю [4]. Тому впливовий ефективний контроль електромеханічних властивостей діелектрика можливий лише у діелектриках з високою діелектричною проникністю, яка може відрізнятися в різних типах діелектриків завдяки їх чутливості до електричного поля та еластичності [7].

Нами розкриті деякі дискусійні питання про природу електрично індукованих або контрольованих п'єзоелектричних ефектів. Зокрема, аналізуються фізичні механізми виникнення такого параметру як діелектричнаа проникністью в п'єзоелектриках, піроелектриках та релаксорних сегнетоелектриках з урахуванням інерційності електромеханічного відгуку.

У будь-якому твердому діелектрику вплив електричного поля викликає електричну поляризацію, що супроводжується електрострикцією. Даний квадратичний ефект дуже малий, проте

в діелектриках, що мають велику діелектричну проникність, зокрема, піроелектрики та релаксорні сегнетоелектрики, навпаки.

Так під впливом поля зміщення в цих діелектриках електрострикція перетворюється в індуковану п'єзоелектрику, яка може бути більшою, ніж звичайний п'єзоелектричний ефект. Головною причиною цих ефектів є електрострикція, що змінює симетрію будь-якого ізотропного діелектрика, який стає ніби то полярним – нецентросиметричним. Таким чином шляхом зміни електричного поля зміщення можна контролювати як полярно-активну структуру, що природньо існує в кристалі, так і структуру індуковану в неполярному матеріалі.

Поляризаційні процеси, властивістю яких є діелектрична проникність характеризують електрично індуковано п'єзоелектрику. А тому за частотною залежністю діелектричною проникності ε(ω) можна здійснювати оцінку інерційних властивостей електромеханічного управління. Так інерційність п'єзоефекту проявляється у частотних областях, де спостерігається діелектрична дисперсія, так як поляризація встановлюється із запізненням у часі [7].

Розглянемо наведене судження про частотну межу встановлення п'єзоефекту до нелінійних п'єзоелектриків у випадку зміни швидкості звуку внаслідок електромеханічної дії.

Більшість нелінійних п'єзоелектриків це полікристалічні сегнетоелектрики, серед яких неполяризована кераміка виявляє високоефективний електричний контроль швидкості звуку, діелектрична проникність якої ε~1000. Цей матеріал є «гнучким» сегнетоелектриком, в якому сила внутрішньокристалічного зв'язку може бути порівнянна з впливом електричного поля. Широкий діапазон зміни швидкості звуку зумовлений переорієнтацією структурних доменів сегнетоелектрика, що у свою чергу пояснює виражений гістерезис керуючих параметрів.

Методом діелектричної спектроскопії оцінюють інерцію електричного контролю електромеханічних властивостей у сильному електричному полі (рис. 1, криві 2 і 3 в області I) [7].

На рис. 1 крива 3 описує ефективну діелектричну проникність ε'_{ef} та коефіцієнт втрат $\varepsilon\surd_{ef}$, що отримані шляхом усереднення діелектричної реакції за один період змінного поля. Крива 2 (рис. 1) показує діелектричну проникність ε' і коефіцієнт втрат $\varepsilon\surd$, що виміряні у слабкому електричному полі підвищеної частоти з одночасним перемиканням домену сильним низькочастотним полем.

Так діелектрична проникність у сильних полях (області I) на два порядки вище порівняно з слабким електричним полем (області II, III), тоді як дисперсійна частота сильного поля в мільйон разів нижча порівняно з слабким.

За результатами вимірювання в сильних полях, встановлено, що контроль переорієнтації домену, що призводить до гістерезисної залежності нелінійного типу. Де у полікристалічних сегнетоелектриках максимальна частота перемикання доменів можлива лише за частот порядку кілогерц, а в тонких плівках вона зростає до мегагерц.

Необхідно зазначити, що в сильних електричних полях виявлено декілька механізмів поляри-

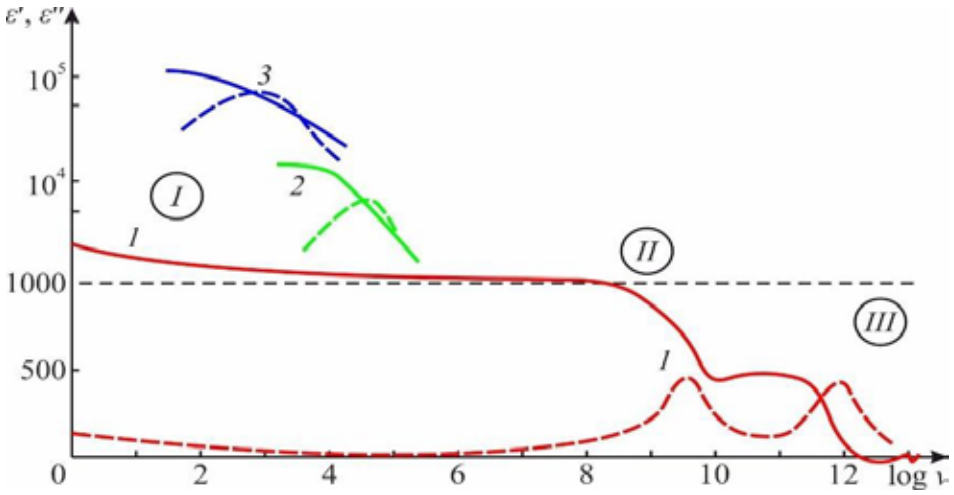


Рис. 1. Дисперсія діелектричної проникності в сегнетоелектричній фазі $BaTiO_3$, де ε′(ν) суцільними кривими показана залежність, а ε√(ν) пунктирними кривими); I – низькі частоти, сильні електричні поля, II – мікрохвильова область, слабкі поля; III – частоти інфрачервоного діапазону, слабкі поля

зації сегнетоелектриків, що сприяє більш швидкій поляризації в полярних кластерах, що локалізовані в доменних стінках. Так у сильному електричному полі (рис. 1, область I крива 2), внесок механізму поляризації на порядок менший, ніж у кривий 3. Даний механізм можна виміряти за допомогою високочастотної фільтрації відгуку (зміна швидкості звуку) під час одночасного перемикання доменів на низьких частотах. Отже використання нелінійних п'єзоелектриків, зокрема, сегнетоелектриків для створення електромеханічних та п'єзоелектричних пристроїв не є доцільним як через сильний гістерезис, так і через інерційність перемикання доменів.

Піроелектрики мають діелектричну проникність, що майже не розсіюється до міліметрових хвиль. На рис. 2(*а*) наведена температурна залежність діелектричної проникності піроелектрику – титанату барію [8]. В монокристалах та в кераміці сильно виражена діелектрична дисперсія виникає лише нижче точки Кюрі. У піроелектричній фазі (вище точки Кюрі) діелектрична проникність зменшується з частотою, і, відповідно, зростання її втрат починається лише на частоті близько 75 ГГц.

Даний тип дисперсії піроелектриків (рис. 2) на прикладі титанату барію, типовий для всіх сегнетоелектриків кисневo-октаедричного типу. За даними аналізу діелектричної дисперсії можна стверджувати, що процеси поляризації в піроелектриках не виявляють помітної інерційності електромеханічних властивостей практично до міліметрових хвиль. Це зумовлено м'яким режимом коливань структури кристалічної решітки перовскіту, в якому електрично викликаний п'єзоелектричний ефект залишається великим і вільним від гістерезису.

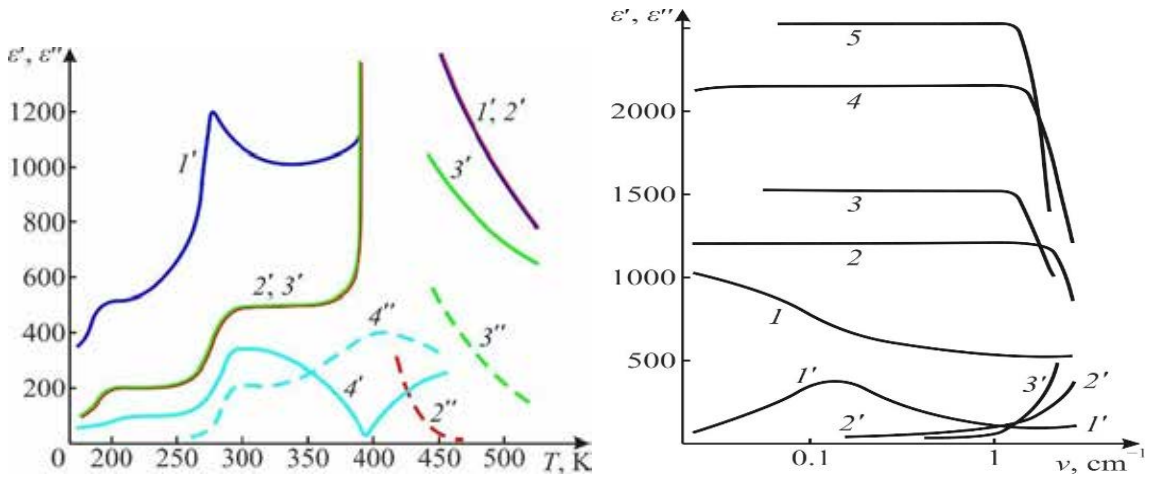
Хоча піроелектрики практично не є термостабільними структурами, проте задля їх використання знаходяться комплексні рішення, зокрема, у плівок термостабільність може бути вищою.

Висока діелектрична проникність у широкому діапазоні температур релаксорних сегнетоелектриків сприяє їх застосування в електронних пристроях, наприклад, у мікромеханізмах та мікродрайверах. Так величиною діелектричної проникності, що створюється актуатором релаксора характеризує контрольоване переміщення.

На рис. 3. представлена частотна дисперсія діелектричної проникності релаксора в широкому діапазоні частот, що дозволяє оцінити обмеження на продуктивність релаксорних сегнетоелектриків в різних електронних пристроях.

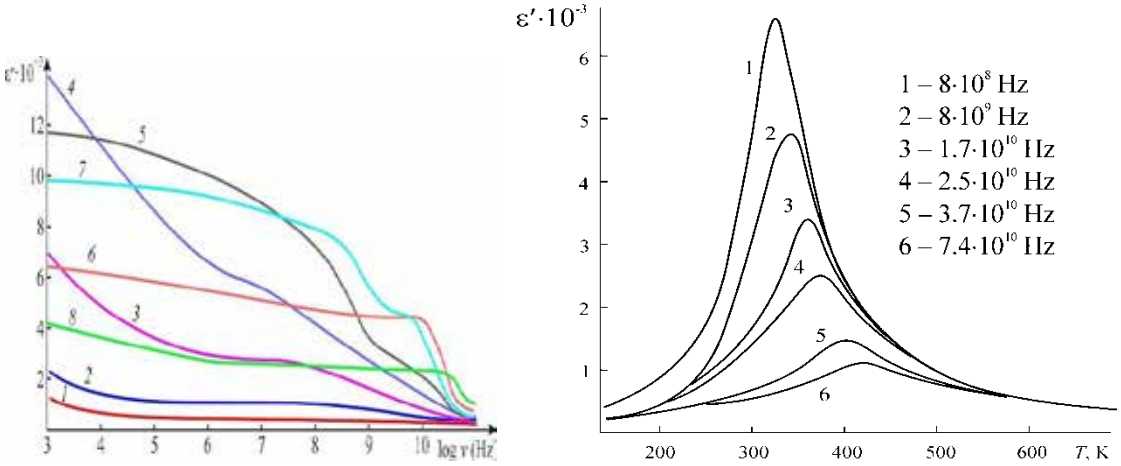
Саме електромеханічний зв'язок різних полярних кластерів релаксорного сегнетоелектрика здійснює переважний вплив на їх діелектричну проникність, тобто є домінуючим [8].

Розкриємо фізичні механізми широкого температурного максимуму діелектричної проникності двох основних внесків релаксорних сегнетоелектриків.



а *б*

Рис. 2. Діелектрична дисперсія в сегнетоелектриках та піроелектриках: а – температурна залежність діелектричної проникності ε′та коефіцієнта втрат титанату барію ε√на різних частотах: 1 ′– ε′на 1 МГц; 2 ′, 2 √– ε′, ε√на 9,4 ГГц; 3 ′, 3 √– ε′, ε√на 75 ГГц; 4 ′, 4 √– ε′, ε√на 340 ГГц [8]; б – частотна залежність ε′(1-5) і ε√(1-3 ′) ′при різних температурах: 1, 1 ′– полікристал при 22 °С, 2, 2 ′– полікристал при 200 °С, 3, 3 ′– монокристал при 200 °С, 4 – полікристал при 152 °С, 5 – монокристал при 155 °С [8]; частота вказана у зворотних довжинах хвиль: 1 см $^{-1}$ = 30 ГГц



а *б*

Рис. 3. Діелектричні спектри кристалів PMN: а – діелектрична проникність при температурах: 1 – 140 К, – 200 К, 3 – 240 К, 4 – 270 К, 5 – 290 К, 6 – 300 К, 7 – 320 К, 8 – 360 К, 9 – 400 К, 10 – 500К; б – залежність діелектричної проникності від температури на високих частотах [1, 8]

Низькочастотний (1–10^5 Гц) внесок у діелектричну проникність (ε-максимум) пояснюється переорієнтацією дипольних моментів полярних мікрообластей. Саме сильний електромеханічним зв'язок «м'якої поляризації» полярних областей перетворює електрострикцію на п'єзоелектричний ефект.

Високочастотний (10^8–10^{10} Гц) внесок у діелектричну проникність пояснюють зміщенням меж у структурі полярних нанообластей, що нагадує мікрохвильову дисперсію діелектричної проникності в сегнетоелектриках (рис. 1). Остання пов'язана з багатодоменною структурою сегнетоелектрика, тоді як у випадку релаксорного сегнетоелектрика, діелектрична дисперсія пояснюється «замороженою піроелектрикою» в межах полярних нанообластей [8].

Релаксорні сегнетоелектрики мають перевагу для використання в актуаторних пристроях, так як їх «п'єзомодуль» в десятки разів перевищує безінерційні піроелектрики, не дивлячись та їх підвищену інерційність. Дійсно, діелектрична проникність в деяких релаксорах на основі PMN (ε ≈ 40000), штучний п'єзомодуль досягає d = 2000 pC/N [6], що суттєво більше, ніж у кращої п'єзокераміки типу PZT, а електромеханічний ефект у релаксорах практично вільний від гістерезису.

Найбільша деформація під дією електричного поля спостерігається в кристалах $PbZn_{1/3}Nb_{2/3}O_3$–4,5%$PbTiO_3$ (PZN–4,5%PT) [2, 6].

Для таких кристалів електрично керована деформація в 10 разів перевищує даний параметр у кращої п'єзокераміки типу PZT, а найбільшою перевагою релаксорних сегнетоелектриків є практично повна відсутність гістерезису, який іноді описують як властивість «гіганської» електрострикції [9, 10].

Отже діелектричними дисперсійними механізмами можна визначати швидкість відгуку в сегнетоелектричних пристроях за швидкістю звуку в самих релаксорах. Електромеханічний внесок у діелектричну проникність за швидкістю звуку впливає на швидкість відгуку зазначених пристроїв і стає домінуючим фактором, що залежить від розміру такого релаксорного елементу [11].

Виникнення п'єзоелектричного резонансу та інших проявів п'єзоелектричної активності відбувається виключно під час дії керуючої напруги. Даний електрично індукований п'єзоефект обумовлений інерційністю керування електроіндукованою деформацією. Остання, як показано, визначається дисперсією діелектричної проникності в піроелектриках або релаксорних сегнетоелектриках.

Використання електрокерованих п'єзоелектричних пристроїв забезпечує високу точність руху, а тому широко застосовується в електроніці, робототехніці, машинобудуванні та приладобудуванні.

Висновки. Електрично індукована п'єзоелектрика є максимальною в діелектриках, що мають високу діелектричну проникність, ефективність якої забезпечується малоінерційною квазіпружною поляризацією. Для оцінки максимальної ефективності різних п'єзоелектричних матеріалів використовується метод діелектричної спектроскопії. Даний метод дозволяє контролю-

вати вплив механізмів електричної поляризації на параметри прояву електромеханічних ефектів та їх інерційність.

Підтверджено, що поляризаційні механізми у п'єзокераміці обмежують швидкість електромеханічних процесів в СВЧ-діапазоні, а в п'єзокристалах – не обмежують взагалі.

Встановлено, що використання у якості електромеханічних пристроїв нелінійних сегнетоелектриків п'єзоелектричного типу є недоцільним, як через сильний гістерезис, так і через інерційність перемикання доменів. Хоча дані електромеханічні пристрої і мають велику електромеханічну реакцію (відклик), інерційність перемикання доменів для об'ємних структур обмежена частотою в кілогерц, а для плівок – в кілька мегагерц.

Встановлений електромеханічний ефект у піроелектриках значно нижчий та менш керований, вони практично безінерційні та їх використання можливе у вузькому діапазоні температур. Релаксорні сегнетоелектрики забезпечують великий і практично безгістерезисний ефект. Зазначений ефект суттєво знижується на високих частотах – кілогерцових і особливо на мегагерцових, релаксорні сегнетоелектрики успішно використовуються в актуаторних пристроях для отримання та технічного застосування електрично індукованого п'єзоефекту.

Список літератури:

1. Bovtun, V., Veljko, S., Savinov, M., *et. al*. Broadband dielectric spectroscopy of PZN-8%PT Single Crystal. Ferroelectrics, 2005, 318, pp. 179-183. https://doi.org/10.1080/00150190590966351

2. Newnham R. E., Sundar V R YimnirunJ. Su j., Zhang Q. M. Electrostriction: Nonlinear electromechanical coupling in solid dielectrics. Journal of Physical Chemistry B, 1997, 101(48), pp. 10141-10150. https://doi.org/10.1021/jp971522c

3. Newnham, R.E. Properties of Materials: Anisotropy, Symmetry, Structure (Oxford, 2004; online edn, Oxford Academic, 12 Nov. 2020). https://doi.org/10.1093/oso/9780198520757.001.0001

4. Park, S.-E., Shrout, T. R. Ultrahigh strain and piezoelectric behavior in relaxor based ferroelectric single crystals. Journal of Applied Physics, 1997, 82(4), pp. 1804–1811. https://doi.org/10.1063/1.365983

5. Poplavko, Y.M., Yakymenko, Y.I. Functional dielectrics for electronics. Fundamentals of conversion properties. Woodhead Publishing, 2020. https://doi.org/10.1016/C2018-0-092-8

6. Li, F., Cabral, M. J., Xu, B., Dickey, E. C., LeBeau, J. M., Wang, J., Luo, J., Taylor, W., Bellaiche, L., Xu, Z., Chen, L.-Q., Shrout, T. R., Zhang, S. Giant piezoelectricity of Sm-doped $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$PbTiO_3$ single crystals. Science, 2019, 364: 6437, pp. 264–268. https://doi.org/10.1126/science.aaw2781

7. Poplavko, Yuriy. (2024). Electrically induced and controlled piezoelectricity. Materials Plus, 2024, pp. 110-120. https://doi.org/10.37256/mp.3120244800

8. Poplavko, Y.M. The nature of large dielectric constant in relaxor ferroelectrics. Ferroelectrics, 2004, 298, pp. 253-259. https://doi.org/10.1080/00150190490423642

9. Poplavko Y, Yakimenko Y, Large parameters and giant effect in electronic materials. Radioelectronics and Communications Systems, 2020, 63(6), pp. 289–298. https://doi.org/10.3103/S0735272720060023

10. Jiacheng Yu, Pierre-Eymeric Janolin. Defining "giant" electrostriction. Journal of Applied Physics, 2022, 131(17): 170701. https://doi.org/10.1063/5.0079510

11. Kamba S., Kempa M., Bovtun V., Petzelt J., Brinkman K., Setter N. Soft and central mode in $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ relaxor ferroelectric. Journal of Physics: Condensed Matter, 2005, 17(25): 3965. https://doi.org/10.1088/0953-8984/17/25/022

Voronov S.O., Poplavko Yu.M. SOME ASPECTS OF ELECTRICALLY INDUCED PIEZOELECTRICITY

The article is devoted to certain aspects of electrically induced piezoelectricity. Linearized electrostriction, which occurs under the action of a strong electric field in a solid dielectric, is known as a quasilinear electromechanical effect, similar to piezoelectricity. This effect is observed in a displacement-type electric field and is proportional to the square of the dielectric permittivity. This article reveals some controversial issues regarding the dielectric permittivity and analyzes the physical mechanisms of the electromechanical effect in piezoelectrics, paraelectrics and relaxor ferroelectrics, taking into account the inertia of the electromechanical response. Electrically induced piezoelectricity is maximal in dielectrics with a high dielectric permittivity, the efficiency of which is ensured by low-inertia quasielastic polarization. The method of dielectric spectroscopy is used to estimate the maximal efficiency of various piezoelectric materials. This method allows to control the influence of the mechanisms of electric polarization on the parameters of the manifestation of electromechanical effects and their inertia. It has been confirmed that polarization mechanisms in piezoceramics limit the speed of electromechanical processes in the microwave range, and in piezoelectric crystals – practically do not limit.

It has been established that the use of nonlinear ferroelectrics of the piezoelectric type as electromechanical devices is impractical, both due to strong hysteresis and due to the inertia of domain switching. Although these electromechanical devices have a large electromechanical response (response), the inertia of domain switching for bulk structures is limited to a frequency in kilohertz, and for films – to several megahertz. The specified electromechanical effect in paraelectrics is much lower and less controllable, they are practically inertialess and their use is possible in a narrow temperature range. Relaxor ferroelectrics provide a large and practically hysteresis-free effect. This effect is significantly reduced at high frequencies – kilohertz and especially megahertz. Relaxor ferroelectrics are successfully used in actuarial devices to obtain and technically apply the electrically induced piezoelectric effect.

Key words: *piezoelectrics, paraelectrics, ferroelectrics, electric polarization, dielectric properties.*

Відомості про авторів

Баутіна М.В. – Master, Data Scientist, SoftServe

Боженко М.І. – Senior Infrastructure Engineer, Lotusflare

Боровльова С.Ю. – старша викладачка кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Вакалюк Т.А. – доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Василенко О.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці та фізики Сумського національного аграрного університету

Вишемірська Я.С. – старший викладач кафедри інженерних систем та технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Воєводін Є.В. – аспірант кафедри інформаційних технологій Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького

Воронов С.О. – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Глухова Н.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

Голубєв Л.П. – кандидат технічних наук, доцент, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гончаров Д.С. – аспірант кафедри комп'ютерної інженерії Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Горбань Г.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Григорчук Г.В. – доктор філософії, доцент, доцент кафедри фізико-математичних наук Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Григорчук Л.І. – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Гриценко К.Г. – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри економічної кібернетики Сумського державного університету

Гуйда О.Г. – кандидат наук з державного управління, професор, завідувач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Далека В.Х. – доктор технічних наук, професор кафедри електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

Деркач Я.О. – магістрант кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського Харківського національного університету радіоелектроніки

Джунь Й.В. – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри математичного моделювання Приватного вищого навчального закладу «Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука»

Дичка А.І. – кандидат технічних наук, асистент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Дичко А.О. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерних систем та технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Дмитрів І.Я. – аспірант Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Дячук А.В. – аспірант Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Єфіменко А.Ю. – докторка філософії, асистентка кафедри економічної кібернетики Сумського державного університету

Жиляєв Є.В. – здобувач Державного університету «Житомирська політехніка»

Звєрєв В.П. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення та кібербезпеки Державного торговельно-економічного університету

Зєнов Д.О. – аспірант кафедри льотної експлуатації та безпеки польотів Української державної льотної академії

Зигін С.Є. – аспірант кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки Харківського національного університету радіоелектроніки

Зилевіч М.О. – доктор філософії, асистент кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Зима І.В. – старший викладач кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Інституту штучного інтелекту та робототехніки Національного університету «Одеська політехніка»

Зубченко Н.С. – студент кафедри військової підготовки Університету митної справи та фінансів

Іванців Н.Т. – аспірант Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Іллюченко П.О. – начальник відділу електротехнічних виробів науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Ільїн М.О. – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кавин Б.Я. – аспірант кафедри комп'ютерних технологій у видавничо-поліграфічних процесах Національного університету «Львівська політехніка»

Кавин С.Я. – аспірант кафедри комп'ютерних технологій у видавничо-поліграфічних процесах Національного університету «Львівська політехніка»

Каменський А.О. – аспірант кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії Черкаського державного технологічного університету

Кандиба І.О. – доктор філософії, старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Катамай Ю.В. – аспірантка Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Качурівська Г.М. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та вищої математики ВП Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

Качурівський В.О. – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та вищої математики ВП Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

Киричек Г.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Національного університету «Запорізька політехніка»

Ківа І.Л. – кандидат технічних наук, доцент, доцент Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Козаченко І.М. – начальник підрозділу Державного центру кіберзахисту Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України

Койбічук В.В. – кандидат економічних наук, доцент кафедри економічної кібернетики Сумського державного університету

Корнієнко Б.Я. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Корнута В.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Коротенко Г.М. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

Кундос М.Г. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інформаційних систем та обчислювальних методів Приватного вищого навчального закладу «Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука»

Кучерявий В.М. – доктор філософії, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Кушнерьов О.С. – доктор філософії, старший викладач кафедри економічної кібернетики Сумського державного університету

Ладієва Л.Р. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Легеза В.П. – доктор технічних наук, професор, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Литвин В.І. – аспірант Національного університету біоресурсів та природокористування України

Лобанчикова Н.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Лу Сіньї – магістр кафедри геоінженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Маринич І.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету

Меренько Б.І. – аспірант Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Миненко С.В. – доктор філософії, старший викладач кафедри економічної кібернетики Сумського державного університету

Михайлов В.М. – доктор педагогічних наук, професор, старший науковий співробітник сектору пожежної безпеки та технологій науково-дослідного центру протипожежного захисту Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Мінаєва Ю.Ю. – старший викладач кафедри інженерних систем та технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Несенюк Л.П. – молодший науковий співробітник відділу досліджень, статистики пожеж та надзвичайних ситуацій науково-дослідного центру проти-пожежного захисту Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Нещадим О.М. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ніжник В.В. – доктор технічних наук, професор Науково-дослідного центру протипожежного захисту Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Нікітченко М.І. – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Національного університету «Одеська політехніка»

Олещенко Л.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Омецинская Н.В. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інженерних систем та технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Пальоний А.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри аеронавігації, метеорології та організації повітряного руху Української державної льотної академії

Пахомова В.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електронних обчислювальних машин Державного університету науки і технологій Дніпровського інституту інфраструктури і транспорту

Пелипенко Н.С. – магістр кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пестов О.Д. – магістр факультету комп'ютерних наук та технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

Плекан А.І. – магістр кафедри програмування Львівського національного університету імені Івана Франка

Поляковська Н.О. – Master, Data Scientist, SoftServe

Поплавко Ю.М. – доктор фізико-математичних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Прозур В.О. – аспірант кафедри штучного інтелекту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Прокопович-Ткаченко Д.І. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій Університету митної справи та фінансів

Ремез Н.С. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри геоінженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Розломій І.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії Черкаського державного технологічного університету

Рубан С.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету

Сваха Д.М. – аспірант кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Семенюк В.В. – старший інженер розробник програмного забезпечення Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Соколова Н.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», учитель вищої категорії, учитель-методист

Соловей Л.Я. – старший викладач кафедри інформаційних систем та обчислювальних методів Приватного вищого навчального закладу «Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука»

Стабецька Т.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького

Стьопкін А.В. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри математики та інформатики ДВНЗ «Донбаський державний педагогічний університет»

Тихонович Д.П. – студент Інституту штучного інтелекту та робототехніки Національного університету «Одеська політехніка»

Тиш Є.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя

Тягунова М.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Національного університету «Запорізька політехніка»

Ушкаренко О.О. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Фаррахов О.В. – кандидат технічних наук, виконуючий обов'язки вченого секретаря Центру інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України

Фуртат С.О. – старший викладач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Харламенко В.Ю. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету

Хрестян А.В. – магістр спеціальності «Комп'ютерна інженерія» кафедри електронних обчислювальних машин Державного університету науки і технологій Дніпровського інституту інфраструктури і транспорту

Черкаський О.В. – студент кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій Університету митної справи та фінансів

Швець М.Д. – кандидат технічних наук, доцент Національного університету водного господарства та природокористування України

Ширін А.Л. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

Янчук В.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації імені професор Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка»

Ясінський А.М. – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри математичного моделювання Приватного вищого навчального закладу «Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука»

Науковий журнал

ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО

Серія: Технічні науки

Том 36 (75) № 1 2025

Частина 2

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського
м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33
Електронна пошта: editor@tech.vernadskyjournals.in.ua
Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.
Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 27,55. Ум. друк. арк. 36,04. Зам. № 0325/255
Підписано до друку 21.02.2025. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.