

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**



В І С Н И К

**Східноукраїнського
національного університету
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 3 (301)
2026**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Київ 2026

ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

№ 3 (301) 2026

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ЗАСНОВАНО У 1996 РОЦІ

ВИХІД З ДРУКУ - ДВНАДЦЯТЬ РАЗІВ НА РІК

Засновник

Східноукраїнський національний університет
імені Володимира Даля

Журнал зареєстровано

в Міністерстві юстиції України

Свідоцтво про державну реєстрацію

серія КВ № 15607-4079ПР

від 18.08.2009 р.

VISNIK

OF THE VOLODYMYR DAHL EAST
UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY

№ 3 (301) 2026

THE SCIENTIFIC JOURNAL

WAS FOUNDED IN 1996

IT IS ISSUED TWELVE TIMES A YEAR

Founder

Volodymyr Dahl East Ukrainian National
University

Registered by the Ministry

of Justice of Ukraine

Registration Certificate

KB № 15607-4079ПР

dated 18.08.2009

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

ISSN 1998-7927(print)

ISSN 2664-6498 (online)

Головна редакційна колегія:

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

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

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

Білобородова Т.О. канд. техн. наук,

Глікіна І.М., докт. техн. наук,

Грицюк В.Ю., канд. техн. наук,

Д'яченко Ю.Ю., докт. екон. наук,

Ковтанець М.В., канд. техн. наук,

Кравченко К.О., канд. техн. наук,

Лорія М.Г., докт. техн. наук,

Могила В.І., докт. техн. наук,

Носко О.П., канд. техн. наук,

Проказа О.І., канд. техн. наук,

Семененко І.М., докт. екон. наук,

Сергієнко О.В., канд. техн. наук,

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

Целіщев О. Б., докт. техн. наук

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

Рекомендовано до друку Вченою радою Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Протокол № 8 від 27 березня 2026 р.)

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

© Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2026

© Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2026



Видання забезпечує прозорий та етичний процес публікації,
а також відкритий доступ до всіх матеріалів відповідно
до умов ліцензії [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

З М І С Т

Спеціальність 122

Доля О.Є., Доля Е.К. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЦИФРОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ У ПРОЦЕСІ НАВЧАННЯ	5
Могильний Г.А., Семенов М.А., Донченко В.Ю., Швець І.М., Донченко С.М. АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕДУР КАСКАДНОГО КЕРУВАННЯ ЖИВЛЕННЯМ СЕРВЕРІВ VMWARE VSPHERE ЗАСОБАМИ МЕРЕЖЕВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ.....	14
Полупан Ю.В. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КВАНТОВИХ СХЕМ ВІДНІМАННЯ В БАЗИСІ СУЧАСНИХ КВАНТОВИХ ПРОЦЕСОРІВ	25
Ратов Д.В., Марченко Д.М., Захожай О.І. ІНТЕРАКТИВНИЙ WEB ЗАСТОСУНОК ЦИФРОВОГО УНІВЕРСИТЕТУ	33
Філоненко О. Ю. ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ІНТЕГРАЦІЇ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГІЙ ТА ML-МОДЕЛЕЙ У СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ФІНАНСОВИМИ РИЗИКАМИ	45

Спеціальність 133

Гриджук Я.С., Чудик І.І., Слабий О.О., Кондур Т.І., Мохній І.Ю. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ПОЗДОВЖНЬОГО РЕЗОНАНСУ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ ДЛЯ БУРІННЯ СКЕРОВНИХ ДІЛЯНОК СВЕРДЛОВИН	50
Мелконов Г.Л., Фесенко Г.В., Мелконова І.В., Іщенко В.К. АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ НАВІСНИХ АГРЕГАТІВ У СИСТЕМІ МАШИННО-ТРАКТОРНИХ КОМПЛЕКСІВ	65

Спеціальність 141

Rudniev Y.S., Romanchenko J.A. RESEARCH OF ELECTROMECHANIC SYSTEMS WITH VARIABLE PARAMETERS USING THE EXAMPLE OF A TRANSPORT MECHANISM	72
---	----

Спеціальність 151

Асманкіна А.А., Сотнікова Т.Г. АНАЛІТИЧНА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ РЕЗУЛЬТАТІВ STEM-ОСВІТИ	80
Поркуян О.В., Самойлова Ж.Г. ВПЛИВ ФУНКЦІЇ АКТИВАЦІЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ НА АПРОКСИМАЦІЮ ДАНИХ ОСНОВНИХ КАНАЛІВ КЕРУВАННЯ В ПЕРІОД ПУСКУ РЕАКТОРУ СИНТЕЗУ ОЦТОВОЇ КИСЛОТИ	87

Спеціальність 161

Червінський Т.І., Копач А.М., Гринишин О.Б. ВПЛИВ РЕЖИМУ ПІРОЛІЗУ ВІДПРАЦЬОВАНОЇ КОМПРЕСОРНОЇ ОЛИВИ НА ВЛАСТИВОСТІ ОДЕРЖАНИХ ПРОДУКТІВ	94
---	----

CONTENTS

Speciality 122

Dolia O.E., Dolia E.K. ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF DIGITAL TOOLS IN THE LEARNING PROCESS	5
Mohylnyi H.A., Semenov M.A., Donchenko V.U., Shvets I.M., Donchenko S.M. AUTOMATING CASCADING POWER MANAGEMENT PROCEDURES FOR VMWARE VSPHERE SERVERS USING NETWORK INFRASTRUCTURE.....	14
Polupan Yu.V. COMPARATIVE ANALYSIS OF QUANTUM SUBTRACTION CIRCUITS IN THE BASIS OF MODERN QUANTUM PROCESSORS.....	25
Ratov D.V., Marchenko D.M., Zakhozha O.I. INTERACTIVE WEB APPLICATION OF THE DIGITAL UNIVERSITY	33
Filonenko O. Yu. STUDY OF THE POSSIBILITY OF INTEGRATING BLOCKCHAIN TECHNOLOGIES AND ML MODELS INTO FINANCIAL RISK MANAGEMENT SYSTEMS	45

Speciality 133

Gridzhuk Ya.S., Chudyk I.I., Slabyi O.O., Kondur T.I., Mokhniy I.Yu. MATHEMATICAL MODEL FOR ESTIMATING THE LONGITUDINAL RESONANCE OF THE DRILL STRING FOR DRILLING DIRECTIONAL SECTIONS OF WELLS	50
Melkonov H.L., Fesenko H.V., Melkonova I.V., Ishchenko V.K. ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF THE OPERATION OF MOUNTED IMPLEMENTS IN THE SYSTEM OF TRACTOR-IMPLEMENT COMPLEXES	65

Speciality 141

Rudniev Y.S., Romanchenko J.A. RESEARCH OF ELECTROMECHANIC SYSTEMS WITH VARIABLE PARAMETERS USING THE EXAMPLE OF A TRANSPORT MECHANISM	72
---	----

Speciality 151

Asmankina A.A., Sotnikova T.H. ANALYTICAL COMPUTER-INTEGRATED SYSTEM FOR MONITORING STEM EDUCATION OUTCOMES	80
Porkuian O.V., Samojlova Zh.G. THE INFLUENCE OF THE ACTIVATION FUNCTION OF A NEURAL NETWORK ON THE APPROXIMATION OF DATA FROM THE MAIN CONTROL CHANNELS DURING THE START-UP OF AN ACETIC ACID SYNTHESIS REACTOR.....	87

Speciality 161

Chervinskyi T.I., Kopach A.M., Grynysyn O.B. INFLUENCE OF PYROLYSIS MODE OF WASTE COMPRESSOR OIL ON THE PROPERTIES OF THE OBTAINED PRODUCTS.....	94
---	----

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-301-3-5-13>

УДК 004

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЦИФРОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ У ПРОЦЕСІ НАВЧАННЯ

Доля О.Є., Доля Е.К.

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF DIGITAL TOOLS IN THE LEARNING PROCESS

Dolia O.E., Dolia E.K.

У сучасних умовах швидкого розвитку інформаційних технологій і активного використання дистанційних форм навчання значно зростає цінність використання цифрових інструментів в організації освітнього процесу. Використання онлайн платформ (сервісів для організації навчання), сервісів для відеоконференцій та інструментів для створення навчальних матеріалів дозволяє освітянам і здобувачам освіти підвищувати дієвість взаємодії між учасниками освітнього процесу, спростити процес отримання інформації (зміст практичних завдань та їх терміни виконання, навчальні та допоміжні матеріали), а також забезпечити гнучкість навчання. Незважаючи на широке розповсюдження таких технологій у сучасному навчанні, важливим залишається питання оцінки їх зручності й ефективності з точки зору здобувачів освіти.

Метою даного дослідження є аналіз наукової літератури та проведення опитування серед студентів щодо ефективності цифрових інструментів, що використовуються у процесі їхнього навчання, а також визначити ключові переваги та недоліки на основі результатів опитування респондентів. У роботі розглянуто класифікацію цифрових інструментів за їхніми можливостями в освіті та проаналізовано їхні основні можливості.

Емпірична частина цього дослідження ґрунтується на аналізі результатів опитування, проведеного серед студентів дистанційного навчання, які використовують цифрові освітні сервіси кожного дня. Під час дослідження було оцінено основні можливості використання платформ для організації навчального процесу, сервісів для візуалізації даних та створення навчального матеріалу, сервісів онлайн-зустрічей, переваги та

фактори вибору цифрових інструментів. Паралельно було проаналізовано проблеми, які виникають під час використання цифрових інструментів у здобувачів освіти. Особливу увагу приділено оцінці зручності інтерфейсу, функціональних можливостей та швидкості доступу до використання цифрових сервісів.

За результатами було визначено найбільш популярні інструменти, що використовуються у процесі навчання та створення презентацій, а також виявлено основні фактори, які впливають на ефективність їх застосування. Ключовими цифровими інструментами виявилися платформи для управління навчанням та сервіси для проведення відеоконференцій. Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення організації освітнього процесу та підвищення ефективності використання цифрових технологій у навчанні.

Ключові слова: цифрові інструменти, дистанційне навчання, освітні технології, онлайн сервіси, освітній процес, ефективність.

Вступ. Швидка трансформація освітнього процесу зумовлена цифровізацією більшості сфер людської діяльності, що вимагає відходити від традиційних методів навчання та переходити до навчання за допомогою сучасних технологій. Впровадження цифрових інструментів перетворилося на потребу переходити до комплексних систем управління навчанням. Сучасна трансформація освіти вимагає не просто відмову від паперових носіїв на користь цифрових аналогів, а повністю

переосмислювати методики викладання, де цифрові технології стають основою розвитку здобувачів освіти та отримання знань.

Проте інтенсивне насичення освітнього процесу новітніми технологіями (програмними забезпеченнями, додатками, тощо) не є гарантією того, що рівень підвищення якості знань значно збільшиться. Досвід останніх років демонструє те, що без належного супроводу та пояснення використання цифрових інструментів ці технології можуть знижувати концентрацію уваги та рівень сприйняття матеріалу. Це актуалізує необхідність проведення ґрунтовного аналізу ефективності обраних засобів, оскільки такий підхід дозволяє відокремити переваги використання цих допоміжних технологій, що реально показують добрі показники, від тих, що виконують лише зайву функцію.

Саме тому це дослідження є комплексною оцінкою впливу цифрових технологій на результативність навчання, виходячи з критеріїв залученості, швидкості засвоєння інформації, зручності використання та збереження знань. Аналіз цих технологій дозволяє розглянути як технічні характеристики таких інструментів, так і переваги їхнього застосування в умовах дистанційного навчання. Такий підхід дозволить сформулювати основні можливості використання сучасних технологій в навчанні та виокремити певні переваги цих інструментів.

Метою роботи є аналіз сучасних цифрових освітніх ресурсів, їх теоретичне обґрунтування та експериментальна перевірка ефективності використання цих інструментів у навчальному процесі. Необхідно визначити головні переваги використання цих сучасних технологій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати особливості використання деяких цифрових інструментів у освітньому процесі;
- розглянути основні проблеми та переваги цих технологій;
- дослідити використання платформ серед студентів;
- провести опитування серед студентів (учасників дистанційного навчання) щодо зручності використання цифрових сервісів у навчанні;
- проаналізувати отримані результати опитування та визначити переваги цифрових інструментів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У науковій літературі питання використання цифрових інструментів у

навчальному процесі порушують деякі автори. Аналіз публікацій показує, що використання платформ, сервісів для відеозв'язку та інструментів для створення навчального контенту суттєво впливає на організацію освітньої діяльності та зміну традиційних підходів до навчання на більш сучасні. У працях автори підкреслюють увагу на тому, що цифрові технології сприяють підвищенню ефективності засвоєння знань та покращенню комунікації між учасниками освітнього процесу. Тому результати останніх досліджень створюють теоретичний фундамент знань для аналізу цифрових інструментів, які застосовуються у навчанні та дозволяють окреслити ключові аспекти, що потребують подальшого вивчення.

У статті «Цифрові інструменти комунікації в освітньому процесі закладу вищої освіти» [1] автори розглядають організацію освітнього процесу з використанням цифрових інструментів, як пріоритетне завдання закладів вищої освіти. Зазначено, що ці технології значно підвищують ефективність та результативність освіти в умовах дистанційного навчання. Викладачам необхідно використовувати різні цифрові інструменти, обирати найбільш ефективні засоби комунікації зі студентами. Автори розглядають один з інструментів, який можна використовувати в освіті, бо однією з переваг є доступність, інтерактивність і креативність. Було з'ясовано, що ефективне використання інтерактивних дошок сприяє розвитку аналізу інформації та критичного мислення.

В іншій статті «Використання цифрових технологій у педагогічному процесі для індивідуалізації навчання» [2] автори зазначають те, що цифрові технології змінюють сучасну освіту та відкривають нові можливості для зміни навчання. Результати їхнього дослідження підтвердили те, що цифрові технології надають можливість адаптувати складність матеріалів і забезпечувати зворотний зв'язок. Водночас автори акцентують увагу на те, що впровадження цифрових технологій постає перед певними викликами, такими як нерівномірний доступ, недостатня цифрова грамотність користувачів, технічні обмеження та ризики для здоров'я.

В роботі «Цифрові інструменти в професійній освіті України: історія виникнення, особливості впровадження та перспективи» [3] автори звертають увагу на цифрову трансформацію суспільства, яка вимагає від науки постійного розвитку та наголошує на

інноваціях. Автори розділяють цифрові інструменти на певні групи, що використовуються в освітньому процесі, які включають в себе: інструменти для проведення онлайн конференцій, інструменти для створення навчальних матеріалів, інструменти для організації даних, системи управління навчанням, засоби оцінювання знань студентів та інше.

В статті [4] автори проаналізували використання цифрових сервісів у підготовці майбутніх учителів. Акцентується увага на тому, що в умовах модернізації освіти та введення нових державних освітніх стандартів, сучасний педагог не може здійснювати освітню діяльність без використання сучасних цифрових інструментів, бо вони є незамінними й універсальними. Було визначено сутність поняття «цифрові технології» і представлено характеристики цифрових інструментів, які сприяють створенню нового цифрового середовища; розширюють традиційні методи навчання сучасними технологіями; забезпечують активний зв'язок у процесі навчання. Авторами було зроблено висновки, що освітній процес стає гнучким, доступним, особливо в умовах дистанційного навчання, із використанням цифрових інструментів.

У своїй статті [5] автори дослідили значення сучасних цифрових інструментів у формуванні інформаційно-цифрової компетентності здобувачів освіти. Було розглянуто актуальні виклики цифровізації та підкреслено необхідність інтеграції сучасних методів навчання, цифрових платформ та інструментів. Розкрито можливості використання додатків Google та цифрових інструментів для формування інформаційної грамотності, що сприяють розвитку критичного мислення, творчих здібностей здобувачів освіти, готуючи їх до викликів буденного життя.

Дослідники у своїй статті [6] проаналізували можливості цифрових інструментів Google для організації освітнього процесу, коли дистанційне навчання стало єдиною доступною формою в системі освіти. Автори звертають увагу на те, що дистанційне навчання неможливе без використання цифрових інструментів, адже їх використання розширює традиційні методи навчання новими методами подання інформації і способами взаємодії. Було розглянуто найпоширеніші цифрові інструменти у вітчизняних ЗВО. Зазначено, що використання таких цифрових технологій надає змогу оптимізувати навчальний процес, надати йому

інтерактивності та підвищити цікавість до навчання.

Виклад основного матеріалу дослідження. У сучасних умовах цифрові інструменти відіграють важливу роль в організації освітнього процесу [7]. Використання різноманітних платформ та програм для створення навчального контенту сприяє зручності формування навчальних матеріалів і виконання робіт, спрощує взаємодію між учасниками освітнього процесу та розширює можливості навчання студентів. Цифровізація сучасної освіти дозволяє покращити процес навчання й забезпечити індивідуальний підхід до отримання знань.

Особливої актуальності використання новітніх цифрових інструментів набуло в умовах дистанційного навчання. В таких умовах сучасні освітні платформи та онлайн-сервіси стали основними засобами організації навчального процесу [8], передачі/отримання навчальних матеріалів, виконання та перевірки завдань, а також проведення занять у режимі онлайн. Використання наведених технологій дозволяє організовувати освітянам безперервність освітнього процесу незалежно від місця перебування та години доби.

Першим етапом аналізу є класифікація цифрових інструментів за їхніми можливостями в освіті, їх варто поділити три ключові групи: системи управління навчанням (Moodle чи Google Classroom) [9], сервіси онлайн зустрічей (Zoom або Google Meet) та інтерактивні платформи для візуалізації та створення навчального матеріалу (Canva та інші). Кожна група виконує свою роль в освіті: системи управління навчанням створені для управління та розповсюдження навчальних курсів, а також відстеження успішності здобувачів освіти; сервіси онлайн зустрічей пропонують відеозв'язок, демонстрацію екрана та чати для взаємодії учасників зустрічі; інтерактивні платформи надають можливість створювати гарні презентації, тести, інтерактивні плакати, що підвищують залученість і зацікавленість учнів.

Крім того ефективність використання цифрових інструментів дуже сильно залежить від їх функціональних можливостей, зручності інтерфейсу та стабільності роботи. Водночас важливою частиною є рівень володіння цифровими технологіями освітян і здатність молоді застосовувати різні онлайн-сервіси під час виконання навчальних завдань і швидко опановувати сучасні технології. Тому виникає потреба дослідити, які саме цифрові

інструменти найчастіше використовуються в навчальному процесі серед здобувачів освіти та які з них, на їх думку, вважаються найбільш зручними й ефективними.

З метою отримання більш об'єктивної інформації щодо використання цифрових сервісів у навчанні було проведено опитування здобувачів освіти. У межах цього дослідження було проаналізовано використання різних цифрових інструментів, оцінено їх зручність та визначено основні переваги й труднощі, що виникають під час їх застосування при роботі. Отримані результати дозволяють визначити ефективні цифрові інструменти та окреслити напрями подальшого вдосконалення організації навчального процесу із використанням сучасних інформаційних технологій.

У дослідженні взяли участь респонденти – здобувачі вищої освіти. Анкета складалася з 8 запитань, які стосувалися використання платформ для організації навчання, оцінки сервісів для проведення відеоконференцій, інструментів для роботи з даними, а також програм для створення навчального контенту. Студентам пропонувалося оцінити зручність використання різних цифрових інструментів та визначити їх основні переваги.

Блок №1: Оцінка системи управління навчанням (Google Classroom)

Google Classroom - це вебсервіс від Google, розроблений для навчальних закладів, який

спрощує створення, поширення, оцінювання завдань та спілкування між вчителями й учнями. Серед усіх переваг було виділено основні: зручний зворотній зв'язок та оцінювання; мобільність та доступність; організація класу в цифровому середовищі та інші [10].

У перших двох питаннях респондентам було запропоновано оцінити зручність використання платформи Google Classroom та які можливості вони використовують найчастіше. Більшість респондентів (84,6%) вважають платформу дуже зручною. Серед основних переваг платформи студенти виокремили найкращі можливості додатка, а саме: завантаження виконаних робіт (84,6%), перегляд оцінок (69,2%) та отримання завдань до виконання (61,5%) (рис. 1).

Блок №2: Оцінка сервісів для візуалізації даних та створення навчального матеріалу

Респондентам було поставлено питання який сервіс для створення презентацій вони вважають найзручнішим (рис. 2). 61,5% студентів вважають, що Canva, популярна онлайн-платформа графічного дизайну, є найбільш зручною для створення презентацій без глибоких професійних знань. Зокрема авторкою Криворучко І. [11] було визначено, що вебсервіс Canva є потужним інструментом, який може використовуватися для створення адаптованих навчальних матеріалів для дітей з ООП.

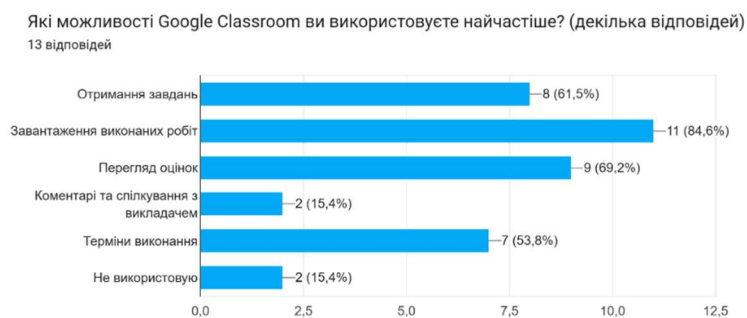


Рис. 1. Оцінка основних можливостей системи управління навчанням

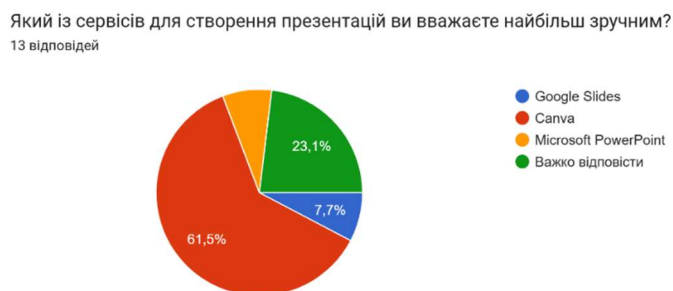


Рис. 2. Оцінка сервісів для візуалізації даних та створення навчального матеріалу

Як ви оцінюєте зручність сервісів для відеоконференцій під час навчання?
13 відповідей

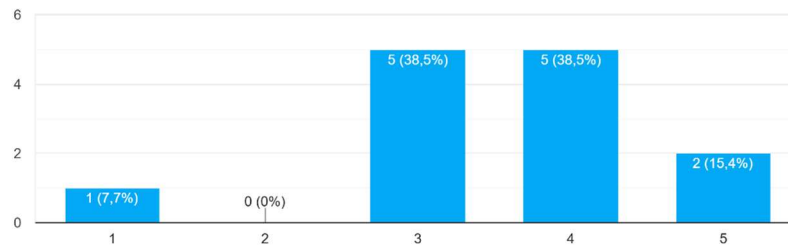


Рис. 3. Оцінка сервісів онлайн зустрічей

Які переваги цифрових інструментів у навчанні ви вважаєте найбільш важливими?
13 відповідей

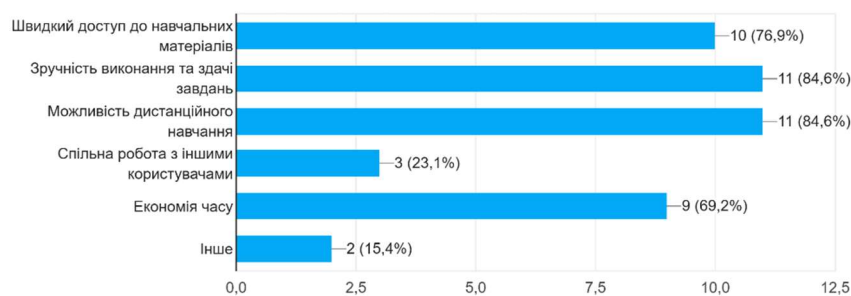


Рис. 4. Оцінка переваг цифрових інструментів

Які фактори найбільше впливають на ваш вибір цифрового інструменту для навчання?
13 відповідей

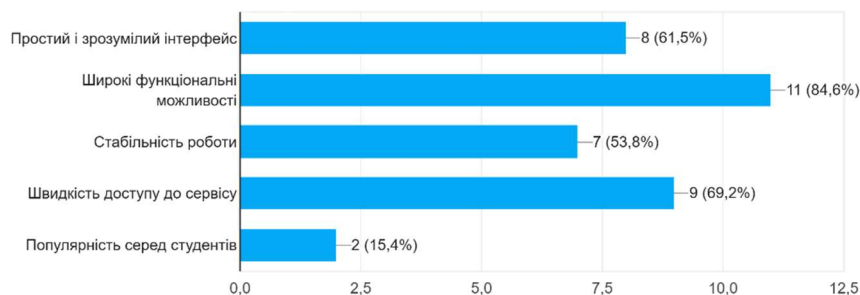


Рис. 5. Ключові фактори вибору цифрового інструменту

Блок №3: Оцінка сервісів онлайн-зустрічей

Сервіси відеоконференцій - це цифрові платформи для навчання та роботи в режимі реального часу через Інтернет. Вони дозволяють взаємодіяти за допомогою відео та звуку, забезпечуючи демонстрацію екрана [12].

Респондентам було запропоновано оцінити сервіси для проведення відеоконференцій, результати показують, що 53,9% вважають їх функціональними для використання під час навчання (рис. 3).

Блок №4: Загальна оцінка переваг цифрових інструментів

У цьому блоці респондентам запропоновано оцінити переваги цифрових інструментів у навчанні. Зручність виконання та

здачі завдань та можливість дистанційного навчання є найбільш важливими перевагами на думку респондентів (рис. 4). Зручність та дистанційний формат стали ключовими серед всіх, бо вони докорінно змінюють спосіб використання нашого часу.

Блок №5: Фактори вибору цифрових інструментів

В п'ятому блоці було запропоновано розглянути, які фактори впливають на вибір цифрових інструментів серед навчання (рис. 5). Серед найпопулярніших переваг було виокремлено широкі функціональні можливості (84,6%), швидкість доступу до сервісу (69,2%) та зрозумілий інтерфейс (61,5%), бо він допомагає навчатися інтуїтивно.

Блок №6: Аналіз проблем, які виникають під час використання цифрових інструментів

Респондентам було запропоновано оцінити, які проблеми виникають у них найчастіше під час роботи з цифровими інструментами (рис. 6). Основною проблемою стала недостатня функціональність (61,5%) та складний інтерфейс (53,8%).

Блок №7: Ключовий аналіз цифрових інструментів

Було проаналізовано основні сучасні інструменти (рис. 7). Першим основним вибором серед здобувачів освіти стали платформи для управління навчанням (69,2%), бо вони стали цифровими середовищами на заміну університетам/школам в яких є розклад, дедлайни, матеріали, оцінки та чат. Другим вибором студентів стали сервіси для відеоконференцій (69,2%), оскільки ці цифрові інструменти стали єдиним способом отримати живе спілкуваннями з викладами та засобом спілкування з учнями.

Результати опитування демонструють розподіл пріоритетів користувачів: спочатку вони обирають широкі функціональні можливості, швидкість доступу до сервісу, зручність виконання та здачі завдань та можливість дистанційного навчання, тоді як зрозумілий інтерфейс та швидкий доступ до навчальних матеріалів відходять на другий

план. Це свідчить про те, що в умовах великого цифрового навантаження студенти та школярі потребують інструментів, які мінімізують складність й навантаження, і дозволяють зосередитися безпосередньо на навчальному контенті, а не на опануванні нових додатків і технологій. Економія часу і стабільність роботи підтверджують, що вони також є критичними факторами для сучасного дистанційного навчання.

Водночас перевага платформ управління навчанням і сервісів відеозв'язку над інструментами для створення презентацій чи спільних таблиць вказує на те, що організація процесу є ключовими критеріями в питанні освіти. Респонденти опитування сприймають цифрові інструменти насамперед як засіб організації процесу та комунікації між викладачами та учнями, тоді як сервіси на зразок Canva чи Google Sheets розглядаються лише як допоміжні компоненти для створення презентацій (доповідей) або спільного перегляду необхідних таблиць. Це підкреслює те, що молодь обирає зручні зрозумілі та широко функціональні інструменти для сучасного навчання в період цифрової трансформації освіти, бо це повністю змінює філософію навчання нових поколінь. Наразі головне завдання - здобувати освіту легко за допомогою новітніх цифрових технологій.

Які труднощі найчастіше виникають під час використання цифрових інструментів?
13 відповідей

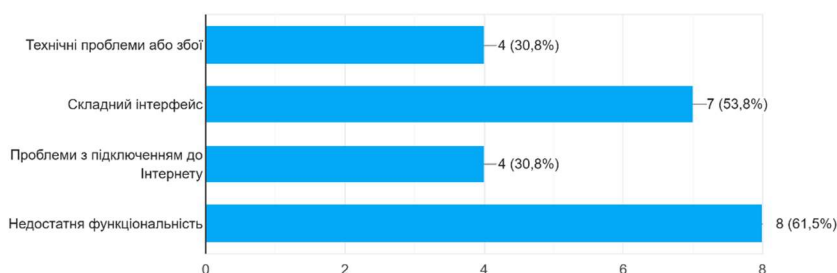


Рис. 6. Основні проблеми з якими стикаються респонденти

Які цифрові інструменти, на вашу думку, найбільше підвищують ефективність навчання?
13 відповідей

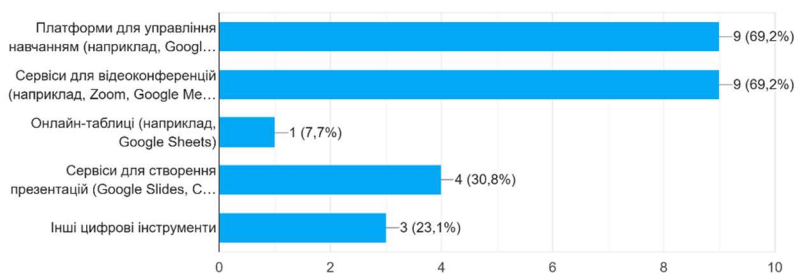


Рис. 7. Визначення основних цифрових інструментів у навчанні

Висновок. У результаті проведеного дослідження було проаналізовано та з'ясовано ефективність використання цифрових інструментів у процесі навчання студентів та школярів. Аналіз літератури свідчить про те, що цифрові технології відіграють важливу роль в освітньому процесі та є головною складовою сучасного навчання. З відповідей респондентів було оцінено онлайн-платформи, сервіси для відеоконференцій та популярні інструменти для створення навчальних матеріалів (звітів, доповідей, презентацій і т.д.), що підтверджує їх актуальність і практичну значущість у дистанційному навчанні.

Аналіз результатів опитування показав, що найбільш затребуваними насамперед є платформи організації та управління навчальним процесом, далі користувачі обирають сервіси для онлайн-зустрічей, які забезпечують зручний і швидкий доступ до навчальних матеріалів, можливість виконання завдань та взаємодії з викладачами. Інструменти для створення презентацій також часто використовуються, однак рівень їх застосування залежить від напрямку навчальних дисциплін.

Результати опитування студентів свідчать, що додатковими факторами вибору цифрових інструментів є стабільність роботи та зрозумілий інтерфейс. У сучасному освітньому середовищі користувачі переважані інформацією, тому вони віддають перевагу додаткам, які є інтуїтивно зрозумілими та не потребують часу на їх освоєння. Висока оцінка швидкості доступу, економія часу та можливість дистанційного навчання також підтверджують, що для здобувачів освіти безперервність освіти є важливою складовою під час роботи з цифровими інструментами.

Водночас у процесі дослідження було виявлено основні проблеми, які впливають на ефективність використання цифрових інструментів. Серед них було виділено технічні труднощі, недостатню функціональність інструментів, складний інтерфейс та проблеми з підключенням до інтернету. Це свідчить про необхідність вдосконалення як самих цифрових інструментів, так і методів їхнього використання в освітньому процесі, оскільки іноді лише на перший погляд додатки здаються складними та незрозумілими, достатньо потренуватися використовувати їх і все стане зрозумілим.

Отже, результати дослідження підтверджують, що цифрові інструменти значно підвищують ефективність навчання за умови

їхнього раціонального використання. Перспективами подальших досліджень є більш детальний аналіз впливу окремих цифрових сервісів на якість засвоєння знань, а також розробка рекомендацій щодо оптимізації їх використання у навчальному процесі.

Література

1. Генсерук Г. Р., Бойко М. М., Мартинюк С. В. Цифрові інструменти комунікації в освітньому процесі закладу вищої освіти. Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Педагогіка. 2022. № 1(1). С. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.25128/2415-3605.22.1.4>
2. Гурська О. А., Самборська О. В., Йордан Г. М. Використання цифрових технологій у педагогічному процесі для індивідуалізації навчання. Педагогічна Академія: наукові записки. 2025. № 14. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14587060>
3. Марчук Н. А. Цифрові інструменти в професійній освіті України: історія виникнення, особливості впровадження та перспективи. Професійно-прикладні дидактики. 2024. № 2. С. 48–53. DOI: <https://doi.org/10.37406/2521-6449/2024-2-8>
4. Гуревич Р., Кобися В., Кобися А., Кізім С., Куцак Л., Опушко Н. Використання цифрових сервісів та інструментів у професійній підготовці майбутніх учителів. Modern Information Technologies and Innovation Methodologies of Education in Professional Training Methodology Theory Experience Problems. 2022. № 64. С. 5–22. DOI: <https://doi.org/10.31652/2412-1142-2022-64-5-22>
5. Медведєва М. О., Тітова Л. О., Ковтанюк І. І. Цифрові інструменти у формуванні інформаційно-цифрової компетентності здобувачів освіти. Українські студії в європейському контексті: зб. наук. пр. 2024. № 9. С. 184–190. URL: http://obrii.org.ua/usec/storage/conference/zb_vol9_2024.pdf#page=185
6. Варяниця Л. О., Шевченко О. М., Петросова В. І. Цифрові інструменти Google для української освіти: використані можливості в умовах війни. Академічні візії. 2023. № 17. URL: <https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/229>
7. Яковлева І. Використання освітніх платформ в освітньому середовищі. Український педагогічний журнал. 2022. № 3. С. 137–148. DOI: <https://doi.org/10.32405/2411-1317-2022-3-137-148>
8. Ягоднікова В., Комар О. Інтерактивні освітні сервіси як чинник розвитку особистості здобувачів освіти у дистанційному навчанні.

- Психолого-педагогічні проблеми сучасної школи. 2025. № 2(14). С. 175–181. DOI: [https://doi.org/10.31499/2706-6258.2\(14\).2025.346927](https://doi.org/10.31499/2706-6258.2(14).2025.346927)
9. Тулашвілі Ю. Й., Кошелюк В. А. Технологічне забезпечення інклюзивності цифрового навчального контенту в LMS: адаптація курсів Moodle та Google Classroom до потреб студентів з особливими освітніми потребами. *International Science Journal of Education & Linguistics*. 2026. № 5(1). С. 29–42. DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjel.20260501.04>
 10. Москаленко О. М., Федяй І. О., Бакуменко Т. К., Косенюк Г. В. Використання Google інструментів для освітнього процесу: Google Classroom як інноваційне рішення для дистанційного навчання. *Академічні візії*. 2023. № 19. URL: <https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/343>
 11. Криворучко І. Можливості вебсервісу Canva для підтримки інклюзивного навчання. *International Science Journal of Education & Linguistics*. 2024. № 3(2). С. 107–113. DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjel.20240302.12>
 12. Осадчий М., Тітова Л. Цифрові сервіси для організації дистанційного навчання. *Інноваційні педагогічні технології в цифровій школі : матеріали VII Міжнар. наук.-практ. конф. молод. учених (м. Харків, 15–16 трав. 2025 р.) / Харків. нац. пед. ун-т ім. Г. С. Сковороди ; упоряд.: Н. Пономарьова, Н. Олефіренко, В. Андрієвська. Харків, 2025. С. 110–114. URL: <https://dspace.hnpu.edu.ua/items/ff4361c3-bc95-45e9-b030-fef6cdcc6044>*
 4. Hurevych R., Kobysia V., Kobysia A., Kizim S., Kutsak L., Opushko N. Vykorystannia tsyfrovyykh servisiv ta instrumentiv u profesiinii pidhotovtsi maibutnikh uchyteliv [Use of digital services and tools in the professional training of future teachers]. *Modern Information Technologies and Innovation Methodologies of Education in Professional Training Methodology Theory Experience Problems*. 2022. No 64. P. 5–22. DOI: 10.31652/2412-1142-2022-64-5-22
 5. Medvedieva M. O., Titova L. O., Kovtaniuk I. I. Tsyfrovi instrumenty u formuvanni informatsiino-tyfrovoi kompetentnosti zdobuvachiv osvity [Digital tools in the formation of information and digital competence of education seekers]. *Ukrainski studii v yevropeiskomu konteksti: zb. nauk. pr.* 2024. No 9. P. 184–190. URL: http://obrii.org.ua/usec/storage/conference/zb_vol9_2024.pdf#page=185
 6. Varyanytsia L. O., Shevchenko O. M., Petrosova V. I. Tsyfrovi instrumenty Google dlia ukrainskoi osvity: vykorystani mozhlyvosti v umovakh viiny [Google digital tools for Ukrainian education: used opportunities in war conditions]. *Akademichni vizii*. 2023. No 17. URL: <https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/229>
 7. Yakovlieva I. V. Vykorystannia osvitynikh platform v osvitnomu seredovyshchi [Use of educational platforms in the educational environment]. *Ukrainskyi pedahohichnyi zhurnal*. 2022. No 3. P. 137–148. DOI: 10.32405/2411-1317-2022-3-137-148
 8. Yahodnikova V. V., Komar O. A. Interaktyvni osvitni servisy yak chynnyk rozvytku osobystosti zdobuvachiv osvity u dystantsiinomu navchanni [Interactive educational services as a factor in the personality development of education seekers in distance learning]. *Psykhologo-pedahohichni problemy suchasnoi shkoly*. 2025. No 2(14). P. 175–181. DOI: 10.31499/2706-6258.2(14).2025.346927
 9. Tulashvili Yu. Y., Kosheliuk V. A. Tekhnologichne zabezpechennia inkliuzyvnosti tsyfrovoho navchalnoho kontentu v LMS: adaptatsiia kursiv Moodle ta Google Classroom do potreb studentiv z osoblyvymy osvitnimy potrebamy [Technological support for the inclusiveness of digital educational content in LMS: adaptation of Moodle and Google Classroom courses to the needs of students with special educational needs]. *International Science Journal of Education & Linguistics*. 2026. No 5(1). P. 29–42. DOI: 10.46299/j.isjel.20260501.04
 10. Moskalenko O. M., Fedai I. O., Bakumenko T. K., Koseniuk H. V. Vykorystannia Google instrumentiv dlia osvitnoho protsesu: Google Classroom yak innovatsiine rishennia dlia dystantsiinoho navchannia [Use of Google tools for the educational process: Google Classroom as an innovative solution for distance learning]. *Akademichni vizii*. 2023. No 19. URL:

References

1. Henseruk H. R., Boiko M. M., Martyniuk S. V. Tsyfrovi instrumenty komunikatsii v osvitnomu protsesi zakladu vyshchoi osvity [Digital communication tools in the educational process of a higher education institution]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Seriya: Pedahohika*. 2022. No 1(1). P. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.25128/2415-3605.22.1.4>
2. Hurska O. A., Samborska O. V., Yordan H. M. Vykorystannia tsyfrovyykh tekhnologii u pedahohichnomu protsesi dlia indyvidualizatsii navchannia [Use of digital technologies in the pedagogical process for individualization of learning]. *Pedahohichna Akademiia: naukovi zapysky*. 2025. No 14. DOI: 10.5281/zenodo.14587060
3. Marchuk N. A. Tsyfrovi instrumenty v profesiinii osviti Ukrainy: istoriia vynyknennia, osoblyvosti vprovadzhennia ta perspektyvy [Digital tools in professional education of Ukraine: history of origin, features of implementation and prospects]. *Profesiino-prykladni dydaktyky*. 2024. No 2. P. 48–53. DOI: 10.37406/2521-6449/2024-2-8

<https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/343>

11. Kryvoruchko I. Mozhyvosti vebservisu Canva dlia pidtrymky inkluzyvnoho navchannia [Possibilities of the Canva web service for supporting inclusive learning]. *International Science Journal of Education & Linguistics*. 2024. No 3(2). P. 107–113. DOI: 10.46299/j.isjel.20240302.12
12. Osadchyi M., Titova L. Tsyfrovi servisy dlia orhanizatsii dystantsiinoho navchannia [Digital services for organizing distance learning]. *Innovatsiini pedahohichni tekhnolohii v tsyfrovi shkoli: materialy VII Mizhnar. nauk.-prakt. konf. molod. uchenykh*. Kharkiv: KhNPU, 2025. P. 110–114. URL: <https://dspace.hnpu.edu.ua/items/ff4361c3-bc95-45e9-b030-fef6cdcc6044>

Dolia O.E., Dolia E.K. Analysis of the effectiveness of digital tools in the learning process

In today's conditions of rapid development of information technologies and active use of distance learning, the value of using digital tools in organizing the educational process is significantly increasing. The use of online platforms (services for organizing learning), video conferencing services, and tools for creating educational materials allows educators and students to increase the effectiveness of interaction between participants in the educational process, simplify the process of obtaining information (content of practical tasks and their deadlines, educational and supporting materials), and also ensure the flexibility of learning. Despite the widespread use of such technologies in modern education, the issue of assessing their convenience and effectiveness from the perspective of students remains important. The purpose of this study is to analyze the scientific literature and conduct a survey among students on the effectiveness of digital tools used in their learning process, as well as to identify key advantages and disadvantages based on the results of the survey of respondents. The paper considers the classification of digital tools according to their capabilities in education and analyzes their main capabilities. The empirical part of this study is based on the analysis of the results of a survey conducted among

distance learning students who use digital educational services every day. During the study, the main possibilities of using platforms for organizing the educational process, services for data visualization and creating educational material, online meeting services, advantages and factors for choosing digital tools were assessed. In parallel, the problems that arise when using digital tools among education seekers were analyzed. Special attention was paid to assessing the convenience of the interface, functionality and speed of access to the use of digital services. According to the results, the most popular tools used in the process of learning and creating presentations were identified, and the main factors that affect the effectiveness of their use were also identified. The key digital tools were platforms for learning management and services for conducting video conferences. The results obtained can be used to further improve the organization of the educational process and increase the effectiveness of the use of digital technologies in learning.

Keywords: digital tools, distance learning, educational technologies, online services, educational process, efficiency.

Доля Олена Євгеніївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, ORCID: 0000-0002-0364-988X olena.dolya@nure.ua

Доля Еліна Костянтинівна – здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності F5 “Кібербезпека та захист інформації”, навчально-науковий інститут комп’ютерних наук та штучного інтелекту, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Харків, Україна ORCID: 0009-0006-8286-5885

Дата першого надходження статті 10.02.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.03.2026.

Дата публікації 11.05.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-301-3-14-24>

УДК 004.45: 004.38

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕДУР КАСКАДНОГО КЕРУВАННЯ ЖИВЛЕННЯМ СЕРВЕРІВ VMWARE VSPHERE ЗАСОБАМИ МЕРЕЖЕВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Могильний Г.А., Семенов М.А., Донченко В.Ю.,
Швець І.М., Донченко С.М.

AUTOMATING CASCADING POWER MANAGEMENT PROCEDURES FOR VMWARE VSPHERE SERVERS USING NETWORK INFRASTRUCTURE

Mohylnyi H.A., Semenov M.A., Donchenko V.U.,
Shvets I.M., Donchenko S.M.

У статті досліджено актуальну проблему забезпечення стійкості інформаційних систем в умовах енергетичного кризису. Обґрунтовано необхідність захисту віртуалізованих середовищ VMware vSphere, де раптові вимкнення живлення без попереднього керованого завершення роботи призводять до незворотних пошкоджень файлових систем віртуальних дисків, порушення цілісності баз даних та метаданих на рівні сховищ.

Аналіз існуючих рішень показав, що існуючі системи безперебійного живлення (ДБЖ) з мережевими картами керування (NMC) мають високу вартість та обмежену програмну гнучкість, що робить їх використання економічно неефективним для сегментів малих та середніх кластерів.

Метою роботи є розробка гнучкої автоматизованої системи каскадного керування живленням на базі доступної мережевої інфраструктури, зокрема роутерів MikroTik, та побутових зарядних станцій великої потужності. У межах дослідження проведено класифікацію віртуальних ресурсів та запропоновано розподілити усі ресурси на декілька рівнів обслуговування, наприклад: мінімальний (vCenter, сервери AD, Web-сервер), базовий (файлові сервери, RDP) та повний (VMware Horizon, UAG). Автори навели опис основних етапів створення дотичної системи: розподіл віртуального середовища, дослідження використання електричної потужності, налаштування віртуального середовища, а також розробка процедур (скриптів) для керування запуском/завершенням роботи віртуального середовища VMware vSphere.

На основі експериментальних даних запропоновано часові затримки для каскадного запуску та завершення роботи, що забезпечує коректну

синхронізацію системних компонентів. Описано технічну реалізацію системи, яка включає налаштування BIOS серверів для автоматичного відновлення живлення та підтримки Wake-on-LAN. Запропоновано схему розподілу енергоспоживання через два блоки живлення, що дозволяє оптимізувати заряджання станцій без зупинки роботи серверів. Також розглянуто методи оптимізації середовища VMware Horizon через керування параметром ParentVMs для зменшення кількості активних службових віртуальних машин та особливості розробки процедур керування запуском/завершенням роботи на прикладі роутеру MikroTik

Практична значущість результатів, апробованих у лабораторії «Центр IT-рішень» ЛНУ імені Тараса Шевченка, полягає у створенні бюджетного та надійного інструменту захисту інфраструктури, що імітує функціонал корпоративних NMC-систем. Використання протоколу SSH із сертифікатами для автоматизації команд на хостах ESXi забезпечує високий рівень автономності та безпеки процесу керування без необхідності ручного втручання адміністратора.

Ключові слова: UPS, VMware by Broadcom, VMware vSphere, VMware Horizon, ESXi, SSH, віртуальні ресурси, роутер MikroTik.

Вступ. Сучасний етап розвитку інформаційних технологій в Україні та світі характеризується критичною залежністю бізнес-процесів, освітніх платформ та державних сервісів від безперебійної роботи окремих

серверів та центрів обробки даних. Проте, у сучасних реаліях повномасштабної збройної агресії російської федерації проти України, питання забезпечення стабільного функціонування інформаційно-комунікаційних систем трансформувалося з суто технічної площини у фундаментальний аспект національної та кібернетичної стійкості. Цілеспрямований енергетичний терор, що супроводжується масованими ракетними та дронними атаками на об'єкти критичної інфраструктури, створив безпрецедентні виклики для підтримки складних віртуалізованих середовищ, таких як VMware vSphere [1], які є основою для багатьох наукових, освітніх та державних сервісів. В умовах частих, непередбачуваних та екстрених відключень електроенергії традиційні методи керування електроживленням виявляються недостатніми.

Особлива небезпека полягає у специфіці архітектури платформи віртуалізації, де раптове зникнення живлення без попереднього «м'якого» завершення роботи неминуче призводить до критичних пошкоджень файлових систем віртуальних дисків, порушення цілісності баз даних та метаданих на рівні сховищ. Для навчальних лабораторій, де розгорнуто складні моделі, зберігаються данні студентів, викладачів та результати експериментів, такі інциденти означають не лише технічні помилки, а й безповоротну втрату напрацювань та дороговартісного обладнання, заміна якого в умовах війни є вкрай ускладненою через фінансові обмеження.

У цьому контексті автоматизація за допомогою спеціалізованих процедур керування живленням стає критичним запобіжником, що дозволяє реалізувати гнучкий алгоритм виходу системи з ладу з мінімальними втратами. Традиційні системи джерел безперебійного живлення (ДБЖ) [2, 3] мають обмеження у програмному забезпеченні, ресурсі акумуляторів, а також мають велику вартість. У ситуації, коли період відключення перевищує час автономності ДБЖ, постає критична потреба не просто у вимкненні обладнання, а у керованому завершенні роботи та поетапному старті, які гарантують цілісність даних.

Такий підхід до забезпечення життєздатності інформаційних систем безпосередньо впливає на стабільність цифрового простору України та є життєво необхідною адаптацією вітчизняної ІТ-галузі до умов постійного деструктивного зовнішнього

впливу, що дозволяє надійно зберігати різноманітні данні та забезпечувати безперервність освітнього процесу навіть у найскладніші періоди енергетичного дефіциту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Попередні дослідження авторів вже успішно вирішували завдання організації систем з віддаленим доступом до інформаційних ресурсів та навчальних комп'ютерних лабораторій [4], а також розгортання надійного корпоративного середовища [5]. Проте досвід експлуатації таких систем в умовах воєнного стану та енергетичного терору виявив нову критичну проблему – вразливість побудованої інфраструктури до раптових багаторазових знеструмлень, що вимагає переходу від класичних методів адміністрування до автоматизованого каскадного керування на рівні гіпервізорів.

Загалом, сучасні дослідження у сфері забезпечення безперервності функціонування інформаційних систем зосереджені на поєднанні технологій віртуалізації, енергетичної ефективності та відмовостійкості. Базові принципи управління обчислювальними ресурсами у середовищах VMware vSphere висвітлені у фундаментальних працях. Зокрема, у дослідженні А. Gulati та співавторів [6] описано механізми Distributed Resource Scheduler та Distributed Power Management, які дозволяють автоматично балансувати навантаження та оптимізувати енергоспоживання кластерів. Проблематика переведення серверів у режими зниженого енергоспоживання також досліджувалася С. Isci та ін. [7], де запропоновано підходи до динамічного керування станами живлення серверів.

Значна кількість робіт присвячена енергетично ефективному управлінню ресурсами дата-центрів. Зокрема, у дослідженнях Q. Zhang та A. Beloglazov [8, 9] розглядаються алгоритми оптимізації розміщення віртуальних машин, їх міграції та консолідації з метою зниження енергоспоживання. Однак такі підходи орієнтовані переважно на планову оптимізацію роботи систем у штатних умовах і не враховують сценаріїв аварійного вимкнення живлення та необхідності коректного завершення роботи віртуальних середовищ.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із використанням програмно-визначених сховищ, таких як VMware vSAN [10], а також

інфраструктурі віртуальних робочих столів на базі VMware Horizon [11]. У роботі [12] запропоновано використання VMware vCenter в якості віртуального освітнього середовища, де здобувачі освіти мають можливість самостійно запускати та зупиняти окремі віртуальні машини. Однак, у такому випадку раптове відключення живлення може привести до повного пошкодження файлових систем віртуальних машин. Аналогічна ситуація складається у інформаційних систем на базі VMware vSphere з використанням VMware Horizon, у яких королювати кількість активних віртуальних ресурсів вкрай складно. У цих системах особливо критичним є забезпечення узгодженості даних, оскільки раптове відключення електроживлення без коректного завершення транзакцій може призвести до пошкодження файлових систем та втрати даних. Водночас існуючі рішення не забезпечують достатньої адаптивності до багаторазових циклів зникнення та відновлення електроживлення.

Важливу роль у забезпеченні відмовостійкості відіграють джерел безперебійного живлення (ДБЖ), які підтримують різні режими роботи: offline, line-interactive та online [2, 3]. У практичних реалізаціях для середовищ VMware використовуються Smart-UPS або Online-UPS із вбудованими мережевими платами управління (NMC), що підтримують протоколи моніторингу та взаємодії з інфраструктурою. Такі системи дозволяють ініціювати завершення роботи серверів через централізовані механізми, однак їх функціональність зазвичай обмежується подачею сигналу на вимкнення без урахування складних логічних залежностей між сервісами.

З іншого боку, автоматичне включення серверів після відновлення електроживлення реалізується через апаратні механізми (зокрема налаштування BIOS "Restore on AC Power Loss"), проте цей підхід є негнучким, оскільки не враховує стан мережі, готовність сервісів та необхідну послідовність запуску компонентів системи.

Стандартизаційні підходи, зокрема ISO/IEC 27001 [13] та IEEE 446 [14], визначають загальні вимоги до забезпечення безперервності бізнес-процесів та надійності енергоживлення, однак не регламентують конкретні механізми

каскадного керування віртуалізованими середовищами.

У контексті мережевої автоматизації важливе значення мають можливості різноманітних роутерів. Поверхневий огляд та порівняння їх можливостей наведено у [15]. Однак особливо виділяються роутери з вбудованими операційними системами, зокрема MikroTik RouterOS [16], які підтримують інструменти моніторингу доступності вузлів (Netwatch) та виконання сценаріїв автоматичного реагування. Для віддаленого управління серверною інфраструктурою використовується протокол SSH [17], що забезпечує захищене виконання команд і сценаріїв адміністрування. Проте в існуючих дослідженнях такі інструменти розглядаються переважно як допоміжні засоби і не інтегруються у єдину систему автоматизованого керування електроживленням.

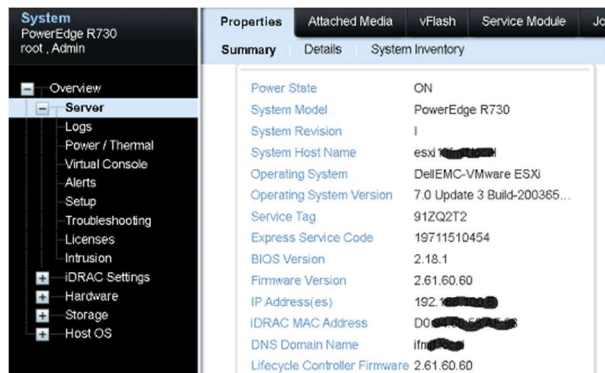
Таким чином, проведений аналіз показує, що існуючі наукові та практичні підходи охоплюють окремі аспекти проблеми: віртуалізацію ресурсів, енергетичну ефективність, використання ДБЖ та мережових протоколів управління. Проте відсутні комплексні рішення, які б поєднували ці компоненти для реалізації поетапної (каскадної) черговості процесів вимкнення та запуску серверів у віртуалізованому середовищі без використання дорогих промислових ДБЖ. Це обумовлює актуальність розробки гнучких підходів до керування електроживленням із використанням засобів мережевої інфраструктури, що і визначає напрям даного дослідження.

Мета статті. На засадах комплексного аналізу розробити гнучку автоматизовану систему керування живленням серверів VMware vSphere з використанням мережових роутерів.

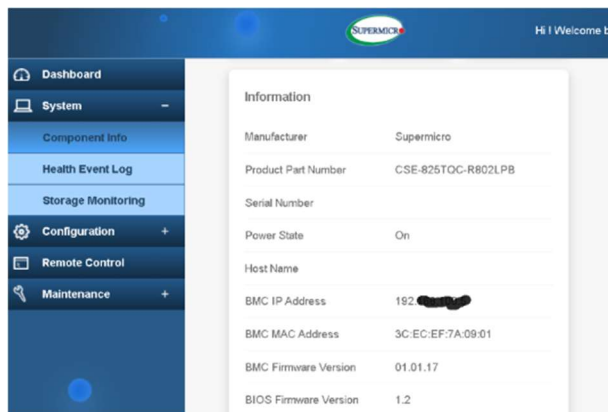
Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження, налаштування та впровадження виконувались у лабораторії «Центр IT-рішень» (<https://mitc.luguniv.edu.ua/>) навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій (<https://imit.luguniv.edu.ua/>) ДЗ «Луганський національний університет імені Тараса Шевченка» (<https://luguniv.edu.ua/>).

До складу інформаційної системи входить декілька комп'ютерних класів, різноманітне мережеве обладнання та два сервери: сервер

DELL та сервер SUPERMICRO. Загальну характеристику серверів наведено на рисунку 1.



а



б

Рис. 1. Загальна характеристика серверів:
а – сервер DELL; б – сервер SUPERMICRO

До складу мережевої інфраструктури (рис.2), яка входить до предмету дослідження, належать: пороговий роутер MikroTik RB750Gr3 з RouterOS 6.49 [16] (рис.3), який під'єднаний до мережі Інтернет та двох окремих мереж: гостьової та основної, в кожній з яких є проміжні комутатори. Два сервери (DELL та SUPERMICRO) приєднані до обох мереж, та з'єднані між собою адаптерами (10 Гбіт) для швидкого трафіку vSAN та vMotion.

Таким чином, структура VMware vSphere (рис. 4) складається з одного датацентру, одного кластеру, до яких входять два хости, додатково працює vSAN [10] та VMware Horizon [11].

В цілому, у віртуальному середовищі працює (рис.5):

- vCenter з OC Photon OS для керування процесами віртуалізації;
- два сервери (по одному на кожному хості) з OC Windows Server 2016 з підтримкою служб MS AD та сервер

політики мережі для інтеграції з клієнтами Radius, підтримка VPN-з'єднань;

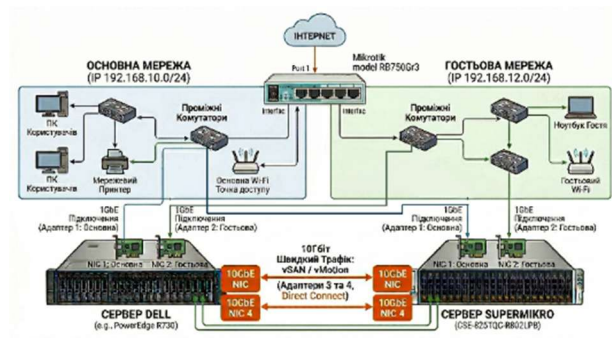


Рис. 2. Структура мережі

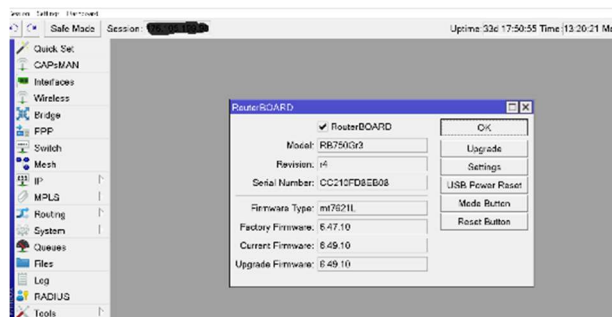


Рис. 3. Характеристика MikroTik

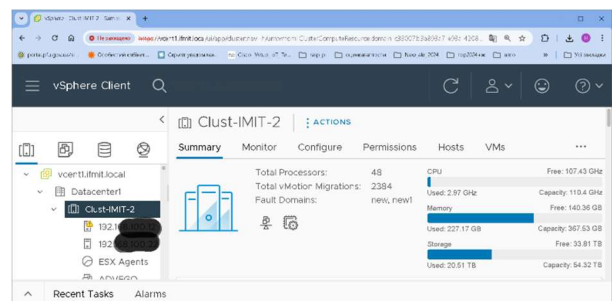


Рис. 4. Структура VMware

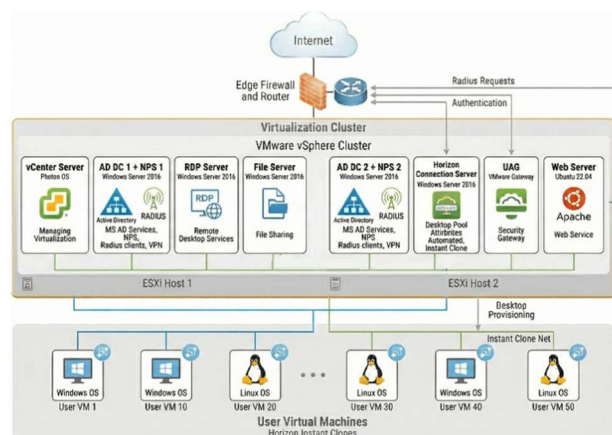


Рис. 5. Віртуальне середовище

- Web-сервер (Apache) з ОС Ubuntu 22.04;
- файловий сервер з ОС Windows Server 2016;
- сервер з ОС Windows Server 2016 з підтримкою служби віддалених робочих столів (RDP);
- сервер з ОС Windows Server 2016 та додатковим програмним забезпеченням VMware Horizon Connection Server;
- сервер з ОС Photon OS з програмним забезпеченням VMware Unified Access Gateway (UAG)
- інші віртуальні машини (ОЗУ 4-16 ГБ, віртуальні накопичувачі 48-128 ГБ) користувачів (в середньому від 10 до 50), створені на засадах використання VMware Horizon за допомогою Desktop Pool Attributes Automated, Instant Clone.

За таких умов назви віртуальних машин та їх загальна кількість, що одночасно працюють у віртуальному середовищі, невідомі та постійно змінюється залежно від кількості та потреб активних користувачів. Встановлено, що загальний час старту та синхронізації всього віртуального середовища на цьому апаратному забезпеченні становить 30-40 хвилин. За цей час, в умовах постійних перебоїв з електроживленням, напруга може зникати та з'являтися декілька разів. Крім того, складно спланувати частину (відсоток) використання ємності заряду ДБЖ та налаштувати час підтримки електроживлення.

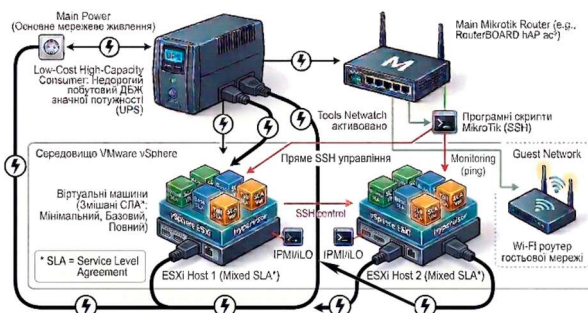


Рис. 6. Структура керування електроживленням

У результаті комплексного аналізу запропоновано створити автоматизовану систему керування електроживленням (рис. 6) шляхом використання мережевих роутерів, наприклад MikroTik з підтримкою Netwatch, та недорогих побутових приладів резервного живлення значної потужності, яка буде

поетапно вмикати/вимикати віртуальні ресурси. Така система дозволить імітувати потужну UPS з підтримкою NMC, але буде значно дешевшою та володіти більш потужним програмним забезпеченням, яке дозволить створити кероване каскадне увімкнення/вимкнення серверів.

У процесі комплексного аналізу запропоновано, що основні етапи та завдання створення системи керування живленням можна звести до таких кроків:

1. Провести розподіл віртуального середовища на рівні обслуговування, наприклад, мінімальний, базовий та повний рівень.

2. Дослідити споживання електричної потужності, час її відновлення та періоди затримки між стартами компонентів віртуального середовища.

3. Налаштувати віртуальне середовище та окремі ресурси на зменшення кількості активних віртуальних машин та створити можливість керування хостами за допомогою протоколу SSH.

4. Розробити процедури (скрипти) для роутера (MikroTik), які дозволять керувати поетапним (каскадним) стартом та завершенням роботи активних віртуальних машин.

Розглянемо основні складові цих етапів.

У першу чергу потрібно виділити рівні обслуговування, складові підтримки працездатності інформаційної системи. В кожному окремому випадку, залежно від особливостей спрямованості інформаційної системи, можна виділити декілька груп сервісів. В інформаційній системі, що розглядається, було виділено три рівні:

- Мінімальний – сервер vCenter, сервери з підтримкою MS AD та Web-сервер.
- Базовий – охоплює мінімальний та додатково файловий сервер та сервер RDP.
- Повний – включає базовий та додатково сервер VMware Horizon Connection Server та сервер VMware Unified Access Gateway.

Таким чином, при старті (завантаженні), в першу чергу стартує vCenter, сервери з підтримкою Ms AD та Web-сервер, потім файловий сервер та сервер RDP, а на останньому етапі VMware Horizon Connection Server та VMware Unified Access Gateway.

При завершенні (у разі припинення електроживлення) робимо у зворотному порядку, але додаємо етап завершення всіх

активних віртуальних машин, які були завантажені користувачами за допомогою VMware Horizon.

Для впорядкування цього етапу було запропоновано переналаштувати автозавантаження віртуальних машин у середовищі vCenter (для об'єктів хост: меню: Configure -> Virtual Machines -> VM Startup/Shutdown->Edit) та залишити автозавантаження/завершення тільки машин, що входять до мінімального рівня обслуговування (рис. 7).

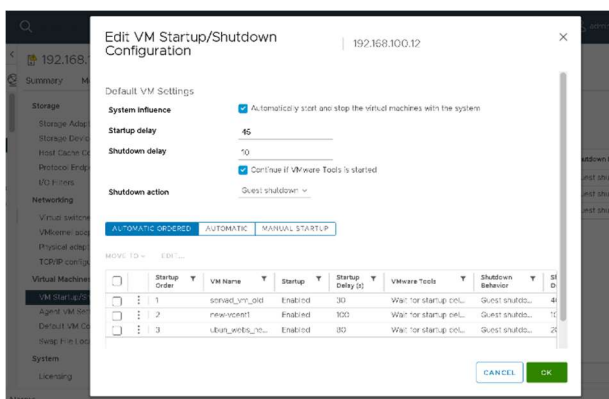


Рис. 7. Зміна налаштувань автозавантаження ВМ

Наступним кроком буде дослідження електричної потужності та певних часових затримок при старті/завершенні всіх серверів. Безумовно, цей аналіз необхідно виконувати з урахуванням особливостей певної ДБЖ та переліку інформаційних ресурсів та серверів. Для дослідження, було задіяно побутову зарядну станцію Bluetti потужністю 2000 W.

Експериментально встановлено певні особливості використання цієї зарядної станції. Потужність зарядки складає приблизно 500 W, але споживана потужність двох серверів становить 400-800 W залежно від навантаження. Таким чином, у випадку повного підключення серверів до цієї зарядної станції, ємність батареї не відновлюється та вона поступово розряджається. Вирішення цього питання було знайдено за рахунок того, що у кожному сервері по два блоки живлення. Один блок живлення кожного серверу було підключено до зарядної станції, а другий безпосередньо, напряду у розетку 220 V. За рахунок такого підключення споживана потужність на зарядній станції під час присутності електроживлення складає приблизно 270-400 W, а час повного відновлення – 4 години. У випадку відсутності електроживлення вся споживча потужність серверів йде через зарядну станцію, та період

розрядки внутрішньої батареї складає 35 %/год. Ці характеристики дозволяють спланувати час підтримки роботи серверів у випадку відсутності електроживлення.

Для планування часових затримок поетапного (каскадного) старту/завершення роботи серверів необхідно провести експериментальний аналіз часу завантаження віртуальних машин для кожного рівня обслуговування. Безумовно, у кожній інформаційній системі цей час буде різнитися залежно від кількості рівнів обслуговування, особливостей серверів (хостів) та віртуальних машин. В інформаційній системі, яка досліджується, встановлено, що мінімальний рівень завантажується за 6-8 хвилин, базовий – 3-5 хвилин, а повний – 5 хвилин. Потім процес синхронізації всіх ресурсів протягом 5-10 хвилин.

При зворотному процесі – завершенні роботи встановлено, що віртуальні ресурси повного рівня обслуговування завершуються протягом 1 хвилини, базового рівня – 1,5-2 хвилин, а мінімального – 1,5 хвилини. Однак слід врахувати додаткові етапи завершення. Це завершення активних віртуальних машин, які завантажені у середовищі VMware Horizon Connection Server – приблизно 1,5-2 хвилини, та зупинка хостів ESXi – приблизно 4 хвилини.

Ці затримки слід враховувати при програмуванні завершення/старту віртуального середовища на роутері MikroTik (команда :delay XXs).

Наступним кроком рекомендується переглянути кількість віртуальних машин (за можливістю) зменшити період обслуговування, наприклад, певні сервіси перевести на обслуговування з 24/7 на 12/7.

В інформаційній системі, що досліджувалась, було прийнято рішення уповільнити роботу сервісів Desktop Pool Automated, Instant Clone у VMware Horizon. Встановлено, що VMware Horizon використовує службові віртуальні машини у спеціальних теках (папках з назвою ClonePrep...) середовища vCenter (рис. 8), які мають спеціальний атрибут та не можуть бути завершені автоматично. Для цього у консолі керування VMware Horizon було відключено параметр ParentVMs у меню Setting->Server->vCenter Servers (рис. 9). Відключення цього параметра призвело до вивантаження службових віртуальних машин, але уповільнило розгортання клонів машин для користувачів.

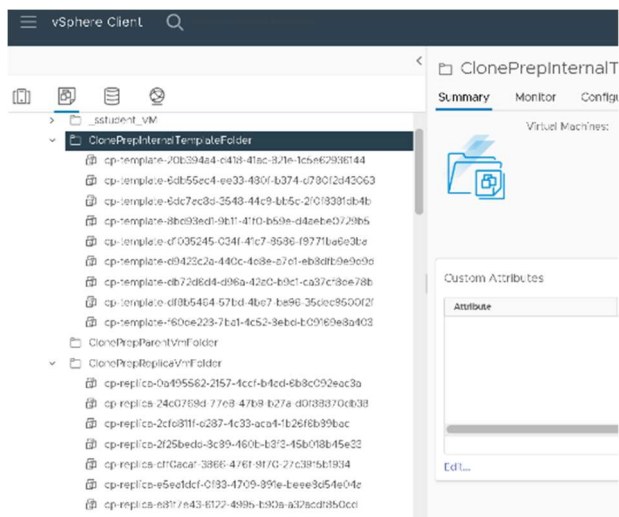


Рис. 8. Службові теки VMware Horizon у vCenter

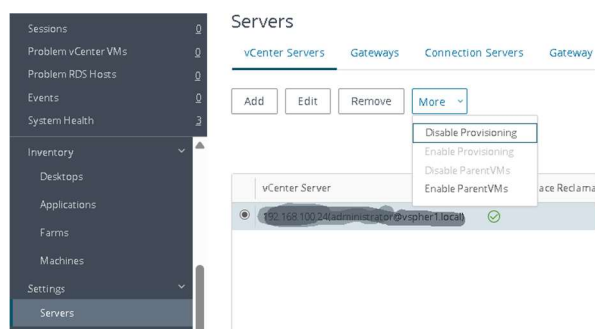


Рис. 9. Відключення параметра ParentVMs у VMware Horizon

Для автоматизації старту хостів ESXi та автоматичного відновлення живлення було проведено переналаштування BIOS. У BIOS було встановлено автоматичне відновлення живлення та підтримку пакетів WOL з метою подачі команди від роутера MikroTik. Слід відзначити, що у багатьох серверів, залежно від виробника та моделі сервера ці налаштування розташовані у різних меню BIOS.

Для створення умов керування хостами ESXi за допомогою MikroTik необхідно дозволити підтримку SSH. Існує декілька варіантів, але один зі шляхів – через консоль хоста в меню Troubleshoot Option->Enable SSH. На рис. 10 показано стан меню у випадку, коли SSH вже активовано.

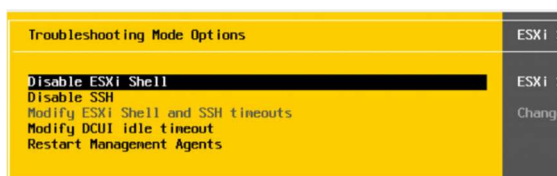


Рис. 10. Включення SSH на хосту ESX

Встановлено, що при віддаленому підключенні з роутера MikroTik з RouterOS 6.49 неможливо автоматично (у скрипті) підключитися до віддаленого хосту (ESXi) за допомогою пароля. Для автоматичного, програмованого підключення треба використовувати тільки сертифікати. Таким чином, потрібно додатково налаштувати службу SSH на кожному хосту у файлі `/etc/ssh/sshd_config`:

- дозволити підключатися користувачу root – параметр `PermitRootLogin yes`
- заборонити підключатися з використанням паролів – встановити параметр `PasswordAuthentication no`
- встановити відповідний сертифікат для користувача root на кожен хост ESXi у каталозі `/etc/ssh/keys-root/`, де створити, або відредагувати файл `authorized_keys`, у якому кожен окремий рядок.

Слід відзначити, що сертифікати ESXi та MikroTik з ОС RouterOS 6.49 не сумісні між собою. ESXi використовує більш сучасні сертифікати типу OpenSSH (RFC 4716), а MikroTik з ОС RouterOS 6.49 – сертифікати RSA PEM. Одним зі шляхів вирішення цього питання є відключення (у файлі `/etc/ssh/sshd_config`) параметра `FipsMode no`. Однак це збільшує ризики безпеки. В цілому питання сумісності сертифікатів вирішено у RouterOS v7.12. Однак за певних обставин існує можливість згенерувати сумісний сертифікат і для RouterOS v6.49. У межах цієї статті розглянемо тільки основні етапи:

- Згенерувати сертифікат у будь-якій ОС.
- Встановити на MikroTik підтримку сучасних алгоритмів шифрування за допомогою команди у терміналі: `/ip ssh set strong-crypto=yes host-key-size=2048`.
- Імпортувати сертифікати користувачу (admin) MikroTik, від імені якого будуть запускатися скрипти за допомогою команди: `/user ssh-keys private import private-key-file=file public-key-file=file.pub`.

Останнім кроком у створенні системи керування живленням є розробка процедур (скриптів) для роутера (MikroTik), які дозволяють керувати поетапним (каскадним) запуском та завершенням активних віртуальних машин. У межах цієї статті розглянемо лише основні

складові цього процесу. Слід відзначити, що створення складних скриптів у MikroTik RouterOS v6.49 – це окреме завдання. Тому зупинимось лише на деяких особливостях цього процесу.

1. Для визначення подій увімкнення/вимкнення живлення достатньо скористатися утилітою Netwatch та налаштувати її на відстеження одного з пристроїв гостьової мережі (неважливий прилад), що не підтримується резервним живлення. Для цього скористаємось командою `/tool netwatch add host=<IP_addr_guest_net> timeout=<sec> interval=<sec>`, або меню `tools->Netwatch`. У результаті такого налаштування роутер буде визначати події включення живлення (скрипт Up) та зникнення живлення (скрипт Down).

2. Netwatch скрипти мають обмеження у розмірі та розглядаються як один рядок. Тому створюйте окремі скрипти (підскрипти) та обов'язково завершуйте команду символом «;» Для запуску скрипта (підскрипта) у фоновому режимі скористайтесь командою – `:execute <name_script>;`

3. При створенні додаткових скриптів (підскриптів) врахуйте певні привілеї (Policy) скриптів. Їх повинно бути чотири: `read`, `reboot`, `write`, `test`. Будь-які інші комбінації Policy недопустимі.

4. У скриптах, для підключення до хостів ESXi та виконання певної команди на хості використовуйте команду скрипта `/system ssh-execute user=<user_ESXi> address=<IP_addr_ESXi> command="Command_ESX"`;

5. У скриптах для запуску ESXi (перший рівень обслуговування) скористайтесь командою `/tool wol mac=<MAC_ADDR_ESXi> interface=<Name_interf_connect_ESXi>;`

6. Скрипти не мають параметрів. Для передавання параметрів скористайтесь Address Lists. Таким чином, для передавання параметрів додайте інформацію у Address Lists з певним ім'ям, у скрипті зчитайте інформацію з Address Lists та за необхідністю видаляйте Address Lists. Наприклад, для роботи з Address Lists з ім'ям `powerDOWN`:

- отримання IP адреси `/ip firewall address-list get [find list="powerDOWN"] address;`
- знищення – `/ip firewall address-list remove [find where list="powerDOWN"];`
- додавання `/ip firewall address-list add list="powerDOWN" address=127.0.0.1;`

Існує ще велика кількість особливостей створення скриптів у MikroTik для автоматичного програмування процесів каскадного запуску/завершення роботи серверів ESXi, які будуть викладені у межах іншої статті.

Загалом було створено 6 скриптів для старту та 8 для завершення.

Висновки. У результаті проведеного дослідження вирішено актуальне науково-практичне завдання щодо забезпечення відмовостійкості та безперервності роботи віртуалізованих центрів обробки даних (на базі VMware vSphere) в умовах критичної енергетичної нестабільності. На основі комплексного аналізу недоліків традиційних промислових ДБЖ розроблено та впроваджено гнучку автоматизовану систему каскадного керування живленням серверів VMware vSphere, що базується на використанні існуючої мережевої інфраструктури та побутових зарядних станцій.

Впровадження цієї системи забезпечує високий рівень кібернетичної стійкості інформаційних систем в умовах нестабільного енергопостачання, мінімізуючи ризики пошкодження файлових систем віртуальних дисків та втрати критичних даних через раптові відключення. Запропонована методика логічного сегментування віртуального середовища на рівні обслуговування, наприклад – мінімальний, базовий та повний, що дозволило оптимізувати черговість запуску та зупинки сервісів з урахуванням їхньої логічної взаємозалежності.

На основі експериментальних даних визначено часові затримки для каскадного запуску та поетапного завершення роботи, що гарантує синхронізацію всіх компонентів інформаційної системи. Технічна реалізація системи за допомогою роутерів MikroTik, протоколу SSH із сертифікатами та службою Netwatch дозволила автоматизувати процеси керування без потреби у дорогих дороговартісних промислових ДБЖ з картаю мережевого керування (NMC). Вагомим результатом роботи є розробка та впровадження етапів створення автоматизованого каскадного керування електроживленням віртуалізованих середовищ, що інтегрує алгоритми пріоритетизації ресурсів та спеціальні сценарії завершення й відновлення роботи системних сервісів на базі мережевої інфраструктури – програмованих роутерів MikroTik та побутових систем електроживлення. Це дозволяє імітувати функціонал складних корпоративних систем

моніторингу за допомогою програмно-визначених сценаріїв, забезпечуючи гнучкість налаштувань під потреби малих та середніх кластерів.

Практична значущість дослідження полягає у створенні бюджетного та надійного інструменту захисту інфраструктури, який успішно апробовано в лабораторії «Центр IT-рішень» ЛНУ імені Тараса Шевченка. Отримані результати дозволяють підтримувати безперервність освітнього процесу та наукових експериментів навіть у періоди тривалих енергетичних дефіцитів, спричинених зовнішніми деструктивними впливами.

Подальші дослідження у цьому напрямі можуть бути спрямовані на розширення можливостей системи моніторингу електроживлення, впровадження більш гнучких інтелектуальних алгоритмів спрямованих на прогнозування тривалості підтримки роботи серверів від батареї ДБЖ та інтеграцію гібридних хмарних рішень у загальний алгоритм каскадного керування.

Література

1. VMware vSphere 7.0 [Електронний ресурс] URL: <https://techdocs.broadcom.com/us/en/vmware-cis/vsphere/vsphere/7-0.html> (дата звернення: 08.01.2026).
2. Системи UPS пояснення: типи, особливості та переваги [Електронний ресурс] URL: <https://www.wthdne.com/uk/blog/ups-systems-explained-types-features-and-benefits> (дата звернення: 08.04.2026).
3. Типи системи безперебійного живлення [Електронний ресурс] URL: <https://www.svcpower.com/uk/types-of-uninterruptible-power-system.html> (дата звернення: 08.04.2026).
4. Могильний Г., Семенов М., Кіреєв І. Впровадження системи віддаленого доступу до інформаційних ресурсів комп'ютерних лабораторій. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2022. № 2 (272). С. 7–14. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-7-14>.
5. Могильний Г., Донченко В., Донченко С. Огляд та аналіз інструментів створення корпоративного середовища. *Інформаційні технології та суспільство*. 2024. № 4 (15). С. 99–107. URL: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.4.16>.
6. VMware distributed resource management: Design, implementation, and lessons learned. VMware / A. Gulati et al. *Technical Journal*. 2012. Vol. 1, No. 1. P. 45–64. URL: <https://www.waldspurger.org/carl/papers/drs-vmtj-mar12.pdf> (дата звернення: 08.01.2026).
7. Agile, efficient virtualization power management with low-latency server power states. / C. Isci et al. *ACM SIGARCH Computer Architecture News*. 2013. Vol. 41, no. 3. P. 96–107. URL: <https://doi.org/10.1145/2485922.2485931>.
8. Beloglazov A., Buyya R. Energy efficient resource management in virtualized cloud data centers. *IEEE Transactions on Cloud Computing*. 2013. Vol. 1, No. 1. P. 14–28. URL: <https://doi.org/10.1109/CCGRID.2010.46>.
9. Zhang Q., Cheng L., Boutaba R. Cloud computing: state-of-the-art and research challenges. *Journal of Internet Services and Applications*. 2010. Vol. 1, No. 1. P. 7–18. URL: <https://doi.org/10.1007/s13174-010-0007-6>.
10. VMware vSAN 7.0 [Електронний ресурс] URL: <https://techdocs.broadcom.com/us/en/vmware-cis/vsan/vsan/7-0.html> (дата звернення: 08.04.2026).
11. Horizon Overview and Deployment Planning [Електронний ресурс] URL: <https://docs.omnissa.com/bundle/HorizonOverviewDeployment/page/HorizonOverviewandDeploymentPlanning.html> (дата звернення: 08.01.2026).
12. Могильний Г., Переяславська С., Донченко В., Швець І., Донченко С., Самотіс С. Створення віртуального навчального середовища на засадах VMware Vcenter. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2026. № 1(299). С. 5–15. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-299-1-5-15>.
13. ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection — Information security management systems — Requirements. Geneva : ISO, 2022. 26 p.
14. IEEE 446-1995. IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications (IEEE Orange Book). New York : IEEE, 1996. 320 p.
15. Могильний Г. Аналіз програмно-апаратних засобів створення системи з віддаленим доступом до навчальних комп'ютерних лабораторій закладів середньої освіти. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2023. № 1(277). С. 5–19. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2019-256-8-5-19>.
16. RouterOS Documentation [Електронний ресурс] URL: <https://help.mikrotik.com/docs/spaces/ROS/pages/328059/RouterOS> (дата звернення: 08.01.2026).
17. Using ESXi Shell in vSphere [Електронний ресурс] URL: <https://techdocs.broadcom.com/us/en/vmware-cis/vsphere/vsphere/8-0/vsphere-security-8-0/securing-esxi-hosts/using-esxi-shell-in-vsphere.html> (дата звернення: 08.01.2026).

References

1. VMware vSphere 7.0 [Elektronnyi resurs] URL: <https://techdocs.broadcom.com/us/en/vmware-cis/vsphere/vsphere/7-0.html> (accessed: 08.01.2026).
2. Systemy UPS poiasnennia: typy, osoblyvosti ta perevahy [Elektronnyi resurs] URL: <https://www.wthdne.com/uk/blog/ups-systems-explained-types-features-and-benefits> (accessed: 08.04.2026).
3. Typy systemy bezperebiinoho zhyvlennia [Elektronnyi resurs] URL: <https://www.svcpower.com/uk/types-of-uninterruptible-power-system.html> (accessed: 08.04.2026).
4. Mohylnyi H., Semenov M., Kirieiev I. Vprovadzhennia systemy viddalenooho dostupu do informatsiinykh resursiv kompiuternykh laboratorii. Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia. 2022. № 2 (272). S. 7–14. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-7-14>.
5. Mohylnyi H., Donchenko V., Donchenko S. Ohliad ta analiz instrumentiv stvorennia korporatyvnoho seredovyscha. Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo. 2024. № 4 (15). S. 99–107. URL: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.4.16>.
6. VMware distributed resource management: Design, implementation, and lessons learned. VMware / A. Gulati et al. Technical Journal. 2012. Vol. 1, No. 1. P. 45–64. URL: <https://www.waldspurger.org/car/papers/drs-vmtj-mar12.pdf> (accessed: 08.01.2026).
7. Agile, efficient virtualization power management with low-latency server power states. / C. Isci et al. ACM SIGARCH Computer Architecture News. 2013. Vol. 41, no. 3. P. 96–107. URL: <https://doi.org/10.1145/2485922.2485931>.
8. Beloglazov A., Buyya R. Energy efficient resource management in virtualized cloud data centers. IEEE Transactions on Cloud Computing. 2013. Vol. 1, No. 1. P. 14–28. URL: <https://doi.org/10.1109/CCGRID.2010.46>.
9. Zhang Q., Cheng L., Boutaba R. Cloud computing: state-of-the-art and research challenges. Journal of Internet Services and Applications. 2010. Vol. 1, No. 1. P. 7–18. URL: <https://doi.org/10.1007/s13174-010-0007-6>.
10. VMware vSAN 7.0 [Elektronnyi resurs] URL: <https://techdocs.broadcom.com/us/en/vmware-cis/vsan/vsan/7-0.html> (accessed: 08.04.2026).
11. Horizon Overview and Deployment Planning [Elektronnyi resurs] URL: <https://docs.omnissa.com/bundle/HorizonOverviewandDeployment/page/HorizonOverviewandDeploymentPlanning.html> (accessed: 08.01.2026).
12. Mohylnyi H., Pereiaslavskaya S., Donchenko V., Shvets I., Donchenko S., Samotis S. Stvorennia virtualnoho navchalnoho seredovyscha na zasakh VMware Vcenter. Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia. 2026. № 1(299). S. 5–15. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-299-1-5-15>.
13. ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection — Information security management systems — Requirements. Geneva : ISO, 2022. 26 p.
14. IEEE 446-1995. IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications (IEEE Orange Book). New York : IEEE, 1996. 320 p.
15. Mohylnyi H. Analiz prohramno-aparatnykh zasobiv stvorennia systemy z viddalenyim dostupom do navchalnykh kompiuternykh laboratorii zakladiv serednoi osvity. Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia. 2023. № 1(277). S. 5–19. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2019-256-8-5-19>.
16. RouterOS Documentation [Elektronnyi resurs] URL: <https://help.mikrotik.com/docs/spaces/ROS/pages/328059/RouterOS> (accessed: 08.01.2026).
17. Using ESXi Shell in vSphere [Elektronnyi resurs] URL: <https://techdocs.broadcom.com/us/en/vmware-cis/vsphere/vsphere/8-0/vsphere-security-8-0/securing-esxi-hosts/using-esxi-shell-in-vsphere.html> (accessed: 08.01.2026).

Mohylnyi H.A., Semenov M.A., Donchenko V.U., Shvets I. M., Donchenko S.M Automating cascading power management procedures for VMware vSphere servers using network infrastructure

The article investigates the current problem of ensuring the stability of information systems in the conditions of an energy crisis. The need to protect VMware vSphere virtualized environments is substantiated, where sudden power outages without prior controlled shutdown lead to irreversible damage to virtual disk file systems, violation of database integrity and metadata at the storage level.

Analysis of existing solutions has shown that industrial uninterruptible power supply systems (UPS) with network management cards (NMC) have a high cost and limited software flexibility, which makes their use economically inefficient for small and medium-sized cluster segments.

The aim of the work is to develop a flexible automated cascade power management system based on available network infrastructure, in particular MikroTik routers, and high-power household charging stations. Within the framework of the study, a classification of virtual resources was carried out and it was proposed to distribute all resources into several service levels, for example: minimal (vCenter, AD servers, Web server), basic (file servers, RDP) and full (VMware Horizon, UAG). The authors described the main stages of creating

the relevant system: distribution of the virtual environment, study of electrical power consumption, configuration of the virtual environment, as well as development of procedures (scripts) for controlling the start/shutdown of the VMware vSphere virtual environment. Based on experimental data, time delays for cascading start and shutdown are proposed, which ensures correct synchronization of system components. The technical implementation of the system is described, which includes setting the server BIOS for automatic power recovery and supporting Wake-on-LAN. A scheme for distributing power consumption through two power supplies is proposed, which allows optimizing charging of stations without stopping the servers. Also considered are methods for optimizing the VMware Horizon environment through the ParentVMs parameter control to reduce the number of active service virtual machines and the features of developing start/stop control procedures using the example of a MikroTik router.

The practical significance of the results tested in the laboratory "IT Solutions Center" of Taras Shevchenko National University of Lviv is the creation of a budget and reliable infrastructure protection tool that simulates the functionality of corporate NMC systems. The use of the SSH protocol with certificates for command automation on ESXi hosts provides a high level of autonomy and security of the management process without the need for manual administrator intervention.

Key words: UPS, VMware by Broadcom, VMware vSphere, VMware Horizon, ESXi, SSH, virtual resources, MikroTik router.

Могильний Геннадій Анатолійович – к. т. н., доцент, директор Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, ORCID: 0000-0001-5317-2795 g.mogilnyi@gmail.com

Семенов Микола Анатолійович – к. п. н., доцент кафедри інформаційних технологій та систем Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, ORCID: 0000-0003-4989-8109 nasemenov@gmail.com

Донченко Володимир Юрійович – старший викладач кафедри інформаційних технологій та систем Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, ORCID: 0000-0003-0359-3051 ifmit.s.2014@gmail.com

Швець Ірина Михайлівна – асистент кафедри математики та інформатики Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, ORCID: 0009-0000-2767-8821 irinachipenko@gmail.com

Донченко Світлана Миколаївна – асистент кафедри інформаційних технологій та систем Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, ORCID: 0000-0002-2374-2109 donchenko.lana77@gmail.com

Дата першого надходження статті 13.02.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.03.2026.

Дата публікації 11.05.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-301-3-25-32>

УДК 004.383.8:004.421

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КВАНТОВИХ СХЕМ ВІДНІМАННЯ В БАЗИСІ СУЧАСНИХ КВАНТОВИХ ПРОЦЕСОРІВ

Полупан Ю.В.

COMPARATIVE ANALYSIS OF QUANTUM SUBTRACTION CIRCUITS IN THE BASIS OF MODERN QUANTUM PROCESSORS

Polupan Yu.V.

У роботі досліджено шість квантових схем віднімачів, реалізованих у середовищі Qiskit: *Out-of-place ripple-borrow subtractor*, *In-place ripple-borrow subtractor*, *Cuccaro ripple-carry subtractor*, *Parallel Carry-lookahead subtractor*, *Parallel-prefix Kogge-Stone subtractor* та *QFT-based subtractor* за підходом *Draper*. Метою дослідження є порівняння схем за кількістю кубітів, кількістю гейтів, глибиною, *CNOT-count*, *CNOT-depth*, *T-count* і *T-depth* після транспіляції до базису $\{CX, T, T^\dagger, H, X, S, S^\dagger\}$. Показано, що для трирозрядних операндів найменшу кількість кубітів мають *In-place ripple-borrow* та *QFT-based* схеми, тоді як найменшу транспільовану глибину демонструє *Parallel Carry-lookahead subtractor*. *QFT-based* схема має малу кількість *CNOT-гейтів*, однак після розкладання контрольованих фазових зсувів *CP* у *Clifford+T*-базис її *T-вартість* стає на кілька порядків більшою за інші схеми. Отримані результати підтверджують, що вибір архітектури віднімача залежить від цільової моделі обчислень: для *fault-tolerant Clifford+T*-реалізації перевагу мають схеми з контрольованою *T*-складністю, тоді як *QFT*-підхід доцільніше оцінювати в нативних фазових базисах. Загалом результати показують, що для малих розрядностей і *Clifford+T*-орієнтованої реалізації найбільш збалансованим вибором є *Parallel Carry-lookahead subtractor*, тоді як *Ripple-borrow* схеми залишаються привабливими за умови дефіциту кубітів. *QFT-based* підхід потребує окремого аналізу в апаратних моделях, де фазові зсуви є дешевшими або підтримуються нативно.

З навчально-методичного погляду такий аналіз є важливим для формування у студентів практичного розуміння архітектурної різноманітності квантових арифметичних схем. Порівняння різних типів віднімачів показує, що одна й та сама операція може бути реалізована через принципово різні підходи, які по-різному проявляють себе на логічному

та фізичному рівнях. Це дає змогу студентам усвідомити, що вибір алгоритму або схемної реалізації залежить не лише від математичної постановки задачі, а й від цільової квантової архітектури, нативного набору гейтів, кількості доступних кубітів і вимог до *fault-tolerant* виконання.

Ключові слова: квантові обчислення, квантова арифметика, квантове віднімання, віднімач, Qiskit, Clifford+T, ripple-borrow, carry-lookahead, Kogge-Stone, QFT, Draper adder.

1. Вступ. Квантові обчислення ґрунтуються на використанні суперпозиції, унітарної еволюції та запутаності квантових станів, що дає змогу будувати алгоритми, принципово відмінні від класичних [1, 2]. Одним із базових напрямів розвитку квантових алгоритмів є квантова арифметика, оскільки операції додавання, віднімання, множення та модульного піднесення до степеня використовуються в алгоритмах факторизації, пошуку, симуляції фізичних систем і криптоаналітичних застосуваннях [2, 3, 4].

Водночас дослідження та порівняння схем квантових арифметичних пристроїв має важливе навчально-методичне значення, оскільки такі схеми є наочними прикладами реалізації унітарних перетворень, роботи з квантовими регістрами, допоміжними кубітами та оборотними логічними елементами. Зокрема, аналіз різних типів квантових віднімачів може бути використаний в освітньому процесі підготовки здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти, які вивчають освітній компонент «Теорія квантової інформації та обчислень» освітньої програми «Інженерія

квантового програмного забезпечення», як засіб формування практичного розуміння принципів побудови квантових обчислювальних схем.

Операція віднімання є особливо важливою, оскільки вона може реалізовуватися як самостійна оборотна арифметична процедура або через додавання числа у формі доповнення до двох. У квантових схемах така операція повинна бути оборотною, а тому потребує уважного керування допоміжними кубітами, проміжними переносами або позиками та процедурою очищення тимчасових регістрів. Класичні ідеї ripple-carry, carry-lookahead та parallel-prefix арифметики мають квантові аналоги, однак їхня ефективність істотно залежить від набору елементарних гейтів і вартості декомпозиції Toffoli- та фазових операцій [5, 6, 7, 8].

У сучасних fault-tolerant моделях важливу роль відіграє Clifford+T-базис. Clifford-гейти, зокрема $\{CX, H, X, S, S^\dagger\}$ зазвичай вважаються дешевшими у корекції помилок, тоді як T-гейти потребують складніших процедур магічної дистиляції. Тому T-count і T-depth є критичними метриками складності квантових арифметичних схем [2, 9]. Водночас QFT-based арифметика, започаткована в роботах Draper, дозволяє виконувати додавання й віднімання у фур'є-базисі через контрольовані фазові зсуви [10, 11]. Такий підхід може бути компактным на абстрактному рівні, але його ефективність суттєво залежить від того, чи доступні контрольовані фазові гейти нативно.

Метою цієї роботи є експериментальне порівняння шести квантових схем віднімання для трирозрядних операндів, реалізованих у Qiskit [12-14], із подальшою транспіляцією до Clifford+T-базису, а також висвітлення навчально-методичного значення такого аналізу. Для студентів, які вивчають квантові обчислення, таке порівняння є корисним, оскільки дає змогу побачити, що ефективність тієї чи іншої схеми може істотно змінюватися залежно від фізичної реалізації обчислювального пристрою.

2. Теоретичні основи квантового віднімання Для двох n -бітових чисел A і B віднімання може бути представлене як

$$D = A - B.$$

У класичній двійковій арифметиці ця операція може виконуватися або через

послідовне поширення позики, або через додавання доповнення до двох:

$$A - B = A + (\bar{B} + 1).$$

У квантовій схемотехніці обидва підходи повинні бути реалізовані оборотно. Це означає, що вхідна інформація не може бути безповоротно стерта, а всі проміжні значення мають або зберігатися в окремих регістрах, або бути очищені через uncomputation.

Ripple-borrow схеми віднімання поширюють позику від молодших бітів до старших. Їх перевагою є відносно мала кількість кубітів і проста структура, але глибина зростає лінійно з розрядністю. Ripple-carry підхід Cuccaro, первинно запропонований для додавання, може бути адаптований до віднімання через перетворення операндів і використання логіки переносу [6]. Parallel Carry-lookahead схеми намагаються зменшити глибину шляхом паралельного обчислення сигналів генерації та поширення переносу або позики [7]. Parallel-prefix схеми, зокрема Kogge–Stone, використовують префіксну мережу для швидкого поширення інформації про перенос, що в класичній арифметиці забезпечує логарифмічну глибину [8].

QFT-based підхід використовує квантове перетворення Фур'є, після якого арифметична операція виконується за допомогою контрольованих фазових зсувів CP. Draper показав, що додавання у фур'є-базисі може бути реалізоване через контрольовані фазові зсуви [11]. Віднімання може бути побудоване аналогічно, змінюючи знаки фаз або використовуючи доповнення до двох [10].

3. Методика дослідження. Для порівняльного аналізу було обрано шість схем квантового віднімання, які репрезентують основні архітектурні підходи до побудови арифметичних квантових модулів: послідовне поширення позики, використання переносу через доповнення до двох, паралельне передбачення позики, parallel-prefix обчислення та QFT-based арифметику. Такий вибір дає змогу порівняти не лише окремі реалізації, а й різні принципи організації квантового віднімання. Схеми, що були проаналізовані:

1) **Out-of-place ripple-borrow subtractor** та **in-place ripple-borrow subtractor**, оскільки ripple-borrow схеми є найбільш прямими квантовими аналогіями класичного двійкового віднімання з послідовним поширенням позики. Ці дві схеми дозволяють

окремо оцінити компроміс між кількістю кубітів і складністю обчислення. Out-of-place схема використовує додатковий регістр для результату, тому краще зберігає вхідні дані, але потребує більшої кількості кубітів. In-place схема записує результат у наявний регістр, що зменшує просторову складність, однак зазвичай ускладнює керування проміжними позиками та процедуру очищення допоміжних станів.

2) **Cuccaro ripple-carry subtractor**, оскільки ця схема є однією з найвідоміших і найчастіше використовуваних конструкцій квантової арифметики з лінійною глибиною та малою кількістю допоміжних кубітів [6]. Віднімання може бути реалізоване через модифікацію додавання, зокрема через інверсію одного з операндів і використання ідеї доповнення до двох. Тому така схема є природною контрольною точкою для порівняння з ripple-borrow реалізаціями та з більш паралельними архітектурами.

3) **Parallel Carry-lookahead subtractor** обрано для представлення схем, у яких зменшення глибини досягається за рахунок попереднього або паралельного обчислення сигналів генерації та поширення позики. Parallel Carry-lookahead підхід є класичною альтернативою ripple-структурі і має важливе значення для квантової арифметики, оскільки дозволяє зменшити залежність глибини від послідовного проходження переносу або позики [7]. Включення цієї схеми дає змогу перевірити, чи окупується збільшення кількості допоміжних кубітів зменшенням T-depth, CNOT-depth і загальної глибини.

4) **Parallel-prefix Kogge-Stone subtractor** включено як приклад агресивнішої паралельної архітектури. Kogge-Stone мережі широко відомі в класичній схемотехніці як швидкі parallel-prefix adders з малою логарифмічною глибиною [8]. У контексті квантового віднімання така схема демонструє, як класична ідея паралельного префіксного обчислення може бути перенесена на оборотну логіку та реалізацію віднімання через доповнення до двох. Її включення важливе не тому, що вона очікувано найкраща для малого $n=3$, а тому, що вона показує інший край компромісу: більша кількість кубітів і Toffoli-подібних операцій в обмін на потенційно кращу масштабованість глибини для більших розрядностей.

5) **QFT-based Draper subtractor** обрано як представника принципово іншої моделі арифметики, у якій операція виконується не

через булеву логіку переносу або позики, а у фур'є-базисі за допомогою контрольованих фазових обертань [10, 11]. Це дозволяє порівняти Toffoli/Clifford+T-орієнтовані схеми з QFT-based підходом. Така схема є особливо важливою для аналізу, оскільки на абстрактному рівні вона може мати компактку структуру й малу кількість CNOT-гейтів, але після транспіляції до дискретного Clifford+T-базису її вартість може різко зрости через декомпозицію фазових обертань.

Отже, обрані шість схем утворюють репрезентативний набір для порівняння. Вони охоплюють три основні класи квантового віднімання: класичні ripple-підходи, паралельні схеми на основі Parallel Carry-lookahead або prefix-мереж та альтернативну QFT-based модель. Завдяки цьому можна оцінити ключові компроміси між кількістю кубітів, глибиною, CNOT-вартістю та T-вартістю, а також визначити, які архітектури є доцільними для малих схем у Clifford+T-базисі.

Таким чином, у дослідженні розглянуто шість схем для операндів розрядності $n=3$:

1. Cuccaro ripple-carry subtractor, де результат $A - B$ записується у регістр b .

2. Parallel carry-lookahead subtractor, де результат записується у регістр a .

3. Out-of-place ripple-borrow subtractor із окремим регістром різниці $diff$ та окремим регістром $bout$, що використовується як допоміжні для зберігання проміжних бітів позики.

4. In-place ripple-borrow subtractor.

5. Parallel-prefix Kogge-Stone subtractor, що реалізує віднімання через паралельно-префіксну мережу для форми доповнення до двох.

6. QFT-based Draper subtractor.

Для кожної схеми оцінено два рівні складності: абстрактний рівень до транспіляції та рівень після транспіляції. Сучасні квантові пристрої умовно поділяють на NISQ-пристрої та fault-tolerant архітектури. NISQ-пристрої (Noisy Intermediate-Scale Quantum) мають від десятків до тисяч фізичних кубітів, однак характеризуються помітним рівнем шуму та, як правило, не використовують повноцінну квантову корекцію помилок. Тому схеми для таких пристроїв істотно обмежені за глибиною, оскільки похибки окремих операцій накопичуються під час обчислення.

Натомість fault-tolerant архітектури використовують квантові коди корекції помилок, зокрема surface code, у яких логічні кубіти кодуються багатьма фізичними кубітами

й захищаються від шуму. Це дає змогу виконувати значно глибші схеми, ніж на NISQ-пристроях, хоча й потребує суттєвих додаткових ресурсів.

Водночас практична вартість схеми залежить не лише від кількості гейтів після формальної транспіляції, а й від фізичної платформи. Наприклад, у trapped-ion системах характерними є висока зв'язність між кубітами та можливість ефективної реалізації фазових і контрольованих фазових гейтів. Натомість надпровідні системи (IBM, Google) мають обмежену зв'язність у вигляді двовимірної решітки, а їхніми native gates є CX та Rz, що робить їх природним середовищем для схем із великою кількістю CNOT-операцій. Фотонні системи (PsiQuantum) принципово відрізняються від інших: їхні native операції діють на фотони, а двокубітні взаємодії реалізуються імовірно, що суттєво впливає на структуру придатних схем.

Квантові віднімачі є арифметичними примітивами, що можуть входити до складу більших квантових алгоритмів, зокрема алгоритмів факторизації, квантової лінійної алгебри, моделювання фізичних систем і квантової хімії. Такі алгоритми мають практичний сенс насамперед у fault-tolerant режимі, де тривалі обчислення можуть виконуватися з контрольованим накопиченням помилок. У цьому контексті важливу роль відіграє Clifford+T-базис. Clifford-гейти {CX, H, X, S, S[†]} зазвичай вважаються дешевшими в реалізації з корекцією помилок, тоді як T- та T[†]-гейти потребують складніших процедур, зокрема підготовки магічних станів і магічної дистиляції. Тому в роботі для порівняння схем віднімачів проведено транспіляцію до Clifford+T-базису {CX, T, T[†], H, X, S, S[†]}, а основними метриками обрано кількість кубітів, загальну кількість гейтів, глибину схеми, CNOT-count, CNOT-depth, T-count і T-depth. Для QFT-based схем контрольовані фазові зсуви після транспіляції також зводяться до операцій обраного Clifford+T-базису, тому їхня вартість враховується через ті самі метрики, що й для інших схем.

4. Результати. Перед порівнянням метрик було проведено тестування коректності всіх реалізованих схем. Для різних вхідних комбінацій трирозрядних операндів A та B перевірялося, чи правильно схема формує результат віднімання та чи коректно очищує допоміжні регістри.

4.1. Абстрактний рівень

Таблиця 1

Значення метрик абстрактного рівня

№	Схема	Кубітів	Гейтів	Глибина	CNOT-depth / CP-depth
1	Cuccaro ripple-carry	10	28	19	18
2	Parallel Carry-lookahead	15	33	10	8
3	Out-of-place ripple-borrow	12	26	10	9
4	In-place ripple-borrow	8	23	12	10
5	Kogge–Stone	20	54	31	29
6	QFT-based Draper	8	33	17	CP-depth = 11, H-depth = 6

На абстрактному рівні найменшу кількість кубітів мають in-place ripple-borrow та QFT-based схеми: по 8 кубітів. Найменшу кількість гейтів має in-place ripple-borrow subtractor - 22 гейти. Найменшу глибину має out-of-place ripple-borrow subtractor - 9, а Parallel Carry-lookahead схема має близьке значення 10, але при цьому демонструє кращу паралелізацію за CNOT-depth.

Kogge–Stone subtractor має найбільшу кількість кубітів і гейтів на абстрактному рівні. Це пов'язано з тим, що parallel-prefix структура вимагає додаткових проміжних регістрів і більшої кількості Toffoli-подібних операцій. Для n=3 переваги логарифмічної глибини ще не проявляються, тому накладні витрати домінують. На рис. 1-6 представлені квантові схеми відповідних віднімачів.

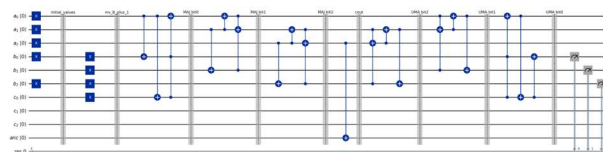


Рис. 1. Схема Cuccaro ripple-carry subtractor

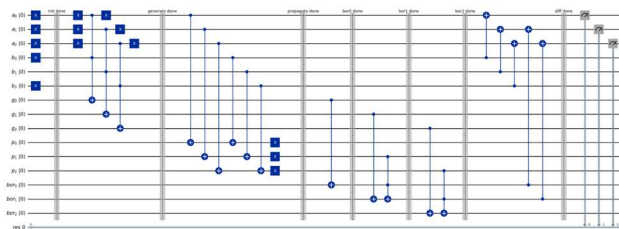


Рис. 2. Parallel Carry-lookahead subtractor

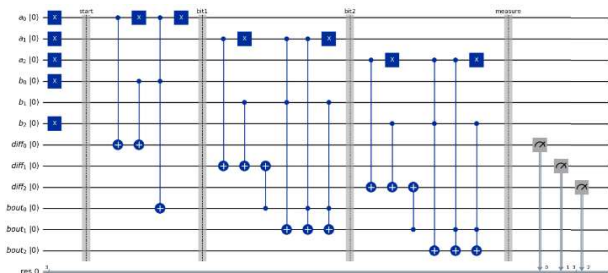


Рис. 3. Out-of-place ripple-borrow subtractor

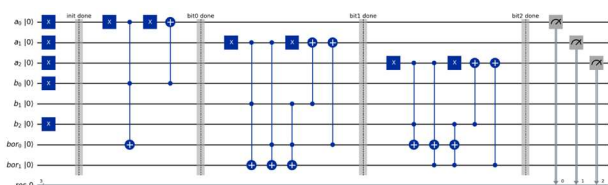


Рис. 4. In-place ripple-borrow subtractor

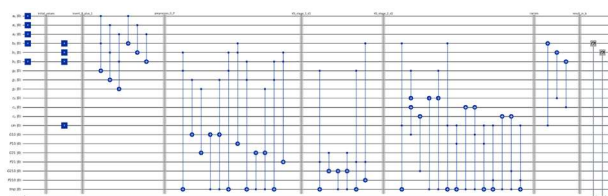


Рис. 5. Kogge-Stone parallel subtractor

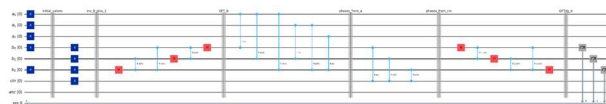


Рис. 6. QFT-based Draper subtractor

4.2. Рівень після транспіляції. Після транспіляції найкращі показники серед Clifford+T-орієнтованих схем має Parallel Carry-lookahead subtractor. Він має найменшу загальну кількість гейтів серед транспільованих схем без урахування QFT-аномалії, найменшу глибину, найменший CNOT-depth, найменший T-count і найменший T-depth. Це свідчить, що навіть для малого $n=3$ паралельне обчислення сигналів позики може бути вигідним.

Cuccaro ripple-carry subtractor має помірну кількість кубітів і прийнятний T-count, але його глибина 76 перевищує глибину carry-lookahead схеми більш ніж удвічі. Out-of-place ripple-borrow має найменшу абстрактну глибину, однак після декомпозиції Toffoli-гейтів поступається carry-lookahead за T-depth і CNOT-depth. In-place ripple-borrow економить кубіти, але ця економія досягається ціною більшої послідовності операцій.

Kogge-Stone subtractor виявився найдорожчим серед не-QFT схем: 381 гейт, 162 CNOT і T-count 168. Для трирозрядного випадку така схема є надмірною, оскільки overhead parallel-prefix мережі перевищує виграш від паралелізму. Однак для більших n ця архітектура може стати конкурентнішою завдяки кращому асимптотичному масштабуванню глибини, що відповідає ідеї класичного Kogge-Stone додавання [8].

Таблиця 2

Значення метрик після транспіляції

№	Схема	Гейтів	Depth	CNOT-count	CNOT-depth	T-count	T-depth
1	Cuccaro ripple-carry	112	76	49	45	42 ($T=24$, $T^+=18$)	30
2	Parallel Carry-lookahead	103	33	44	21	35 ($T=20$, $T^+=15$)	15
3	Out-of-place ripple-borrow	116	53	50	32	49 ($T=28$, $T^+=21$)	25
4	In-place ripple-borrow	113	63	47	39	49 ($T=28$, $T^+=21$)	30
5	Kogge-Stone	384	214	162	128	168 ($T=96$, $T^+=72$)	106
6	QFT-based Draper	304881	214256	30	28	167612 ($T=83810$, $T^+=803802$)	128087

QFT-based Draper subtractor має лише 30 CNOT-гейтів, що є найкращим показником серед усіх схем після транспіляції. Проте загальна кількість гейтів, T-count і T-depth є надзвичайно великими: 304881 гейт, T-count 167612 і T-depth 128087. Це пояснюється тим, що контрольовані фазові зсуви CP, природні для QFT-арифметики, розкладаються у заданий дискретний Clifford+T-базис із дуже високою вартістю. Отже, QFT-based subtractor не слід оцінювати лише за CNOT-count; для fault-tolerant реалізації ключовими стають T-метрики. Головною перевагою цієї схеми є те, що на абстрактному рівні вона використовує переважно гейти Hadamard- та контрольовані фазові операції CP і має малу кількість CNOT після транспіляції. Тому така схема може бути вигідною на NISQ-пристроях або спеціалізованих архітектурах (trapped-ion платформах), де фазові повороти та контрольовані фазові гейти реалізуються нативно, з малою похибкою і без дорогого розкладу в Clifford+T. У такій моделі вартості важливішими стають кількість двокубітних операцій, зв'язність між кубітами та фізична тривалість гейтів, а не лише T-count.

Таким чином, QFT-based Draper subtractor демонструє конкурентні показники на абстрактному рівні і є привабливим для платформ із підтримкою фазових обертань з використанням гейтів CP або у контексті алгоритмів, що вже оперують у Фур'є-базисі. Однак у fault-tolerant архітектурі з Clifford+T-базисом транспіляція контрольованих фазових обертань спричиняє вибухове зростання T-count і T-depth, що робить цю архітектуру непрактичною для даного контексту.

Отже, вибір схеми віднімача суттєво залежить від цільової апаратної платформи та обчислювальної моделі.

Отримані результати демонструють, що порівняння квантових віднімачів суттєво залежить від обраного рівня абстракції. На логічному рівні QFT-based схема виглядає компактною, оскільки містить лише 15 контрольованих фазових гейтів, 6 Hadamard-гейтів і 9 X-гейтів. Однак після приведення до Clifford+T-базису її вартість різко зростає. Це узгоджується з відомими властивостями QFT-арифметики: вона ефективна за наявності нативних або наближено реалізованих фазових обертань, але може бути невигідною в дискретних fault-tolerant базисах [10, 11].

Для схем на основі Toffoli-логіки основним джерелом вартості є розкладання CCX у

Clifford+T-базис. Саме тому T-count корелює з кількістю Toffoli-гейтів на абстрактному рівні. Наприклад, Kogge-Stone схема містить 24 CCX, що після транспіляції призводить до T-count=168. Натомість Parallel Carry-lookahead схема має лише 5 CCX, тому її T-count дорівнює 35.

Важливо також розрізнити in-place та out-of-place реалізації. In-place subtractor використовує менше кубітів, що є перевагою для пристроїв із обмеженою кількістю фізичних або логічних кубітів. Проте така схема зазвичай має складнішу послідовність операцій, оскільки результат записується поверх одного з вхідних регістрів. Out-of-place підхід потребує окремого регістра результату, але може мати простішу структуру обчислення різниці та позики.

Parallel Carry-lookahead subtractor у цьому експерименті є найкращим компромісом між глибиною та T-вартістю. Він використовує більше кубітів, ніж ripple-borrow схеми, але виграє за критичними метриками після транспіляції. Для fault-tolerant квантових обчислень це особливо важливо, оскільки зменшення T-depth безпосередньо впливає на час виконання логічної схеми [9].

Cuccaro ripple-carry subtractor залишається важливим baseline-рішенням. Його цінність полягає у простоті, регулярності та добре вивченій структурі [6]. Такі схеми є зручними для перевірки коректності, побудови більших арифметичних блоків і порівняння з оптимізованими архітектурами.

5. Висновки. У роботі виконано порівняльний аналіз шести квантових схем віднімання для трирозрядних операндів у Qiskit. Після транспіляції до базису $\{CX, T, T^\dagger, H, X, S, S^\dagger\}$ найефективнішою серед розглянутих Clifford+T-орієнтованих схем виявилася Parallel carry-lookahead схема: вона має 102 гейти, глибину 33, CNOT-depth 21, T-count 35 і T-depth 15.

In-place ripple-borrow subtractor є найекономнішою схемою за кількістю кубітів серед Toffoli-базованих реалізацій, але поступається carry-lookahead за глибиною та T-depth. Out-of-place ripple-borrow має просту структуру та малу абстрактну глибину, однак після транспіляції не є найкращим за T-метриками. Cuccaro ripple-carry subtractor є корисним baseline, але для заданих параметрів програє carry-lookahead за глибиною. Kogge-Stone subtractor для $n = 3$ має надмірні накладні витрати, хоча його parallel-prefix природа може бути перспективною для більших розрядностей.

QFT-based Draper subtractor демонструє принципово інший профіль: мала кількість CNOT-гейтів, але надзвичайно велика Clifford+T-вартість через декомпозицію контрольованих фазових обертань. Тому для справедливого оцінювання QFT-based арифметики потрібно або використовувати нативний фазовий базис, або явно задавати точність апроксимації фазових гейтів.

З навчально-методичного погляду проведений аналіз має цінність як приклад переходу від абстрактного опису квантового алгоритму до його схемної та ресурсної реалізації. Порівняння різних квантових схем віднімачів дає змогу студентам побачити, що одна й та сама арифметична операція може реалізовуватися за різними архітектурними принципами: через фазові зсуви, послідовне поширення позики, паралельне обчислення переносів або допоміжні регістри. Такий аналіз формує розуміння того, що вибір квантового алгоритму або схеми не є універсальним, а залежить від цільової архітектури, доступного набору гейтів, кількості кубітів, обмежень на глибину схеми та вартості fault-tolerant реалізації. Отже, розгляд квантових віднімачів може бути використаний в освітньому процесі як практичний інструмент для засвоєння зв'язку між теоретичною моделлю квантових обчислень, логічною схемою та її фізичною реалізацією.

Література

1. Feynman, R. P. Simulating Physics with Computers. *International Journal of Theoretical Physics*. 1982. Vol. 21. P. 467–488. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf02650179>
2. Nielsen, M. A., Chuang, I. L. *Quantum Computation and Quantum Information*. 10th Anniversary ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 702 p.
3. Wong, T. G. *Introduction to Classical and Quantum Computing*. Omaha, NE: Rooted Grove, 2022. 400 p.
4. Preskill, J. *Course Information for Physics 219/Computer Science 219: Quantum Computation*. California Institute of Technology, 2015–2025. URL: <https://www.preskill.caltech.edu/ph219/>
5. Vedral, V., Barenco, A., Ekert, A. Quantum networks for elementary arithmetic operations. *Physical Review A*. 1996. Vol. 54, No. 1. P. 147–153. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.54.147>
6. Cuccaro, S. A., Draper, T. G., Kutin, S. A., Moulton, D. P. A new quantum ripple-carry addition circuit. arXiv:quant-ph/0410184, 2004. URL: <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0410184>
7. Draper, T. G., Kutin, S. A., Rains, E. M., Svore, K. M. A logarithmic-depth quantum carry-lookahead adder. *Quantum Information and Computation*. 2006. Vol. 6, No. 4–5. P. 351–369. DOI: <https://doi.org/10.26421/QIC6.4-5-4>
8. Kogge, P. M., Stone, H. S. A parallel algorithm for the efficient solution of a general class of recurrence equations. *IEEE Transactions on Computers*. 1973. Vol. C-22, No. 8. P. 786–793. DOI: <https://doi.org/10.1109/TC.1973.5009159>
9. Gidney, C. Halving the cost of quantum addition. *Quantum*. 2018. Vol. 2. Article 74. DOI: <https://doi.org/10.22331/q-2018-06-18-74>
10. Ruiz-Perez, L., Garcia-Escartin, J. C. Quantum arithmetic with the Quantum Fourier Transform. *Quantum Information Processing*. 2017. Vol. 16. Article 152. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11128-017-1603-1>
11. Draper, T. G. Addition on a Quantum Computer. arXiv:quant-ph/0008033, 2000. URL: <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0008033>
12. Mykhailova, M. *Quantum Programming in Depth: Solving Problems with Q# and Qiskit*. Manning Publications, 2025.
13. Norlén, H. *Quantum Computing in Practice with Qiskit® and IBM Quantum Experience®*. Birmingham: Packt Publishing, 2020. 354 p.
14. Lored, J. *Learn Quantum Computing with Qiskit*. 2nd ed. Birmingham: Packt Publishing, 2024. 582 p.

Polupan Yu.V. Comparative analysis of quantum subtraction circuits in the basis of modern quantum processors.

The paper investigates six quantum subtraction circuits implemented in the Qiskit framework: the out-of-place ripple-borrow subtractor, in-place ripple-borrow subtractor, Cuccaro ripple-carry subtractor, parallel carry-lookahead subtractor, parallel-prefix Kogge–Stone subtractor, and the QFT-based subtractor following Draper's approach. The aim of the study is to compare these circuits in terms of qubit count, gate count, circuit depth, CNOT count, CNOT depth, T-count, and T-depth after transpilation to the $\{CX, T, T^\dagger, H, X, S, S^\dagger\}$ basis. It is shown that for three-bit operands, the in-place ripple-borrow and QFT-based circuits require the fewest qubits, while the Parallel Carry-lookahead subtractor demonstrates the smallest transpiled depth. The QFT-based circuit has a low number of CNOT gates; however, after decomposing controlled phase rotations (CP) into the Clifford+T basis, its T-cost becomes several orders of magnitude higher than that of the other circuits. The obtained results confirm that the choice of subtractor architecture depends on the target computational model: for fault-tolerant Clifford+T implementations, circuits with controlled T-complexity are preferable, whereas the QFT approach is more appropriate to evaluate in native phase bases.

Overall, the results show that for small bit-widths and Clifford+T-oriented implementations, the most

balanced choice is the Parallel Carry-lookahead subtractor, while ripple-borrow circuits remain attractive under qubit-limited conditions. The QFT-based approach requires separate analysis in hardware models where phase shifts are cheaper or natively supported.

From a teaching and methodological perspective, such an analysis is important for developing students' practical understanding of the architectural diversity of quantum arithmetic circuits. Comparing different types of subtractors demonstrates that the same operation can be implemented using fundamentally different approaches, which manifest differently at both logical and physical levels. This enables students to realize that the choice of an algorithm or circuit implementation depends not only on the mathematical formulation of the problem, but also on the target quantum architecture, the native gate set, the number of available qubits, and the requirements for fault-tolerant execution.

Keywords: *quantum computing, quantum arithmetic, quantum subtraction, subtractor, Qiskit, Clifford+T, ripple-borrow, carry-lookahead, Kogge–Stone, QFT, Draper adder.*

Полупан Юлія Вікторівна – к.т.н., доц., кафедра Інформатики та програмної інженерії, КПІ ім. І. Сікорського, м. Київ,

<https://orcid.org/0009-0000-0243-824X>

e-mail: Juliy_polupan@i.ua

Дата першого надходження статті 15.02.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.03.2025.

Дата публікації 11.05.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-301-3-33-44>

УДК 004.41:004.9

ІНТЕРАКТИВНИЙ WEB ЗАСТОСУНОК ЦИФРОВОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Ратов Д.В., Марченко Д.М., Захожай О.І.

INTERACTIVE WEB APPLICATION OF THE DIGITAL UNIVERSITY

Ratov D.V., Marchenko D.M., Zakhozha O.I.

У статті розглянуто концептуальні та технологічні засади побудови інтерактивного WEB застосунку цифрового університету на прикладі системи TimeTable SNU в умовах сучасної цифрової трансформації вищої освіти. Метою формування цифрового університету є створення інтегрованого комплексу взаємопов'язаних цифрових сервісів, що забезпечують підтримку навчальної, наукової та управлінської діяльності, а також інтероперабельність даних між цими сервісами. Узгоджена взаємодія цифрових компонентів сприяє підвищенню ефективності освітнього процесу, оптимізації управлінських рішень та зниженню адміністративного навантаження на учасників університетської спільноти. Запропоновано архітектурний шаблон модуля для організації багатокористувацької віконної інформаційної WEB системи, орієнтованої на роботу в хмарному середовищі та забезпечення принципу «все і звідусіль». Реалізовано об'єкти JavaScript — диспетчер вікон та клас віконного інтерактивного інтерфейсу, які забезпечують керування життєвим циклом вікон, оброблення подій користувача та синхронізацію станів у розподіленому середовищі. Актуальність роботи зумовлена потребою забезпечення безперервності функціонування закладів вищої освіти України в умовах воєнного стану, просторової розосередженості здобувачів освіти та науково педагогічних працівників, а також необхідністю створення адаптивних цифрових рішень для переміщених університетів. Розроблено та впроваджено інтерактивний web-застосунок TimeTable SNU, який охоплює модулі навчального відділу, деканата, профілів користувачів, власного репозиторію ресурсів, відеозв'язку і чату, формування індивідуальних навчальних планів та електронного документообігу. Система забезпечує автоматизоване формування розкладів і сесій, контроль завантаженості

аудиторій, управління вибірковими компонентами, дистанційну взаємодію учасників освітнього процесу та юридично значуще оформлення документів у цифровому вигляді. Запропонований підхід підтвердив ефективність використання власної SPA-архітектури для побудови масштабованого та адаптивного цифрового університету. Система TimeTable SNU забезпечує реалізацію принципу «все і звідусіль», підвищує стійкість закладів вищої освіти до зовнішніх викликів та може бути використана як основа для формування інтегрованої освітньої цифрової екосистеми України з потенціалом подальшої адаптації для закладів середньої освіти. **Ключові слова:** цифровий університет, web-застосунок, інтерактивний інтерфейс.

Вступ. Сучасні процеси цифрової трансформації вищої освіти та розвиток концепції «цифрового університету» зумовлюють необхідність системних змін у підходах до управління закладами освіти, організації освітнього процесу та використання людських і матеріальних ресурсів [20, 21]. Ці зміни спрямовані на підвищення якості підготовки здобувачів освіти, забезпечення їх конкурентоспроможності на глобальному ринку праці та інтеграцію української системи вищої освіти у світовий освітній простір.

Постановка проблеми. В умовах воєнного стану та майбутнього повоєнного відновлення України особливої актуальності набуває створення цифрових рішень, здатних забезпечити безперервність освітнього й управлінського процесів незалежно від безпекової ситуації та місця перебування учасників. Окремої уваги потребують

переміщені університети, які, зберігши кадровий потенціал і значну частину студентського контингенту, зазнали втрати матеріально-технічної та наукової інфраструктури. Просторова розосередженість здобувачів освіти та викладачів, у тому числі за межами країни, ускладнює організацію традиційного очного навчання та управління університетом.

У зв'язку з цим цифрова трансформація закладів вищої освіти потребує вирішення низки специфічних завдань: забезпечення цілодобового та безперешкодного доступу до цифрових ресурсів університету; формування інваріантного до географічного розташування цифрового освітнього середовища; впровадження ефективних інструментів електронного управління та документообігу. Реалізація цих завдань можлива лише за умови використання масштабованих web-технологій, хмарної інфраструктури та інтерактивних користувацьких інтерфейсів.

Більшість сучасних рішень у сфері цифрової освіти реалізуються у вигляді комплексів на основі сторонніх фреймворків або модульних платформ типу LMS/ERP, зокрема Moodle, Canvas, Microsoft Teams for Education або комерційних ERP-систем, адаптованих під освітні потреби [7, 10, 12]. Такі підходи забезпечують швидке розгортання базового функціоналу, однак мають низку обмежень: залежність від зовнішніх технологічних стеків, обмежену гнучкість інтеграції, складність адаптації під локальні регламенти закладів вищої освіти та зростання експлуатаційних витрат при масштабуванні.

Мета дослідження. Метою даної роботи є розроблення та дослідження архітектурного шаблону інтерактивного web-модуля цифрового університету, який забезпечує багатокористувацьку взаємодію, комунікацію користувачів, підтримку розподіленого освітнього процесу та адаптацію до хмарної інфраструктури.

Контекст дослідження. Дослідження виконано в контексті створення інтерактивного WEB-застосунку цифрового університету на прикладі системи TimeTable SNU в умовах сучасної цифрової трансформації вищої освіти. Формування цифрового університету розглядається як побудова інтегрованого комплексу взаємопов'язаних цифрових сервісів, що забезпечують підтримку навчальної, наукової та управлінської діяльності, а також інтеоперабельність даних між цими сервісами.

Узгоджена взаємодія цифрових компонентів сприяє підвищенню ефективності освітнього процесу, оптимізації управлінських рішень та зниженню адміністративного навантаження на учасників університетської спільноти.

У межах роботи запропоновано архітектурний шаблон модуля для організації багатокористувацької віконної інформаційної web-системи, орієнтованої на роботу в хмарному середовищі та реалізацію принципу «все і звідусіль». Реалізовано об'єкти JavaScript — диспетчер вікон та клас віконного інтерактивного інтерфейсу, які забезпечують керування життєвим циклом вікон, оброблення подій користувача та синхронізацію станів у розподіленому середовищі.

Актуальність роботи зумовлена потребою забезпечення безперервності функціонування закладів вищої освіти України в умовах воєнного стану, просторової розосередженості здобувачів освіти та науково педагогічних працівників, а також необхідністю створення адаптивних цифрових рішень для переміщених університетів. Наведено програмну реалізацію модулів та результати їх практичного використання у системі TimeTable SNU, що підтверджують ефективність запропонованого підходу.

Передумови та пов'язані дослідження. Розроблення інтерактивних WEB застосунків для підтримки діяльності закладів вищої освіти ґрунтується на сукупності наукових і прикладних передумов, що сформувалися в межах досліджень з архітектури програмних систем, web технологій, хмарних обчислень та цифрової трансформації освіти. Концепція «цифрового університету» розглядається як еволюційний етап розвитку інформаційних систем управління освітнім процесом, у якому ключовими вимогами є інтегрованість сервісів, масштабованість, інтеоперабельність даних і доступність ресурсів у режимі 24/7.

Архітектурні передумови. Базові принципи побудови сучасних WEB систем були сформульовані в роботах, присвячених клієнт–серверній архітектурі та архітектурним стилям розподілених систем. Класична модель клієнт–сервер [1] забезпечила відокремлення представлення, бізнес логіки та даних, а архітектурний стиль REST, запропонований Р. Філдінгом [2], став основою для масштабованих web орієнтованих сервісів. Подальший розвиток цих ідей знайшов відображення у дослідженнях RESTful сервісів та сервісно орієнтованої

архітектури [12], а також у сучасних підходах до проектування мікросервісних систем [10].

Окрему роль у формуванні архітектурних передумов відіграють SPA підходи та проектування клієнтської частини web застосунків. У працях з архітектури програмного забезпечення [17] та шаблонів проектування JavaScript застосунків [11, 18] підкреслюється важливість чіткого управління станами інтерфейсу, подіями користувача та життєвим циклом компонентів. Саме ці ідеї стали основою для розроблення власного архітектурного шаблону інтерактивного інтерфейсу в системі TimeTable SNU.

WEB технології та інтерактивні інтерфейси. Розвиток стандартів JavaScript та WEB API суттєво розширив можливості створення інтерактивних користувацьких інтерфейсів без залучення важких сторонніх фреймворків. Сучасні специфікації мови та стандартні структури даних [8], а також підходи до організації клієнтської логіки [11, 18], дозволяють будувати складні SPA системи з високим рівнем продуктивності та керованості.

Власні попередні дослідження автора [13, 14] були спрямовані на формування архітектурної парадигми модуля інтерактивного інтерфейсу та моделі користувацького web інтерфейсу інформаційної системи. У цих роботах обґрунтовано доцільність використання диспетчера вікон та об'єктно орієнтованого підходу до організації інтерфейсних компонентів, що забезпечує масштабованість і повторне використання коду. Подальший розвиток цих ідей реалізовано в системі TimeTable SNU.

Цифрові платформи у вищій освіті. Значна кількість сучасних досліджень присвячена впровадженню LMS платформ, зокрема Moodle, як базового інструменту цифрового навчального середовища [7]. Такі системи ефективно вирішують завдання розміщення навчальних матеріалів, контролю знань і комунікації, однак не охоплюють повний спектр управлінських процесів університету. ERP системи, навпаки, орієнтовані на адміністративний облік, але мають обмежену гнучкість щодо організації освітнього процесу.

У цьому контексті актуальним є підхід до створення інтегрованих платформ цифрового університету, які поєднують навчальні, управлінські та комунікаційні сервіси в єдиному web середовищі [20, 21]. Особливої ваги набувають питання юридичної значущості електронних документів, автентичності та

невідомості, що детально розглядаються в сучасних дослідженнях з інформаційної безпеки [22].

Комунікаційні сервіси та хмарні технології. Суттєвим компонентом цифрового університету є засоби синхронної комунікації. Стандарти WebRTC [19] забезпечили можливість реалізації peer to peer відеозв'язку безпосередньо в браузері, що стало технологічною передумовою для створення власних модулів відеоконференцій. Поряд із цим широко застосовуються зовнішні платформи відеозв'язку (Zoom, Microsoft Teams, Google Meet), інтеграція з якими здійснюється через відкриті API [4, 6, 23].

Таким чином, аналіз пов'язаних досліджень показує, що існуючі підходи до цифровізації вищої освіти або фокусуються на окремих аспектах навчального процесу, або потребують складної інтеграції різномірних систем. Запропонований у цій роботі підхід до побудови інтерактивного web застосунку цифрового університету спирається на сучасні архітектурні принципи, результати попередніх авторських досліджень і враховує специфічні умови функціонування українських закладів вищої освіти, що створює передумови для його ефективного практичного застосування.

Методологія проектування. Система цифрового університету TimeTable SNU розроблена відповідно до методології проектування інтегрованих web-систем, орієнтованих на підтримку розподілених освітніх та управлінських процесів. У межах даної роботи система розглядається як цілісний об'єкт, що поєднує програмну архітектуру, інтерактивний користувацький інтерфейс та організаційні моделі функціонування закладу вищої освіти в цифровому середовищі.

Методологічною основою створення TimeTable SNU є поєднання системного підходу, принципів цифрової трансформації університетів та практик побудови сучасних web-застосунків.

Загальна характеристика системи TimeTable SNU. Система цифрового університету TimeTable SNU призначена для автоматизації процесів планування та управління навчальним процесом, комунікації та взаємодії викладачів, студентів і адміністративного персоналу. Застосунок функціонує як багатовіконна web платформа з мікросервісною архітектурою (рис. 1), що дозволяє одночасно працювати з кількома модулями без перезавантаження сторінки [10].

Основними вимогами до системи є:

- підтримка багатокористувацького доступу;
- інтерактивний віконний інтерфейс;
- масштабованість та готовність до хмарного розгортання;
- зручність інтеграції з іншими сервісами університету.



Рис. 1. Web- платформа у цифровій трансформації закладів вищої освіти

Система цифрового університету реалізована як сучасний односторінковий WEB-застосунок (Single Page Application, SPA) [3, 17], що функціонує повністю у браузерному середовищі без використання сторонніх JavaScript-фреймворків [11]. Такий підхід дозволив забезпечити повний контроль над архітектурою клієнтської частини, оптимізувати продуктивність інтерфейсу та мінімізувати залежність від зовнішніх бібліотек.

SPA-архітектура Timetable SNU базується на власноруч розробленому механізмі керування станом застосунку, маршрутизації та динамічного оновлення інтерфейсу без перезавантаження сторінки [14]. Це забезпечує безперервну взаємодію користувачів із системою, швидкий відгук інтерфейсу та можливість одночасної роботи з кількома функціональними модулями у багатовіконному режимі.

Відмова від використання сторонніх фреймворків зумовлена вимогами до:

- гнучкої адаптації інтерфейсу під специфічні процеси університетського управління;
- зниження ризиків, пов'язаних із оновленням або припиненням підтримки зовнішніх бібліотек;
- підвищення рівня інформаційної безпеки та прозорості програмної реалізації;
- оптимальної інтеграції з серверними сервісами та хмарною інфраструктурою.

Завдяки SPA-підходу система TimeTable SNU підтримує масштабування, інтеграцію з внутрішніми та зовнішніми цифровими сервісами університету, а також реалізацію принципу «все і звідусіль» для всіх категорій користувачів — адміністрації, викладачів і здобувачів освіти.

Архітектурний шаблон і програмна реалізація системи. Архітектурні рішення, покладені в основу інтерактивного web-застосунку цифрового університету, є логічним розвитком авторських підходів до побудови модулів інтерактивного інтерфейсу в умовах використання хмарних технологій, запропонованих у попередніх дослідженнях [13, 14]. Зокрема, використано архітектурну парадигму інтерактивного інтерфейсного модуля [18], у межах якої користувацький інтерфейс розглядається як самостійний, слабо зв'язаний компонент web системи, здатний функціонувати в розподіленому середовищі.

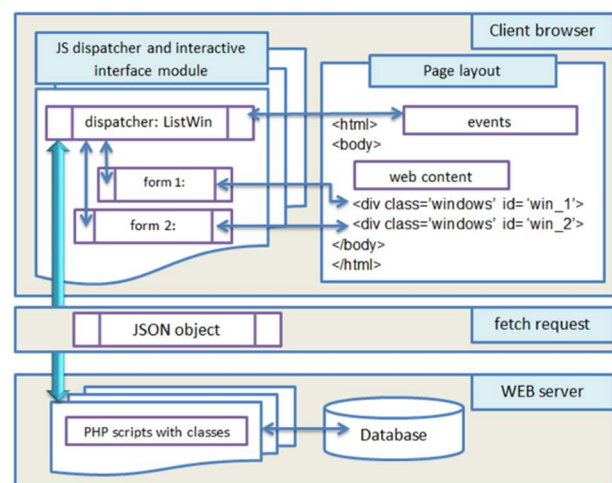


Рис. 2. Модель інтерфейсу користувача інформаційної WEB системи

В основі запропонованого рішення лежить модель модуля інтерфейсу користувача інформаційної web системи, що передбачає чітке розмежування логіки представлення, керування станами та взаємодії з серверними сервісами через стандартизовані програмні інтерфейси (рис. 2) [1, 9]. Такий підхід забезпечує інтероперабельність між різними цифровими сервісами університету та їх інтеграцію в єдине інформаційне середовище цифрового університету.

Для реалізації віконної логіки застосунку запропоновано архітектурний шаблон, що базується на двох ключових компонентах:

1. Об'єкт диспетчер вікон — централізований компонент керування, який відповідає за створення, знищення, активацію та координацію взаємодії вікон, а також за синхронізацію їхніх станів у багатокористувацькому та хмарному середовищі.

2. Клас віконного інтерактивного інтерфейсу — інкапсулює поведінку окремого вікна, механізми взаємодії з користувачем, засоби підключення до внутрішніх і зовнішніх сервісів цифрового університету, а також передачу і отримання даних з сервера [8, 12].

Запропонований архітектурний шаблон забезпечує відокремлення логіки представлення від логіки керування, підтримує масштабування та повторне використання компонентів [9], що є принципово важливим для багатокomпонентних цифрових університетських систем, орієнтованих на міжнародні стандарти цифровізації.

Програмна реалізація інтерактивного модуля виконана мовою JavaScript з урахуванням принципів, сформульованих у попередніх роботах автора, присвячених архітектурі інтерактивних WEB інтерфейсів [13, 14] та інтеграції web сервісів [15]. Диспетчер вікон реалізує подієво орієнтовану модель взаємодії та виконує роль посередника між користувацьким інтерфейсом і серверними компонентами цифрового університету.

Важливою особливістю реалізації є можливість інтеграції web застосунку з зовнішніми інформаційними ресурсами, зокрема соціальними мережами. Це дозволяє розширити канали комунікації, спростити процедури автентифікації та підвищити залученість користувачів до цифрового освітнього середовища, що відповідає сучасним міжнародним тенденціям розвитку цифрових платформ.

Клас віконного інтерфейсу відповідає за візуальну складову та взаємодію з користувачем, реалізує механізми динамічного формування контенту, керування подіями та адаптації інтерфейсу до різних сценаріїв використання. Архітектура модуля забезпечує паралельну роботу з кількома сервісами без перезавантаження сторінки та підтримує узгоджене керування станами у багатокористувацькому режимі. Розроблені програмні компоненти адаптовані для розгортання в хмарній інфраструктурі та підтримують масштабування відповідно до кількості активних користувачів і

функціональних модулів, що забезпечує стабільну та відмовостійку роботу системи в умовах зростання навантаження.

Функціональні можливості та практична реалізація цифрового університету. Система цифрового університету TimeTable SNU реалізована як багатомодульний інтерактивний web застосунок, що забезпечує підтримку ключових процесів освітньої та управлінської діяльності закладу вищої освіти.

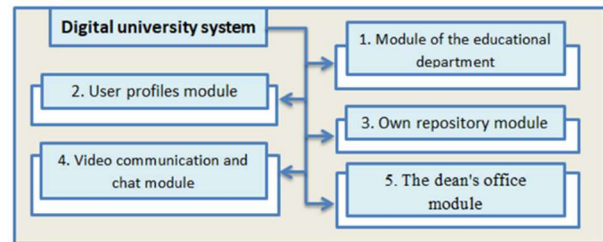


Рис.3. Модульна архітектура системи

Архітектура системи побудована за принципом функціональної декомпозиції, де кожен модуль відповідає за окремий клас задач і взаємодіє з іншими компонентами через уніфіковані програмні інтерфейси [2, 5]. Модулі орієнтовані на автоматизацію навчально-методичної та документальної діяльності університету (рис. 3). Впровадження забезпечує цілісну цифрову підтримку життєвого циклу освітніх програм, індивідуальних навчальних планів і супровідної документації.

Модульна декомпозиція дозволяє забезпечити масштабованість, інтероперабельність та адаптивність системи до потреб різних категорій користувачів.

Модуль учбового відділу. Модуль учбового відділу є одним з базових компонентів системи TimeTable SNU та призначений для автоматизації процесів планування й контролю навчального процесу.

Функціонал формування розкладу занять реалізовано у вигляді інтерактивного редактора, який підтримує автоматизоване створення розкладу за заздалегідь визначеними шаблонами (рис. 4). При цьому використовується технологія drag-and-drop [16], що дозволяє оперативно змінювати структуру розкладу шляхом переміщення занять між часовими слотами та аудиторіями. Для мінімізації помилок і підвищення узгодженості даних застосовуються довідники навчальних груп, видів занять та навчальних дисциплін.

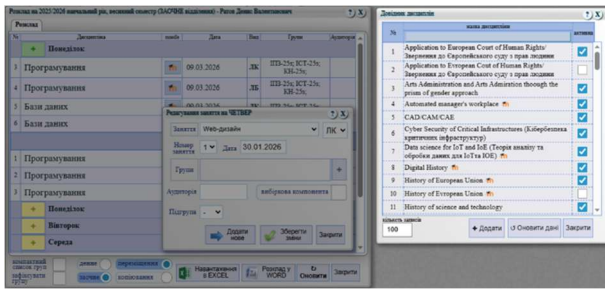


Рис. 4. Форми інтерактивного редактора розкладу

Окремо реалізовано функціонал організації екзаменаційної сесії. Серверна частина системи забезпечує автоматизоване формування розкладу сесії з можливістю експорту документів у форматі Word, а також формування звітів щодо навчального навантаження викладачів у форматі Excel. Такий підхід спрощує підготовку офіційної документації та знижує трудомісткість адміністративної роботи.

Важливим елементом модуля є засоби перевірки розкладу за аудиторіями, які дозволяють виявляти конфлікти використання приміщень та аналізувати рівень завантаженості аудиторного фонду. Це забезпечує більш ефективне використання матеріально-технічних ресурсів університету.

Модуль профілів користувачів. Модуль профілів користувачів забезпечує персоналізацію роботи в системі та розмежування доступу відповідно до ролей учасників освітнього процесу.

Профіль викладача підтримує долучення до розкладу занять та екзаменаційної сесії, створення і використання власних навчальних ресурсів, а також налаштування персональних параметрів роботи із системою (рис. 5). Це сприяє інтеграції викладацької діяльності в єдине цифрове середовище університету.

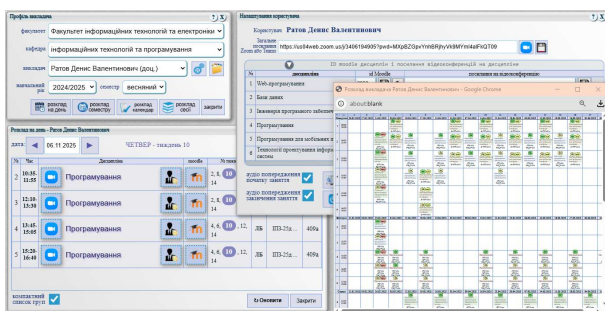


Рис. 5. Форми профіля викладача

Профіль студента орієнтований на підтримку індивідуальної освітньої траєкторії. Функціонал модуля передбачає доступ до розкладу занять і сесії, долучення до навчальних

ресурсів, вибір вибіркокових освітніх компонентів, а також ведення каталогу індивідуальних навчальних планів. Передбачено можливість створення нового індивідуального навчального плану з накладанням електронного цифрового підпису, що забезпечує юридичну коректність цифрових документів [22].

Модуль власного репозиторію. Модуль власного репозиторію призначений для зберігання та керування цифровими освітніми ресурсами. Користувачі можуть формувати власні колекції матеріалів (лекції, практичні роботи, методичні вказівки, презентації, файли завдань тощо), а також надавати доступ до них іншим обраним користувачам або групам (рис. 6). Такий підхід підтримує як індивідуальну, так і колективну роботу з навчальним контентом у межах цифрового університету.

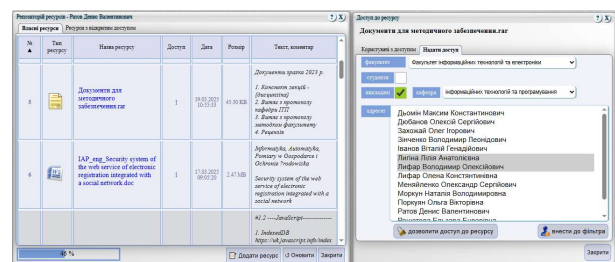


Рис. 6. Форми керування власним репозиторієм

Додатково система підтримує інтеграцію з ресурсами платформи Moodle [7]. Користувачам (викладачам) достатньо зберегти в своїх налаштуваннях ідентифікатори відповідних курсів Moodle, після чого студенти отримують швидкий доступ до матеріалів зовнішнього репозиторію без необхідності дублювання контенту в системі TimeTable SNU.

Модуль відео зв'язку та чату. Для забезпечення синхронної комунікації між учасниками освітнього процесу в межах цифрового університету реалізовано модуль відеозв'язку та чату. У системі TimeTable SNU створений власний механізм відеозв'язку та обміну повідомленнями, що функціонує на основі технології peer-to-peer [19], без використання зовнішніх серверів відеоконференцій (рис. 7). Це дозволяє зменшити затримки передавання даних, підвищити автономність системи та забезпечити контроль над інформаційними потоками.

Функціональні можливості власного модуля включають:

- увімкнення та вимкнення відео- й аудіопотоків;

- режим демонстрації екрану;
- текстовий чат між учасниками;
- створення та проведення відеонарад безпосередньо у WEB-застосунку.

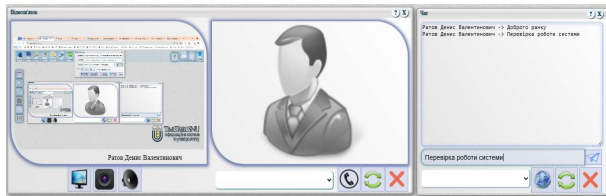


Рис. 7. Форма відеоконференцій й чату

Поряд із власною реалізацією, система підтримує інтеграцію зі сторонніми платформами відеозв'язку, зокрема Zoom [23], Microsoft Teams [6] та Google Meet [4]. Для використання таких сервісів викладачам достатньо зберегти у власних налаштуваннях посилання на персональні відеоконференції. Збережені посилання автоматично використовуються під час формування розкладу занять, проведення екзаменаційних сесій або організації онлайн-нарад.

Поєднання власного peer-to-peer функціоналу та можливості використання зовнішніх відеоплатформ забезпечує високу гнучкість системи TimeTable SNU, дозволяє враховувати індивідуальні вподобання викладачів і технічні можливості користувачів, а також підвищує надійність організації дистанційного та змішаного навчання.

Модуль деканата. Модуль деканата у системі TimeTable SNU реалізує комплекс функцій, спрямованих на підтримку управлінської, навчально-методичної та аналітичної діяльності структурних підрозділів університету. Він виступає інтеграційною ланкою між навчальними планами, контингентом здобувачів освіти, вибірковыми компонентами та цифровим документообігом.

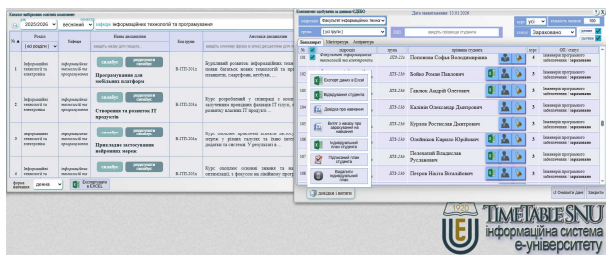
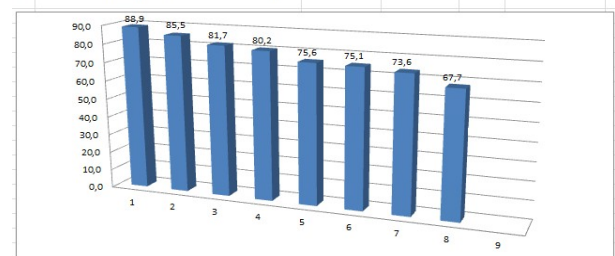


Рис. 8. Форми каталогу вибірових освітніх компонентів і контингента здобувачів

Функціональність модуля включає каталог вибірових освітніх компонентів, що забезпечує

централізоване формування та публікацію переліку дисциплін для вибору студентами з урахуванням навчальних планів і нормативних обмежень (рис. 8). Підтримується облік контингенту здобувачів освіти на основі даних ЄДЕБО з можливістю актуалізації статусів студентів та формування зведеної статистичної інформації.

	факультет	очікувана відвідуваність	фактична відвідуваність	%	загальний %
1	Факультет інженерії	7281	6476,3	88,9	81,9
2	Факультет транспорту і будівництва	6834	5845,6	85,5	
3	Факультет інформаційних технологій та електроніки	2651	2173,4	81,7	
4	Аспірантський факультет	2944	2361,6	80,2	
5	Факультет здоров'я людини	1942	1468,8	75,6	
6	Факультет економіки і управління	2712	2036,8	75,1	
7	Аспірантура і докторантура	900	662	73,6	
8	Факультет права, гуманітарних і соціальних наук	2311	1565,4	67,7	



Дата	Заняття	номер семестру	група	ПІБ викладача	кількість в групі по бг	факт	%
10.11.2025	Вступ до спеціальності	2	АКР-25а	Асменко А. А.	5	4	80
10.11.2025	Матриця та робочий листок: базові принципи і практика	3	АКР-25а	Асменко А. А.	5	2	40
10.11.2025	Автоматизація технологічних процесів і виробництва	4	АТН-22а	Асменко А. А.	28	14	50
10.11.2025	Технологія виробництва	1	ТНТ-23а	Воробей О. В.	11	8	73
10.11.2025	Вступ у факультет	2	ТНТ-25а	Воробей О. В.	8	7	88
10.11.2025	Модуль електронних систем	2	ЛК-25а	Зиченко В. Л.	4	2	50
10.11.2025	Модуль електронних систем	3	ЛК-25а	Зиченко В. Л.	4	1	25
10.11.2025	Модуль електронних систем	4	ЛК-25а	Зиченко В. Л.	4	1	25
10.11.2025	Модуль електронних систем	5	ЛК-25а	Зиченко В. Л.	4	2	50
10.11.2025	Опир матеріалів в будівництві	1	МКБ-24а	Сосенко К. В.	27	18	67
10.11.2025	Опир матеріалів в будівництві	1	МКБ-25а	Сосенко К. В.	10	7	70
10.11.2025	Основи комп'ютерної логістики	5	В-ВНТ-104а	Бондар Д. Ю.	20	4	20
10.11.2025	Безпека нових	1	ПЕО-22а	Давиденко Н. О.	13	10	77
10.11.2025	Безпека нових	1	ПМ-22а	Давиденко Н. О.	17	17	100
10.11.2025	Безпека нових	1	ПМ-22б	Давиденко Н. О.	19	10	53
10.11.2025	Безпека нових	2	МКБ-23а	Давиденко Н. О.	38	27	71
10.11.2025	Безпека нових	3	АТ-23а	Давиденко Н. О.	55	41	75
10.11.2025	Безпека нових	3	ПТ-23а	Давиденко Н. О.	13	4	31
10.11.2025	Безпека нових	4	ОПАТ-23а	Давиденко Н. О.	53	7	13
10.11.2025	Безпека нових	4	ОПАТ-23а	Давиденко Н. О.	19	7	37
10.11.2025	Управління вантажами	4	В-ВНТ-104а	Волошенко В. В.	28	8	29
10.11.2025	Управління вантажами	5	В-ВНТ-104а	Волошенко В. В.	28	5	18
10.11.2025	Сертифікація та ліцензування на автомобільному транспорті	2	АТ-23а	Поліщук С. В.	6	4	67
10.11.2025	Мойти вулиці та дороги	4	МКБ-22а	Уварова Г. Є.	45	16	36
10.11.2025	Мойти вулиці та дороги	4	МКБ-23а	Уварова Г. Є.	45	14	31
10.11.2025	Мойти вулиці та дороги	5	МКБ-23а	Уварова Г. Є.	45	14	31
10.11.2025	Система автоматизованого протиповстання на транспорті	1	АТ-23а	Шваченко С. І.	55	35	64
10.11.2025	Система автоматизованого протиповстання на транспорті	1	ПТ-23а	Шваченко С. І.	13	7	54
10.11.2025	Система автоматизованого протиповстання на транспорті	2	АТ-23а	Шваченко С. І.	55	42	76
10.11.2025	Система автоматизованого протиповстання на транспорті	2	ПТ-23а	Шваченко С. І.	13	4	31

Рис. 9. Моніторинг активності та відвідування занять

Важливою складовою є модуль моніторингу активності та відвідування занять, який акумулює дані з розкладу, відеоконференцій та інтерактивних сесій (рис. 9). Це дозволяє деканату здійснювати аналітичний контроль навчального процесу та своєчасно виявляти ризики академічної неупередженості.

У межах модуля деканата інтегровано розширений функціонал роботи з навчальними планами. Реалізовано модуль імпорту навчальних планів у стандартизованому форматі з автоматичним аналізом і розпізнаванням освітніх компонентів. Інтерактивний редактор дозволяє коригувати перелік дисциплін, їх семестровість, обсяги ECTS, типи контролю та визначати гарантів освітніх програм. Вбудовані механізми валідації

забезпечують узгодженість даних з вимогами стандартів вищої освіти та внутрішньою структурою навчального процесу. Модуль деканата також має функціонал генерації цифрового підпису, який реалізує підтримку накладання кваліфікованого електронного підпису без використання зовнішнього програмного забезпечення. Система забезпечує роботу з сертифікатами КЕП, онлайн-перевірку валідності підписаних документів, автоматичне формування файлів підпису формату p7s, а також їх імпорт і архівацію. Даний механізм інтегрований з основними модулями TimeTable SNU, що надає юридичну значущість розкладам, індивідуальним планам та іншій офіційній документації.

Модуль формування індивідуальних навчальних планів забезпечує автоматизоване створення індивідуальних навчальних планів студентів на основі навчального плану спеціальності, обраних вибіркових компонент та нормативних вимог до обсягів ECTS (рис. 10). Передбачено зручний інтерфейс редагування, механізми валідації відповідності стандартам вищої освіти, експорт у формат XLSX, накладання цифрового підпису студента й уповноважених осіб університету, а також збереження історії версій індивідуальних навчальних планів.

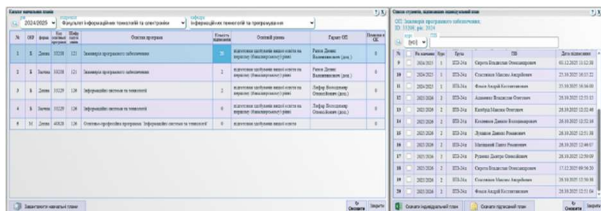


Рис. 10. Форма каталогу навчальних планів

Каталог навчальних програм у складі модуля деканата забезпечує централізоване зберігання, перегляд та імпорт навчальних планів, що створює єдиний інформаційний простір для планування та контролю освітнього процесу.

Результати. У межах проведеної роботи результати розроблення та впровадження системи TimeTable SNU доцільно розглядати у контексті сучасних підходів до побудови цифрових університетів та інтерактивних web-систем. Запропонований архітектурний шаблон SPA-застосунку, реалізований без використання сторонніх фреймворків, підтверджує можливість створення масштабованих і функціонально насичених рішень на основі

нативних web-технологій. Це відрізняє розроблену систему від значної кількості існуючих платформ: LMS-систем і корпоративних ERP-систем, які базуються на важких фреймворках та мають обмежену гнучкість щодо адаптації до специфічних вимог закладів вищої освіти. LMS-системи орієнтовані переважно на підтримку навчального контенту та комунікацію, тоді як ERP-системи фокусуються на обліково-адміністративних процесах. Інтеграція цих підходів зазвичай потребує складних налаштувань або сторонніх сервісів.

Запропонована система TimeTable SNU реалізує єдине інтегроване середовище цифрового університету, у якому поєднані навчальні, управлінські та комунікаційні функції, що відповідає концепції сервісо-орієнтованої архітектури [2, 10] та принципам REST-орієнтованих web-систем [12] (рис. 11).

Критерій	TimeTable SNU	Moodle (LMS)	Університетські ERP
Архітектура клієнта	SPA без сторонніх фреймворків	MVC / framework-based	Web-клієнт, залежний від платформи
Орієнтація	Навчання + управління + документообіг	Навчальний процес	Адміністративний облік
Гнучкість адаптації	Висока (власна архітектура)	Обмежена плагінами	Низька (жорсткі бізнес-логіки)
Підтримка ЕЦП	Вбудована	Відсутня / зовнішні сервіси	Обмежена або відсутня
Формування ІНП	Автоматизоване + підпис	Відсутнє	Частково
Відеоз'язок	P2P + Zoom / Teams / Meet	Сторонні плагіни	Зовнішні сервіси
Робота в умовах розподіленості	Оптимізована	Частково	Обмежена
Вартість масштабування	Низька	Середня	Висока

Рис. 11. Порівняльна характеристика систем

Особливу увагу в системі заслуговує реалізація інтерактивного віконного інтерфейсу та диспетчера вікон, що забезпечують багатокористувацьку взаємодію та синхронізацію станів у розподіленому середовищі. У порівнянні з класичними одновіконними web-інтерфейсами, запропонований підхід наближає користувацький досвід до настільних інформаційних систем, підвищуючи зручність роботи з великими обсягами даних та кількома сервісами одночасно. На відміну від зазначених рішень, система TimeTable SNU реалізована як SPA-застосунок без використання сторонніх клієнтських фреймворків, що дозволило:

- зменшити накладні витрати на виконання клієнтського коду;
- забезпечити повний контроль над життєвим циклом інтерфейсних компонентів;
- адаптувати архітектуру під специфіку академічних процесів українських ЗВО;
- підвищити стабільність роботи в умовах нестабільного мережевого з'єднання.

Важливою відмінністю запропонованого підходу є інтеграція функціоналу електронного документообігу з підтримкою цифрового підпису, що не є типовим для класичних LMS-систем. У більшості існуючих платформ електронний підпис реалізується або через зовнішні сервіси, або відсутній як такий, що обмежує юридичну значущість електронних документів. У TimeTable SNU цифровий підпис інтегрований на рівні архітектури та використовується в ключових процесах — формуванні індивідуальних навчальних планів, розкладів, довідок та інших офіційних документів. Інтеграція власних модулів відеозв'язку, чату, репозиторію та електронного документообігу з можливістю використання сторонніх платформ (Zoom, Microsoft Teams, Google Meet, Moodle) демонструє принцип інтероперабельності та відкритості системи. Такий підхід дозволяє уникнути дублювання функціоналу та зменшити бар'єр входження для викладачів і студентів, які вже користуються зовнішніми сервісами.

Окремої уваги заслуговує підхід до організації комунікацій. На відміну від систем, які повністю залежать від сторонніх відеоплатформ, у TimeTable SNU реалізовано власний модуль відеозв'язку та чату на основі технології peer-to-peer із можливістю паралельного використання Zoom, Microsoft Teams та Google Meet. Це забезпечує технологічну незалежність системи та гнучкість вибору інструментів викладачами.

Практичне впровадження системи цифрового університету на базі TimeTable SNU дозволило досягти відчутного підвищення ефективності організаційних та навчальних процесів. За результатами експлуатації системи в університеті зафіксовано:

1. скорочення часу формування та коригування розкладу занять і сесії в середньому на 35–45% за рахунок автоматизованого редактора та серверної генерації документів;

2. зменшення адміністративного навантаження на працівників навчальних частин приблизно на 35%, що узгоджується з результатами досліджень ефективності цифрових систем управління [17];

3. скорочення термінів погодження та затвердження індивідуальних навчальних планів студентів у 2–2,5 рази завдяки інтеграції електронного підпису та автоматичної валідації [22];

4. підвищення доступності цифрових сервісів університету до режиму 24/7 незалежно від місця перебування користувачів, що відповідає концепції «все і звідусіль» [1, 3];

5. зниження кількості помилок у навчальних планах і розкладі (накладання занять, перевантаження аудиторій) на 25–30% за рахунок автоматизованої валідації даних.

Отримані результати узгоджуються з теоретичними положеннями щодо переваг SPA-архітектур та хмарних web-рішень у розподілених системах [4, 6, 11], а також підтверджують, що система TimeTable SNU може розглядатися як ефективна цифрова платформа для підтримки освітньої, управлінської та комунікаційної діяльності університету в умовах воєнного стану та просторової розосередженості учасників освітнього процесу. Разом з тим, подальші дослідження доцільно спрямувати на оцінювання показників продуктивності, безпеки та масштабованості системи при збільшенні кількості користувачів, а також на розширення функціоналу з використанням аналітичних та інтелектуальних сервісів.

Висновки. У роботі розглянуто підходи до формування інтерактивного WEB застосунку цифрового університету в умовах масштабної цифрової трансформації вищої освіти та викликів, спричинених воєнним станом в Україні. Запропонований архітектурний шаблон віконного модуля та його програмна реалізація у системі TimeTable SNU спрямовані на створення інтегрованого цифрового середовища, що забезпечує підтримку навчальної, наукової та управлінської діяльності університету. Реалізований підхід дозволяє вирішити ключові завдання цифрової трансформації: забезпечити цілодобовий доступ до ресурсів університету незалежно від місця перебування користувачів; організувати освітній процес у розподіленому середовищі без прив'язки до конкретних локацій; впровадити ефективні інструменти цифрового управління, включаючи електронний документообіг та підтримку колективного ухвалення рішень.

Розроблені модулі впроваджено у систему цифрового університету та протестовано в умовах реальної експлуатації. Отримані результати свідчать про:

1. підвищення зручності роботи користувачів за рахунок багатовіконного інтерфейсу;

2. скорочення часу доступу до необхідних функцій без перезавантаження сторінок;

3. стабільну роботу при одночасному підключенні значної кількості користувачів;

4. готовність до масштабування в хмарному середовищі.

Практичне впровадження модулів в системі TimeTable SNU підтвердило ефективність архітектурного шаблону, масштабованість програмної реалізації та її готовність до використання в хмарній інфраструктурі, зокрема для потреб переміщених університетів. Запропоновані рішення відповідають принципу «все і звідусіль» та можуть бути адаптовані не лише для закладів вищої, а й для закладів середньої освіти, що створює передумови для формування інтегрованої освітньої цифрової екосистеми.

Література

1. Архітектура клієнт - сервер. [https://ua.frwiki.wiki/wiki/Client-serveur] (дата звернення: 17.03.2026).
2. Fielding R. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures. Doctoral Dissertation, University of California, Irvine, 2000.
3. Flanagan D. JavaScript: The Definitive Guide. 7th ed., O'Reilly Media, 2020. P. 706.
4. Google. Google Meet API & Integration Guide, 2023. [https://developers.google.com/meet] (available: 17.03.2026)
5. IEEE. IEEE Std 830-1998: Recommended Practice for Software Requirements Specifications.
6. Microsoft. Документація платформи Microsoft Teams, 2023 [https://learn.microsoft.com/microsoftteams/platform] (дата звернення: 17.03.2026)
7. Moodle Pty Ltd. Система управління навчанням Moodle: Документація для розробників, 2023. [https://moodledev.io/] (дата звернення: 17.03.2026)
8. Mozilla Developer Network (MDN). JavaScript data types and data structures. MDN Web Docs, 2024. [https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript/Data_structures] (дата звернення: 17.03.2026)
9. MVC архітектура. [http://www.gwtproject.org/articles/mvp-architecture.html] (дата звернення: 21.01.2026)
10. Newman S. Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems. 2nd ed., O'Reilly Media, 2021.
11. Osmani A. Learning JavaScript Design Patterns. 2nd ed., O'Reilly Media, 2023. P. 296.
12. Pautasso C., Zimmermann O., Leymann F. RESTful Web Services vs. Big Web Services. IEEE Internet Computing,
13. Ratov D. Architectural paradigm of the interactive interface module in the cloud technology model.

Applied Computer Science, 2020, Vol. 16, No. 4, pp. 48–55. https://doi.org/10.23743/acs-2020-28.

14. Ратов Д. Модель модуля інтерфейсу користувача інформаційної веб-системи. Математичні машини та системи, Київ, 2021, № 4, с. 74–81.
15. Ратов Д. Інтеграція веб-сервісу із соціальною мережею. Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля, Київ, 2025, № 5 (291), с. 29–35. https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-29-35.
16. Ratov D. Object adaptation of drag and drop technology for web-system interface components. Bulletin of the V. Dahl East Ukrainian National University, Kyiv, 2021, No. 4 (268), pp. 7–12. https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-7-12.
17. Richards M., Ford N. Fundamentals of Software Architecture. O'Reilly Media, 2020.
18. Stefanov S. JavaScript Patterns. O'Reilly Media, 2010. P. 234.
19. W3C. WebRTC 1.0: Зв'язок між браузерами в режимі реального часу. Рекомендація W3C, 2021. [https://www.w3.org/TR/webrtc/] (дата звернення: 17.03.2026)
20. Захожай О. Програмне забезпечення для інформаційних систем підтримки діяльності територіальних громад. Матеріали Х Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електроніка та телекомунікації-2020». 2020. Сєверодонецьк: СХУ імені В. Даля. - С. 121-125.
21. Захожай О. Програмне забезпечення комп'ютерної системи інформатизації державних установ у рамках концепції «Держава у смартфоні». Матеріали XXIII Міжнародної науково-технічної конференції «Технології-2020». 2020. Сєверодонецьк: СХУ імені В. Даля. - С. 154-156.
22. Zhang Y., Li H., Wang X., Chen S. Authenticity, Integrity, and Non-Repudiation in Digital Information Systems: A Comprehensive Survey. IEEE Access, Vol. 11, 2023, pp. 112457–112489. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3321984
23. Zoom Video Communications Inc. Zoom API Documentation, 2023. [https://developers.zoom.us/] (дата звернення: 17.03.2026)

References

1. Architecture Client-Server. [https://ru.frwiki.wiki/wiki/Client-serveur] (available: 17.03.2026)
2. Fielding R. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures. Doctoral Dissertation, University of California, Irvine, 2000.
3. Flanagan D. JavaScript: The Definitive Guide. 7th ed., O'Reilly Media, 2020. P. 706.

4. Google. Google Meet API & Integration Guide, 2023. [https://developers.google.com/meet] (available: 17.03.2026)
5. IEEE. IEEE Std 830-1998: Recommended Practice for Software Requirements Specifications.
6. Microsoft. Microsoft Teams Platform Documentation, 2023. [https://learn.microsoft.com/microsoftteams/platform/] (available: 17.03.2026)
7. Moodle Pty Ltd. Moodle Learning Management System: Developer Documentation, 2023. [https://moodledev.io/] (available: 17.03.2026)
8. Mozilla Developer Network (MDN). JavaScript data types and data structures. MDN Web Docs, 2024. [https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript/Data_structures] (available: 17.03.2026)
9. MVC Architecture. [http://www.gwtproject.org/articles/mvp-architecture.html] (available: 21.01.2026)
10. Newman S. Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems. 2nd ed., O'Reilly Media, 2021.
11. Osmani A. Learning JavaScript Design Patterns. 2nd ed., O'Reilly Media, 2023. P. 296.
12. Pautasso C., Zimmermann O., Leymann F. RESTful Web Services vs. Big Web Services. IEEE Internet Computing, Vol. 12, No. 5, 2008, pp. 64–71.
13. Ratov D. Architectural paradigm of the interactive interface module in the cloud technology model. Applied Computer Science, 2020, Vol. 16, No. 4, pp. 48–55. https://doi.org/10.23743/acs-2020-28.
14. Ratov D. Model of the user interface module of the information web system. Mathematical Machines and Systems, Kyiv, 2021, No. 4, pp. 74–81.
15. Ratov D. Integration of a web service with a social network. Bulletin of the V. Dahl East Ukrainian National University, Kyiv, 2025, No. 5 (291), pp. 29–35. https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-29-35.
16. Ratov D. Object adaptation of drag and drop technology for web-system interface components. Bulletin of the V. Dahl East Ukrainian National University, Kyiv, 2021, No. 4 (268), pp. 7–12. https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-7-12.
17. Richards M., Ford N. Fundamentals of Software Architecture. O'Reilly Media, 2020.
18. Stefanov S. JavaScript Patterns. O'Reilly Media, 2010. P. 234.
19. W3C. WebRTC 1.0: Real-Time Communication Between Browsers. W3C Recommendation, 2021. [https://www.w3.org/TR/webrtc/] (available: 17.03.2026)
20. Zakhochai O. Software for information systems supporting the activities of territorial communities. Materials of the X All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "Electronics and Telecommunications-2020". 2020. Severodonetsk: SNU named after V. Dal. - P. 121-125.
21. Zakhochai O. Software of the computer system of informatization of state institutions within the framework of the concept "State in a smartphone". Materials of the XXIII International Scientific and Technical Conference "Technology-2020". 2020. Severodonetsk: SNU named after V. Dal. - P. 154-156.
22. Zhang Y., Li H., Wang X., Chen S. Authenticity, Integrity, and Non-Repudiation in Digital Information Systems: A Comprehensive Survey. IEEE Access, Vol. 11, 2023, pp. 112457–112489. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3321984
23. Zoom Video Communications Inc. Zoom API Documentation, 2023. [https://developers.zoom.us/] (available: 17.03.2026)

Ratov D.V., Marchenko D.M., Zakhochai O.I.
Interactive web application of the digital university

The article considers the conceptual and technological principles of building an interactive WEB application of a digital university using the example of the TimeTable SNU system in the conditions of modern digital transformation of higher education. The purpose of forming a digital university is to create an integrated complex of interconnected digital services that provide support for educational, scientific and managerial activities, as well as data interoperability between these services. Coordinated interaction of digital components contributes to increasing the efficiency of the educational process, optimizing management decisions and reducing the administrative burden on participants in the university community. An architectural template of a module is proposed for organizing a multi-user window information WEB system, oriented to work in a cloud environment and ensuring the principle of "everything and from everywhere". JavaScript objects are implemented - a window manager and a window interactive interface class, which provide window life cycle management, user event processing and state synchronization in a distributed environment. The relevance of the work is due to the need to ensure the continuity of the functioning of higher education institutions in Ukraine under martial law, the spatial dispersion of students and academic staff, as well as the need to create adaptive digital solutions for relocated universities. An interactive web application TimeTable SNU has been developed and implemented, which includes modules for the educational department, dean's office, user profiles, its own resource repository, video communication and chat, the formation of individual curricula and electronic document flow. The system provides automated formation of schedules and sessions, classroom occupancy control, management of selective components, remote interaction of participants in the educational process and legally significant registration of documents in digital form. The proposed approach

confirmed the effectiveness of using its own SPA architecture to build a scalable and adaptive digital university. The TimeTable SNU system ensures the implementation of the principle of "everything and from everywhere", increases the resilience of higher education institutions to external challenges, and can be used as a basis for forming an integrated educational digital ecosystem of Ukraine with the potential for further adaptation for secondary education institutions.

Keywords: digital university, web application, interactive interface.

Ратов Денис Валентинович – к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій та програмування, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ),

<https://orcid.org/0000-0003-4326-3030>

ratov@snu.edu.ua

Марченко Дмитро Миколайович – д.т.н., професор, перший проректор, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ),

<https://orcid.org/0000-0003-4757-4389>

marchenko@snu.edu.ua

Захожай Олег Ігорович – д.т.н., доцент, завідувач кафедри інформаційних технологій та програмування, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ),

<https://orcid.org/0000-0002-9078-3242>

zoi@snu.edu.ua

Дата першого надходження статті 19.02.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.03.2026.

Дата публікації 11.05.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-301-3-45-49>

УДК 004:62

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ІНТЕГРАЦІЇ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГІЙ ТА ML-MODEЛЕЙ У СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ФІНАНСОВИМИ РИЗИКАМИ

Філоненко О. Ю.

STUDY OF THE POSSIBILITY OF INTEGRATING BLOCKCHAIN TECHNOLOGIES AND ML MODELS INTO FINANCIAL RISK MANAGEMENT SYSTEMS

Filonenko O. Yu.

У статті досліджено можливість розробки моделі інформаційної технології з використанням інтеграції блокчейн-технології Hyperledger Fabric та ML-моделей для управління фінансовими ризиками. Актуальність дослідження зумовлена зростанням обсягів транзакцій в сучасних фінансових установах, ускладненням фінансових інструментів, впровадженням більш суворих регуляторних вимог, що загострює необхідність забезпечення незмінності та автентичності даних. Досліджено особливості традиційних централізованих систем управління ризиками, а саме обмеження щодо забезпечення незмінності історичних даних, що створює потенційні ризики маніпуляцій та спотворення аналітичних результатів. Оскільки ML-моделі, які активно застосовуються для кредитного скорингу та виявлення шахрайства, критично залежать від якості вхідних даних, виникає необхідність вирішення науково-прикладної задачі, а саме створення інтегрованої архітектури, яка поєднує гарантії незмінності даних блокчейн-систем із прогностичною потужністю ML-моделей. При підготовці статті проведено аналіз закордонних і вітчизняних публікацій щодо застосування алгоритмів машинного навчання (логістична регресія, Random Forest, XGBoost, Isolation Forest) у фінансовому скорингу та ефективності permissioned-архітектур блокчейн, зокрема Hyperledger Fabric. Обґрунтовано, що інтеграція блокчейн-рівня як інфраструктури довіри для ML-процесів (provenance, audit trail, integrity of updates, governance) залишається недостатньо формалізованою. Запропоновано трирівневу архітектуру (Data Layer, Analytics Layer, Governance Layer) та формальні визначення простору транзакцій, ML-моделі ризику

та формули інтегрованого ризику. В ході дослідження було використано синтетичний датасет та виконано порівняння ефективності моделей Logistic Regression, Random Forest та XGBoost.

За результатами моделювання виявлено, що модель XGBoost показала найвищі показники, а інтеграція з блокчейн не вплинула на прогностичну ефективність, і в той же час забезпечила повну трасованість рішень та підвищила аудиторську прозорість. Результати мають прогностичний характер і потребують подальшої емпіричної верифікації в умовах реального впровадження у фінансовій установі.

Ключові слова: блокчейн, Hyperledger Fabric, машинне навчання, управління фінансовими ризиками, кредитний скоринг, фінансовий моніторинг, permissioned blockchain.

Вступ. Сучасні фінансові установи функціонують в умовах зростання обсягів транзакцій, ускладнення фінансових інструментів та підвищення регуляторних вимог. В Україні ці вимоги формуються з урахуванням положень Національного банку України [11] щодо управління ризиками та організації систем фінансового моніторингу, проте вимоги до програмного продукту не обмежуються ними – технічний аспект реалізації подібних рішень та вимоги інструментів можуть не отримувати достатньо належної уваги.

Традиційні централізовані системи управління ризиками мають обмеження щодо забезпечення

незмінності історичних даних, що створює потенційні ризики маніпуляцій та спотворення аналітичних результатів. Одночасно ML-моделі, які активно застосовуються для кредитного скорингу та виявлення шахрайства, критично залежать від якості вхідних даних. Таким чином, виникає науково-прикладна проблема створення інтегрованої архітектури, яка поєднує гарантії незмінності даних блокчейн-систем із прогностичною потужністю ML-моделей.

Аналіз закордонних і вітчизняних публікацій. Аналіз публікацій показує, що популярними алгоритмами машинного навчання, які часто застосовуються у фінансовому скорингу, управлінні ризиками та AML-аналізі [9] є: логістична регресія, Random Forest [3], Gradient Boosting (XGBoost) [2], нейронні мережі [4], Isolation Forest для виявлення аномалій [8], а дослідження у сфері застосування блокчейн-технологій [5, 7] у фінансовому секторі демонструють ефективність permissioned-архітектур для корпоративних середовищ. Зокрема, платформа Hyperledger Fabric [6] забезпечує модульність, розмежування доступу через MSP (Membership Service Provider) та реалізацію смарт-контрактів (chaincode).

Проте інтеграція блокчейн-рівня як інфраструктури довіри для ML-процесів (provenance, audit trail, integrity of updates, governance) залишається недостатньо формалізованою – немає загальноприйнятих єдиних моделей, стандартних схем/метаданих, еталонних протоколів і метрик оцінювання.

Оглядові статті прямо фіксують «незрілість» і фрагментацію підходів. Зокрема, огляд arXiv з конвергенції ML і blockchain має окремий розділ «Limitations and Future Research Directions» і описує, що наявні рішення мають суттєві обмеження (інсентиви, приватність, вартість/дизайн протоколів/маркетплейсів, складність моделей тощо), а також потребують подальших досліджень. Це типовий індикатор відсутності усталеної формалізації (коли область вже «закрита» стандартами/референс-архітектурами, такі розділи значно коротші й менш фундаментальні). Додатково, у більш сучасних роботах часто підкреслюється, що значна частина підходів – концептуальні рамки або прототипи, а не стандартизована практика. Наприклад, у статті з експериментами на Hyperledger Fabric прямо сказано, що робота є лише мотивацією для майбутнього створення «comprehensive framework». Це фактично

визнання, що «повної» узгодженої формалізації ще немає.

Дисбаланс напрямів досліджень: «ML для blockchain» переважає над «blockchain як довіра для ML». Огляд у ScienceDirect (2025) фіксує, що більшість робіт зосереджена на застосуванні ML для задач blockchain (безпека, оптимізація, вразливості), тоді як менше досліджень розглядає blockchain як механізм, що підсилює ML (тобто як «trust infrastructure»). Такий дисбаланс означає: напрям «blockchain → довіра в ML» ще не став настільки зрілим, щоб сформувати стандартні патерни/формальні моделі.

У прикладних роботах з provenance/audit звучить «framework/proposal», а не «standard». Нові праці про верифіковану provenance моделей/даних через блокчейн (AI supply chain, model provenance, audit trails) зазвичай описують «conceptual implementation framework / proposed integrated framework» – тобто авторські архітектури, які не є загальноприйнятою специфікацією. Це знову ж свідчення недостатньої формалізації рівня «як саме робити правильно».

Стандарти/фрейми з AI-управління ризиками вимагають provenance та accountability, але не дають формальної «blockchain-специфікації». Наприклад, NIST AI Risk Management Framework задає рамку управління ризиками й довірою в AI (governance, вимірювання/моніторинг, прозорість, документація тощо), але не стандартизує блокчейн як «референс-рівень довіри» для ML і не визначає формальний протокол/модель даних «blockchain-for-ML-provenance». Це означає: потреба в довірі формалізується на рівні вимог, але спосіб реалізації через блокчейн – ні.

Повторюваний набір «невирішених» технічних суперечностей є ознакою відсутності єдиної формальної моделі. У працях про blockchain-аудит FL та суміжні підходи типово підкреслюються компроміси масштабованість/вартість ↔ повнота логування, приватність ↔ прозорість, on-chain ↔ off-chain, управління ключами, політики доступу тощо. Коли ці компроміси не «закриті» стандартом, виникає багато несумісних реалізацій (а це і є недостатня формалізація).

Як підсумок, можна стверджувати, що інші публікації на дану тематику системно перелічують обмеження й future work, прикладні статті говорять мовою «proposed framework» і «motivation for future comprehensive framework»

(зокрема на Hyperledger Fabric), досліджень «blockchain як trust для ML» менше, а стандарти AI-ризиків формалізують вимоги до довіри, але не дають формальної блокчейн-специфікації для ML-процесів.

Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання.

Метою роботи є дослідження можливості розробки моделі інформаційної технології для інтеграції блокчейн-технології Hyperledger Fabric та ML-моделей для управління фінансовими ризиками з урахуванням вимог українського регуляторного середовища.

Необхідність розробки моделі інформаційної технології інтеграції Hyperledger Fabric та ML-моделей обумовлена зростанням регуляторних вимог до управління ризиками, потребою забезпечення незмінності та автентичності даних, необхідністю аудиторської простежуваності алгоритмічних рішень, відсутністю стандартизованих архітектур у вітчизняній науковій практиці.

Виклад основного матеріалу дослідження. У дослідженні використано: нормативні документи НБУ [11] щодо управління ризиками та фінансового моніторингу; архітектурні специфікації Hyperledger Fabric [6] (версія 2.x); створено та застосовано синтетичний транзакційний датасет обсягом 100 000 записів; ML-бібліотеки Python (XGBoost [2], Scikit-learn). Датасет містив: ідентифікатор клієнта; суму транзакції; частоту операцій; історію дефолтів; мітку класу (0 – нормальна операція, 1 – ризикова).

Простір даних і позначення:

- $\mathcal{X} \subset \mathbb{R}^m$ – простір ознак транзакцій;
- $\mathcal{Y} = \{0,1\}$ – простір міток ризику (0 – нормальна операція, 1 – ризикова);
- $D = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n$ – навчальна вибірка, де $x_i \in \mathcal{X}$, $y_i \in \mathcal{Y}$;
- $x \in \mathcal{X}$ – довільна нова транзакція;
- $t \in \mathbb{R}_+$ – час (timestamp);
- $\theta \in \Theta$ – вектор параметрів ML-моделі.

Транзакція визначається як кортеж: $\tau = (x, t, "id")$, де "id" – унікальний ідентифікатор транзакції. ML-модель оцінювання ризику визначається як вимірна функція: $f_{\theta}: \mathcal{X} \rightarrow [0,1]$, яка повертає умовну ймовірність ризикової події:

$$R(x) = f_{\theta}(x) = P(Y = 1 | X = x). \quad (1)$$

Архітектура інтегрованої системи складається з трьох рівнів: Data Layer – транзакції зберігаються в Hyperledger Fabric [6], яка має каналну архітектуру, endorsement policy, приватні колекції даних для AML; Analytics Layer – ML-моделі виконують скоринг; Governance Layer – фіксація рішень у блокчейні [5] через chaincode.

Оцінювання ефективності запропонованої інтегрованої архітектури проводилось у форматі експериментального моделювання на основі анонімізованої вибірки історичних показників реалізації банківських IT-проектів та згенерованих сценаріїв ризикових подій.

Дослідження не передбачало впровадження у конкретній фінансовій установі, а базувалося на порівнянні двох моделей функціонування системи управління ризиками: базова модель (традиційна централізована архітектура без ML та без блокчейн) та інтегрована модель (ML-прогнозування + фіксація критичних подій у Hyperledger Fabric).

Метод оцінювання. Для оцінки ефекту застосовано такі підходи: порівняння часу реакції на ризикові події; моделювання впливу раннього виявлення ризиків на бюджет; розрахунок коефіцієнта зниження інформаційної асиметрії; аналіз аудиторської відтворюваності даних [1].

Інтегрований ризик визначався за формулою:

$$R_{final} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot P_i \cdot C_i \cdot T_{bc} \quad (2)$$

де T_{bc} – коефіцієнт довіри до даних блокчейн-рівня.

В межах підготовки даних було виконано нормалізацію та балансування класів методом SMOTE [9]. Порівнювались моделі Logistic Regression, Random Forest [3], XGBoost [2]. Інтеграція з блокчейн відбувалась наступним чином: через REST API результати скорингу передавались до chaincode, який формував транзакцію та записував її у блок.

Таблиця 1

Порівняння метрик ML-моделей

Модель	ROC-AUC	Precision	Recall	F1-score
Logistic Regression	0,82	0,76	0,71	0,73
Random Forest	0,89	0,83	0,80	0,81
XGBoost	0,93	0,88	0,85	0,86

Результати моделювання. Інтеграція блокчейн-рівня не вплинула на ROC-AUC, але забезпечила повну трасованість рішень, зменшила ризик маніпуляції історичними даними, підвищила аудиторську прозорість, що в свою чергу має ряд переваг: раннє виявлення ризикових сценаріїв [10] потенційно дозволяє зменшити затримки реалізації ІТ-проектів; інтеграція блокчейн-рівня підвищує аудитованість та знижує ймовірність ретроспективного редагування даних; використання ансамблевих ML-моделей [2, 3] забезпечує більш стабільну класифікацію ризикових подій порівняно з rule-based підходами.

Отримані кількісні оцінки слід розглядати як результати модельного експерименту, а не як статистику конкретного банку. Результати мають прогностичний характер та потребують подальшої емпіричної верифікації в умовах реального впровадження у фінансовій установі.

Висновки. Інтеграція Hyperledger Fabric [6] із ML-моделями створює інфраструктуру довіри для управління фінансовими ризиками. Експеримент підтвердив: високу прогностичну точність XGBoost [2]; збереження ефективності при інтеграції з блокчейн; підвищення рівня прозорості та аудиту, що в свою чергу позитивно впливає на відповідність вимогам НБУ [11]. Подальші дослідження доцільно спрямувати на впровадження Explainable AI [12] та оптимізацію продуктивності permissioned-мереж.

Література

1. Basel Committee on Banking Supervision. Principles for effective risk data aggregation and risk reporting. Basel: Bank for International Settlements, 2013.
2. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. In: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2016. P. 785–794. DOI: <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
3. Breiman L. Random Forests. Machine Learning. 2001. Vol. 45. P. 5–32. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
4. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. Cambridge: MIT Press, 2016.
5. Nakamoto S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. 2008. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3440802>
6. Androulaki E. et al. Hyperledger Fabric: A Distributed Operating System for Permissioned Blockchains. In: Proceedings of the Thirteenth

EuroSys Conference. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1145/3190508.3190538>

7. Dorri A., Steger M., Kanhere S., Jurdak R. Blockchain: A Distributed Solution to Automotive Security and Privacy. IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55(12). P. 119–125. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700879>
8. Aggarwal C. C. Outlier Analysis. 2nd ed. Cham: Springer, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-47578-3>
9. Carcillo F., Dal Pozzolo A., Bontempi G., Snoeck M. Combining Unsupervised and Supervised Learning in Credit Card Fraud Detection. Information Sciences. 2021. Vol. 557. P. 317–331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.05.042>
10. European Banking Authority. Guidelines on loan origination and monitoring. 2020.
11. National Bank of Ukraine. Regulation on Risk Management System in Banks of Ukraine. Resolution of the NBU Board No. 64, 11.06.2018.
12. Molnar C. Interpretable Machine Learning. 2022. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3718599>

Filonenko O. Yu. Integration of Blockchain Technologies and ML Models in Financial Risk Management Systems.

The article examines the feasibility of developing a model of an information technology based on the integration of the Hyperledger Fabric blockchain technology and ML models for financial risk management. The relevance of the study is driven by the growing volume of transactions in modern financial institutions, the increasing complexity of financial instruments, and the introduction of stricter regulatory requirements, which intensify the need to ensure data immutability and authenticity.

The study analyzes the characteristics of traditional centralized risk management systems, particularly their limitations in ensuring the immutability of historical data, which creates potential risks of manipulation and distortion of analytical results. Since ML models, widely used for credit scoring and fraud detection, critically depend on the quality of input data, there arises a need to address a scientific and applied problem—namely, the creation of an integrated architecture that combines blockchain-based guarantees of data immutability with the predictive power of ML models. In preparing the article, an analysis of international and domestic publications was conducted regarding the application of machine learning algorithms (logistic regression, Random Forest, XGBoost, Isolation Forest) in financial scoring, as well as the effectiveness of permissioned blockchain architectures, particularly Hyperledger Fabric.

It is substantiated that the integration of a blockchain layer as a trust infrastructure for ML processes (provenance, audit trail, integrity of updates, governance) remains insufficiently formalized. A three-layer architecture (Data Layer, Analytics Layer, Governance Layer) is proposed, along with formal

definitions of the transaction space, ML-based risk model, and the integrated risk formula.

During the study, a synthetic dataset was used, and a comparison of the performance of Logistic Regression, Random Forest, and XGBoost models was conducted. The modeling results show that the XGBoost model achieved the highest performance, while integration with blockchain did not affect predictive efficiency but ensured full traceability of decisions and improved audit transparency. The results are of a predictive nature and require further empirical validation under real-world implementation conditions in financial institutions.

Keywords: *blockchain, Hyperledger Fabric, machine learning, financial risk management, credit scoring, financial monitoring, permissioned blockchain.*

Філоненко Орест Юрійович – аспірант кафедри інформаційних технологій та програмування Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля,
<https://orcid.org/0009-0000-1480-4673>
orest.filonenko@gmail.com

Дата першого надходження статті 15.01.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.02.2026.

Дата публікації 11.05.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-301-3-50-64>

УДК 622.24:519.876

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ПОЗДОВЖНЬОГО РЕЗОНАНСУ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ ДЛЯ БУРІННЯ СКЕРОВНИХ ДІЛЯНОК СВЕРДЛОВИН

Гриджук Я.С., Чудик І.І., Слабий О.О., Кондур Т.І., Мохній І.Ю.

MATHEMATICAL MODEL FOR ESTIMATING THE LONGITUDINAL RESONANCE OF THE DRILL STRING FOR DRILLING DIRECTIONAL SECTIONS OF WELLS

Gridzhuk Ya.S., Chudyk I.I., Slabyi O.O., Kondur T.I., Mokhniy I.Yu.

Стаття присвячена актуальній проблемі забезпечення динамічної стійкості бурильних колон під час спорудження нафтових і газових свердловин зі складною просторовою траєкторією стовбура. У роботі обґрунтовано, що сучасні технології поглиблення похило-скерованих та горизонтальних ділянок супроводжуються значними силами тертя та адгезії, які спричиняють виникнення шкідливих явищ переривчастого ковзання (stick-slip) та поздовжнього тертя, що перешкоджають ефективній передачі осьового навантаження на долото. Основним методом подолання цих опорів є впровадження у склад компоновок низу бурильної колони (КНБК) гідравлічних генераторів осьових коливань (ГОК). Проте встановлено, що додаткові вібрації, які генеруються осциляторами, за певних частотних режимів можуть спровокувати виникнення поздовжнього резонансу, що призводить до критичного зростання амплітуд напружень, втомного руйнування металу та аварійних обривів інструменту. Наукова новизна дослідження полягає у розробці та теоретичному обґрунтуванні уточненої математичної моделі поздовжніх коливань саме двоступеневої бурильної колони, що враховує специфіку викривлених ділянок свердловини. Авторами застосовано апарат класичного хвильового рівняння пружного стрижня з інтеграцією параметрів в'язкого демпфування та нелінійних сил тертя Кулона. Модель описує динамічну взаємодію двох ступеней колони (верхньої частини та КНБК), що мають різні геометричні розміри та фізико-механічні властивості. Особливу увагу приділено граничним умовам на стику ступенів, де виникає концентрація напружень через відбиття та посилення хвиль. Враховано вплив зенітного кута, інтенсивності викривлення стовбура, густоти бурового розчину та

характеристик ГОК. У ході дослідження проведено моделювання для чотирьох типів компоновок, включаючи варіанти з використанням сталевих труб та титанових колюбінгових секцій. Результати аналізу амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) показали, що для коротких та жорсткіших сталевих колон резонансні піки є найбільш вираженими, тоді як у довгих колонах (понад 4000 м) спостерігається «розмиття» резонансу через високу дисипацію енергії. Встановлено, що використання легких сплавів, таких як титан, суттєво зміщує спектр власних частот вниз, що створює ризик виникнення резонансу на вищих гармоніках при високих частотах роботи осцилятора (до 20 Гц). Практичне значення роботи полягає у виведенні системи нерівностей для визначення меж зон поздовжнього резонансу. Отриманий аналітичний апарат дозволяє буровим підприємствам ще на етапі проектування розраховувати критичні частоти та обирати такі режими обертів долота і витрати промивальної рідини, які б гарантували роботу обладнання поза межами небезпечних вібрацій. Це дасть можливість підвищити експлуатаційну надійність бурильного інструменту та знизити вартість будівництва глибоких скерованих свердловин.

Ключові слова: бурильна колона, гідравлічний осцилятор, математична модель, резонанс, скерована свердловина.

Вступ. Спорудження нафтових і газових свердловин зі складною траєкторією стовбура є одним із пріоритетних напрямків розвитку сучасної видобувної галузі. Проте процес буріння таких об'єктів супроводжується

значними силами тертя та адгезії, що перешкоджають ефективній передачі осьового навантаження на долото. Явища переривчастого ковзання (*stick-slip*) призводять до нерівномірного заглиблення вибою та передчасного зносу дороговартісного бурового обладнання. Для подолання цих труднощів у складі компоновок низу бурильної колони дедалі частіше застосовуються гідравлічні генератори осьових коливань (ГОК). Впровадження таких пристроїв дозволяє суттєво знизити опір руху колони, проте водночас створює додаткові динамічні збурення в системі. Однією з найнебезпечніших загроз під час використання осциляторів є виникнення поздовжнього резонансу в елементах бурильного інструменту. Резонансні стани спричиняють критичне зростання амплітуд напружень, що веде до втомного руйнування та аварійних ситуацій. Особливої уваги потребує аналіз динаміки саме багатоступеневих колон, де на стиках секцій різної жорсткості виникає концентрація напружень. Сучасні наукові дослідження зосереджені на розробці нелінійних моделей поперечно-крутильного зв'язку та використанні методу скінченних елементів. Останнім часом активно впроваджуються методи інтеграції нейронних мереж для прогнозування складних вібраційних процесів у реальному часі. Науковцями також вивчено вплив геометричної нелінійності, надлишкового тиску газу та характеристик промивальної рідини на стабільність системи. Порівняльний аналіз труб із різних матеріалів, зокрема сталі та титану, підтверджує суттєву відмінність їхнього динамічного відгуку на збурення. Попри наявність ґрунтовних праць, питання точного визначення меж резонансних зон для викривлених ділянок свердловин залишається актуальним.

Аналіз закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій. Метою багатьох досліджень руху бурильної колони в похило-скерованих свердловинах є визначення характеристик нелінійної динамічної моделі поперечно-крутильного зв'язку. Так, за допомогою рівнянь Лагранжа автори [1] створили модель, яка враховує контакт колони зі стінкою свердловини, дисипацію крутного моменту та складну траєкторію стовбура. Результати моделювання свідчать, що втрати на тертя зростають зі збільшенням кута нахилу свердловини, водночас амплітуда поперечних переміщень компоновки низу бурильної колони (КНБК) зменшується. Доведено, що при кутах

нахилу понад 25° значно посилюються явища переривчастого ковзання (*stick-slip*) та частішають зіткнення інструменту з нижньою стінкою свердловини. На основі проведеного аналізу запропоновано оптимальні режими буріння, включаючи обмеження швидкості обертання та осьового навантаження, для запобігання пошкодженню обладнання.

Набуває популярності моделювання динаміки бурильних колон як ключових елементів систем автоматизації процесу буріння нафтових і газових свердловин. Авторами [2] визначено амплітудно-фазові частотні функції бурильної колони для поступального руху при використанні гідравлічних вибійних двигунів, враховуючи зміну глибини свердловини. У роботі запропоновано застосування енергоінформаційного підходу, що базується на синергетичній теорії інформації, для аналізу динамічних режимів поглиблення свердловин. Досліджено вплив ступеня узгодженості параметрів колони та ланки «долото–порода» на стабільність системи, а також виділено п'ять характерних режимів роботи – від рівноважного до хаотичного. Отримані висновки дозволяють оптимізувати математичне забезпечення автоматизованих систем управління через адаптацію до реальних умов буріння.

Результати дослідження поздовжніх вібрацій бурильної колони для глибоких свердловин за допомогою методу тривимірних динамічних скінченних елементів отримані у статті [3]. Автори розробили механічну модель, яка охоплює всю бурильну колону від гирла до вибою, враховуючи вплив наземних конструкцій та кривизну стовбура свердловини. У роботі запропоновано формулу розрахунку граничного втомного напруження, що дозволяє кількісно оцінювати та прогнозувати міцність бурильного інструменту. На основі аналізу свердловини S-7 виявлено критичні режими резонансу та визначено ділянки найбільшого ризику виникнення втомних поломок. Практичні рекомендації включають зміну швидкості обертання та навантаження на долото як ефективні заходи для зниження вібрацій та запобігання руйнуванню обладнання.

Стаття [4] присвячена комплексному аналізу поздовжніх, крутильних та згинних вібрацій бурильної колони, що виникають під час заглиблення вибою. Авторами представлено математичні моделі у вигляді стрижня з розподіленими параметрами та відповідними граничними умовами для опису пружних коливань системи. У роботі обґрунтовано

можливість використання віброшвидкості як універсального показника для оцінки міцності та надійності труб бурильної колони. Досліджено вплив взаємодії долота з породою на виникнення динамічних навантажень та втомних руйнувань елементів компоновки низу бурильної колони. Отримані теоретичні рівняння дозволяють визначати максимальні напруження в точках колони без складних експериментальних досліджень, що сприяє оптимізації режимів буріння.

Є ряд наукових праць присвячених удосконаленню динамічного аналізу вібрацій бурильної колони за допомогою інтеграції нейронних мереж у традиційні математичні моделі. Зокрема, авторами [5] запропоновано гібридний підхід, який дозволяє більш точно прогнозувати складні нелінійні коливання, що виникають під час процесу буріння. Дослідження базується на поєднанні фізичних законів механіки з обчислювальною потужністю моделей глибокого навчання для обробки великих масивів даних. Результати демонструють значне підвищення точності ідентифікації резонансних станів та небезпечних вібраційних режимів порівняно з класичними методами. Практична цінність роботи полягає у можливості запобігання аваріям та подовженні терміну експлуатації бурового обладнання завдяки моніторингу в реальному часі.

Проведено низку досліджень резонансних режимів бурильної колони в нелінійній динаміці під впливом змінного осьового навантаження. Авторами [6] змоделивали бурильну колону як обертовий пружний стрижень з шарнірними опорами, враховуючи скінченні деформації та початкову кривизну. За допомогою методу Гальоркіна та методу гармонійного балансу було визначено амплітудно-частотні характеристики вібрацій на основних та вищих частотах. Чисельний аналіз показав, що геометрична нелінійність та зміна довжини колони суттєво впливають на зміщення резонансних кривих та стабільність системи. Результати дослідження містять рекомендації щодо вибору оптимальних параметрів бурильних колон для уникнення небезпечних коливальних режимів у реальних умовах експлуатації.

Проблемними питаннями нелінійного впливу надлишкового тиску на резонансні режими поперечних коливань бурильної колони займалися науковці [7]. Ними розроблено математичну модель на основі нелінійної теорії

пружності Новожилова, що враховує відцентрові сили, осьове стиснення та початкову кривизну інструменту. За допомогою методів Бубнова-Гальоркіна та гармонійного балансу було отримано амплітудно-частотні характеристики для основної частоти та вищих гармонік. Чисельний аналіз показав, що надзвуковий потік зміщує резонансні криві вгору, а збільшення довжини колони призводить до нестабільності в низькочастотній області. Результати дослідження мають практичне значення для підвищення ефективності буріння з використанням газу та запобігання аварійним ситуаціям через резонанс.

У статті [8] досліджуються фрикційні характеристики бурильної колони з використанням методу скінченних елементів. Авторами розробили динамічну математичну модель та застосували вдосконалений метод Generalized- α для аналізу впливу навантаження на долото, швидкості обертання та кривизни стовбура на сили тертя. Результати показали, що збільшення ваги на долото та швидкості обертання призводить до розширення діапазону бічних рухів та зростання моменту тертя. Встановлено, що опір тертя є значно вищим у горизонтальних секціях порівняно з вертикальними, а сили тертя при підйомі інструменту менші, ніж при його спуску. Дослідження надає важливі теоретичні рекомендації щодо оптимізації параметрів буріння для зменшення зносу обладнання та запобігання прихопленням у складних свердловинах.

Проведено ряд досліджень модальних характеристик поздовжніх, поперечних та крутильних коливань бурильної колони для умов сумішеного буріння. Авторами [9] розроблено математичну модель на основі методу скінченних елементів, представивши бурильну колону як однорідний пружний стрижень для аналізу власних частот. Дослідження показало, що зі збільшенням довжини колони власні частоти всіх типів вібрацій зменшуються, а інтервали між ними скорочуються, що підвищує ризик виникнення резонансу. Встановлено, що поперечні вібрації мають найменший діапазон частот, через що їх найважче уникнути шляхом регулювання швидкості обертання. Отримані результати є науковим підґрунтям для оптимізації проектування бурильних колон та підвищення якості стовбура свердловини.

У роботі [10] представлено результати аналізу гармонійного відгуку та модальних

характеристик поздовжніх коливань бурильної колони для глибоких свердловин з використанням програмного комплексу ANSYS). Автори розробили скінченно-елементну модель, яка враховує складні умови роботи обладнання, включаючи жорсткість сталевих канатів та вплив бурового розчину. Дослідження показало, що власні частоти поздовжніх вібрацій закономірно знижуються зі збільшенням глибини свердловини, що створює передумови для виникнення резонансу при певних швидкостях обертання. Встановлено, що при глибині 5000 метрів критичні амплітуди зміщення спостерігаються у верхній та середній частинах колони, що може призводити до передчасного втомного руйнування бурильного інструменту. Отримані дані дозволяють оптимізувати параметри буріння та конструкцію компоновок нижньої частини колони для мінімізації аварійних ситуацій на великих глибинах.

Для ефективного буріння похило-скерованих свердловин розроблено методику визначення оптимального місця встановлення генератора осьових коливань (ГОК) у бурильній колоні. Авторами [11] розроблено імітаційні моделі мовою Modelica та програму на Python для автоматизації обчислень, що дозволяє оцінювати зниження сил тертя залежно від розташування пристрою. За результатами динамічного моделювання встановлено, що вибір позиції ГОК суттєво впливає на ефективність передачі осьового зусилля до долота та мінімізацію опору рухові колони.

Робота [12] присвячена розробці математичної моделі визначення сил контактної взаємодії та тертя бурильної колони об стінки свердловини в складних гірничо-геологічних умовах. Автори провели порівняльний аналіз деформованого стану труб із різних матеріалів (сталі, титану та алюмінію) і встановили, що сталеві труби створюють значно більше тертя, ніж легкосплавні. Чисельне моделювання показало, що використання алюмінієвих секцій підвищує гнучкість системи в 1,1–1,8 рази, що дозволяє збільшити швидкість обертання долота без ризику пошкодження інструменту. Результати дослідження дають практичні рекомендації щодо раціонального розміщення труб у компонованні для зниження енерговитрат та підвищення ефективності буріння глибоких похило-скерованих свердловин.

На основі модифікованої моделі стрижня Кірхгофа з урахуванням осьової деформації розроблено уточнену математичну модель

просторового напружено-деформованого стану бурильної колони на похилій ділянці свердловини. Автори [13] врахували комплекс силових факторів, включаючи контактну взаємодію зі стінкою свердловини, сили тертя та вплив потоку промивальної рідини, що дозволило створити адекватну імітаційну модель у середовищі Modelica. Результати моделювання підтвердили виникнення динамічних коливань кутової швидкості та крутного моменту в різних перерізах колони, що є критично важливим для ефективного планування та безпечного проведення бурових робіт.

У статті [14] запропоновано аналітичний підходи до оцінки інерційних параметрів викривлених секцій бурильної колони, що обертаються, з урахуванням параметрів їхньої просторової деформації. Для дослідження використано математичні моделі із зосередженими та розподіленими масами, що дозволило встановити точні та асимптотичні залежності для визначення інерційних характеристик інструменту. Результати роботи мають практичне значення для аналізу динамічного опору бурильних колон, оцінки енерговитрат на обертання та прогнозування критичних швидкостей у процесі спорудження свердловин. Розроблений аналітичний апарат сприяє вдосконаленню розрахунків напружено-деформованого стану елементів колони, що працюють у складних геометричних умовах викривлених стовбурів.

Дослідження [15] присвячене вивченню динаміки ударного бурового інструменту для розробки твердих порід з акцентом на аналізі осьових вібрацій бурильної колони. Автори розробили механічну модель, яка дозволяє оцінити вплив цих вібрацій на енергію удару та ефективність руйнування гірської породи в умовах глибокого залягання. Результати моделювання демонструють, що амплітуда та частота осьових коливань критично впливають на стабільність роботи ударного механізму та швидкість проходки свердловини. Робота закладає теоретичну основу для оптимізації параметрів буріння геотермальних свердловин, забезпечуючи підвищення надійності обладнання при видобутку відновлюваної енергії.

Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання. Метою роботи є розробка та обґрунтування математичної моделі для оцінки поздовжнього резонансу двоступеневої бурильної колони під час буріння

скерованих ділянок свердловин. Це дозволить прогнозувати критичні частоти та обирати безпечні режими роботи глибинного бурового обладнання для запобігання аварійним поломкам інструменту..

Виклад основного матеріалу. У відповідності із прийнятими і описаними у [16] положеннями, проведемо комплексний аналіз параметрів, які необхідні для побудови математичної моделі двоступеневої бурильної колони для буріння скерованих ділянок свердловин. Перший блок параметрів – це геометричні та фізико-механічні параметри колони. Оскільки бурильна колона двоступенева, ці дані потрібні окремо для кожного ступеня (верхньої частини та нижньої компоновки – КНБК): довжина ступеней, або ж їх протяжність вздовж осі свердловини; зовнішній та внутрішній діаметри поперечних перерізів ступеней для розрахунку площі перерізу та моменту інерції; механічні властивості матеріалів ступеней колони: Модуль Юнга, модуль зсуву, густина; коефіцієнти жорсткості та демпфування. Другий блок вхідних даних - це параметри свердловини та середовища. Ці дані визначають зовнішні сили, що діють на колону: профіль свердловини: зенітний кут та азимут, що критично важливо для скерованого буріння, оскільки вони визначають силу притискання колони до стінки; густина (вязкість) бурового розчину; коефіцієнт тертя бурильної колони об стінку свердловини (статичний та динамічний); гідравлічний опір, втрати тиску в колоні та затрубному просторі. Третій блок вхідних даних - це параметри гідравлічного осцилятора – джерела додаткового динамічного збурення: частота коливань зазвичай залежить від витрати бурового розчину; амплітуда збурюючої сили; значення поздовжньої сили, яку генерує клапанний механізм; закон зміни сили, зазвичай це гармонічна функція; місце встановлення - відстань від долота, де інтегрований осцилятор. Четвертий блок вхідних даних - це граничні умови та взаємодія з вибоєм. Сюди слід віднести такі параметри: осьове навантаження на долото P , яке враховується як статична стискаюча сила; реактивний момент на вибої (момент опору) M_o , що виникає при руйнуванні гірської породи; коефіцієнт жорсткості вибою при контакті з долотом.

Математична модель руху ступеней бурильної колони описується класичним хвильовим рівнянням пружного стержня з урахуванням демпфування:

$$E_i F_i \frac{\partial^2 u_i(s, t)}{\partial t^2} - \mu_i \frac{\partial u_i(s, t)}{\partial t} = \rho_i F_i \frac{\partial^2 u_i(s, t)}{\partial s_i^2}, \quad (1)$$

де $u_i(s, t)$ – зміщення поперечного i -го перерізу стержня з координатою s момент часу t ; $E_i F_i$ – модуль Юнга і площа поперечного i -го перерізу стержня відповідно; μ – коефіцієнт дисипації, який характеризує в'язкий опір середовища, який пропорційний швидкості відносного зміщення; ρ_i – густина матеріалу i -го перерізу стержня.

Рівняння (1) є математичною моделлю того, як поздовжня хвиля (стиснення та розтягування) поширюється вздовж стержня і поступово затихає через зовнішнє тертя. Рівність нулю у правій частині говорить про те, що розглядаються вільні коливання (без дії зовнішніх сил, що обурюють)

Математична модель проведення скерованого буріння передбачає визначення сил притискання і сил тертя. У викривлених ділянках виникає нормальна сила притискання, яка створює силу тертя Кулона. Коефіцієнт демпфування при цьому стає нелінійним:

$$F_{mp} = f_{mp} N(x) \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (2)$$

де f_{mp} – коефіцієнт тертя; $N(x)$ – сила притискання бурильної колони до стінок свердловини, яка залежить від зенітного кута та інтенсивності викривлення;

$$N(x) = \sqrt{(q \sin \alpha + T \xi)^2 + (T \xi \sin \alpha)^2} \quad (3)$$

Де q – вага одиниці довжини труби; T – осьове зусилля; α – зенітний кут; ξ – інтенсивність викривлення.

У випадку, коли сили опору є досить великими виникає необхідність у застосуванні гідравлічного осцилятора коливань (ГОК), математична модель якого може бути представлена часовою закономірністю зміни збурюючої сили:

$$F_{ocq}(t) = \Delta p_{\max} F_n \cdot \sin(2\pi \nu \cdot t) \quad (4)$$

де $\Delta p_{\max}$ – максимальне значення перепаду тиску; F_n – площа поршня осцилятора; ν – частота роботи осцилятора, яка зазвичай прямо пропорційна витраті бурового розчину; $\nu = kQ$; k – конструктивний параметр осцилятора; Q – подача бурового розчину.

Для побудови розрахункової схеми математичної моделі поздовжніх коливань двоступеневої бурильної колони задаємося рядом геометричних, кінематичних, динамічних та конструктивних параметрів як бурильної колони, так і середовища свердловини, які безпосередньо впливають на її роботу у скерованій свердловині. До геометричних параметрів віднесемо: F_1, F_2 – відповідно площі поперечних перерізів першої і другої ступеней відповідно; l_1, l_2 – довжина першої і другої ступеней відповідно; $L \approx l_1 + l_2$ – загальна довжина бурильної колони (свердловини); α – зенітний кут. Введемо ключові кінематичні параметри: $u_1(s_1, t)$, $u_2(s_2, t)$ – осьові зміщення поперечних перерізів першої і другої ступеней колони відповідно; S_1, S_2 – осьові координати поперечних перерізів першої і другої ступеней колони відповідно. До динамічних параметрів віднесемо: μ_1, μ_2 – коефіцієнти дисипації на першій і другій ступенях відповідно; χ_1, χ_2 – швидкості поширення поздовжніх збурень уздовж бурильної колони відповідно на першій і другій ступенях відповідно; g – прискорення вільного падіння; E_1, E_2 – модуль Юнга матеріалів першої і другої ступеней відповідно.

У відповідності до складеної розрахункової схеми (рис. 1) запишемо диференціальні рівняння поздовжніх переміщень поперечних перерізів бурильної колони:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} + \mu_1 \frac{\partial u_1}{\partial t} - \chi_1^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial s_1^2} = g \cos \alpha, & s_1 \in [0, l_1], \\ \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} + \mu_2 \frac{\partial u_2}{\partial t} - \chi_2^2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial s_2^2} = g \cos \alpha, & s_2 \in [0, l_2] \end{cases} \quad (5)$$

Надалі, зважаючи на умови розташування та контактування ступеней БК, граничні умови до системи (5) запишемо наступним чином:

$$\begin{cases} (s_1 = 0): \frac{\partial u_1}{\partial s_1} = \frac{cu_1}{E_1 F_1}; \\ (s_1 = l_1, s_2 = 0): u_1 = u_2, \frac{\partial u_1}{\partial s_1} E_1 F_1 = \frac{\partial u_2}{\partial s_2} E_2 F_2; \\ (s_2 = l_2): \frac{\partial u_2}{\partial s_2} = -\frac{P}{E_2 F_2}. \end{cases} \quad (6)$$

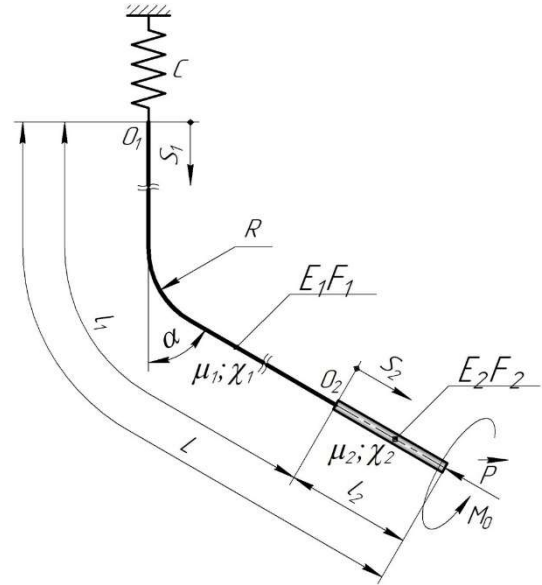


Рис. 1. Розрахункова схема для дослідження поздовжніх коливань двоступеневої бурильної колони при бурінні скерованої свердловини

Змодельюємо положення бурильного інструменту, коли вона перебуває в стані спокою, а на долото зі сторони вибою діє осьове навантаження $P = P_0 = \text{const}$. У цьому випадку коли пара кінематичних параметрів $u_1(s_1; t)$ та $u_2(s_2; t)$ не залежить від часу, а є функціями лише величин s_1 і s_2 . Позначивши $u_1 = u_{01}(s_1)$, $u_2 = u_{02}(s_2)$ і враховуючи рівність нулю всіх часткових похідних по часу t , перепишемо рівняння (1) у наступному вигляді:

$$\begin{cases} u_{01}''(s_1) = -\frac{g \cos \alpha}{\chi_1^2}, & s_1 \in [0, l_1]; \\ u_{02}''(s_2) = -\frac{g \cos \alpha}{\chi_2^2}, & s_2 \in [0, l_2]. \end{cases} \quad (7)$$

Граничні умови:

$$\begin{cases} (s_1 = 0): E_1 F_1 u_{01} = c u_{01}; \\ (s_1 = l_1, s_2 = 0): u_{01} = u_{02}, E_1 F_1 u_{01} = E_2 F_2 u_{02}; \\ (s_2 = l_2): E_2 F_2 u_{02} = -P_0. \end{cases} \quad (8)$$

Розв'язок системи (6) з урахуванням граничних умов (7) буде наступним:

$$\begin{cases} u_{01}(s_1) = \left[\frac{g \cos \alpha l_1}{\chi_1^2} + \theta \left(\frac{g \cos \alpha l_2}{\chi_2^2} - \frac{P_0}{E_2 F_2} \right) \right] \times \\ \times \left(\frac{1}{h} + s_1 \right) - \frac{g \cos \alpha s_1^2}{2 \chi_1^2}, \quad s_1 \in [0, l_1], \\ u_{02}(s_2) = \left(\frac{1}{h} + \frac{l_1}{2} \right) \frac{g \cos \alpha l_1}{\chi_1^2} + \left(\frac{g \cos \alpha l_2}{\chi_2^2} - \frac{P_0}{E_2 F_2} \right) \times \\ \times \left[\theta \left(\frac{l_1}{h} + l_1 \right) + s_2 \right] - \frac{g \cos \alpha s_2^2}{2 \chi_2^2}, \quad s_2 \in [0, l_2]. \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{де, } h = \frac{c}{E_1 F_1}, \quad \theta = \frac{E_2 F_2}{E_1 F_1}.$$

Надалі подамо шукані функції у наступному вигляді:

$$\begin{cases} u_1(s_1, t) = u_{01}(s_1) + U_1(s_1, t); \\ u_2(s_2, t) = u_{02}(s_2) + U_2(s_2, t) \end{cases} \quad (10)$$

де $U_1(s_1, t)$, $U_2(s_2, t)$ – функції, що характеризують ступінь зміщення перерізів ступеней бурильної колони від їх положень у стані спокою.

Після врахування останніх виразів у (5) і (6), отримаємо наступну систему рівнянь та граничні умови:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2} + \mu_1 \frac{\partial U_1}{\partial t} = \chi_1^2 \frac{\partial^2 U_1}{\partial s_1^2}, \quad s_1 \in [0, l_1], \\ \frac{\partial^2 U_2}{\partial t^2} + \mu_2 \frac{\partial U_2}{\partial t} = \chi_2^2 \frac{\partial^2 U_2}{\partial s_2^2}, \quad s_2 \in [0, l_2]. \end{cases} \quad (11)$$

Граничні умови:

$$\begin{cases} (s_1 = 0): \frac{\partial U_1}{\partial s_1} = h U_1, h = \frac{c}{E_1 F_1}; \\ (s_1 = l_1, s_2 = 0): U_1 = U_2, \frac{\partial U_1}{\partial s_1} = \theta \frac{\partial U_2}{\partial s_2}, \\ \theta = \frac{E_1 F_2}{E_2 F_1}; \\ (s_2 = l_2): \frac{\partial U_2}{\partial s_2} = -P_v. \end{cases} \quad (12)$$

де $P_v = P - P_0$ – відхилення осьового навантаження відносно $P_0 = \text{const}$, причому

$$P_v(t + T_0) = P_v(t), \quad (13)$$

T_0 – час пульсації осьового навантаження на вибої, який практично рівний періоду як поздовжніх, так і крутильних автоколивань, що виникають через неоднорідність вибою свердловини.

Відомо, що вплив зовнішньої гармонійної сили на пружну систему формує в останньої гармонійні коливання із частотою збурюючої сили. Амплітуда й частота таких коливань повністю визначаються механічними властивостями коливної системи й амплітудою і частотою збурюючої сили. Саме цей вид коливань представляє інтерес в плані дослідження резонансу механічної системи та його параметрів (рис. 1). З теорії коливань механічних систем відомо, що значення резонансних частот дуже близькі до власних частот вільних коливань. Також відомо, що навіть порівняно значні дисипативні сили незначно впливають на власні частоти коливань цих систем [1, 2 та ін.]. Тому з метою спрощення досліджень, що, однак, практично не позначиться на кінцевих результатах, приймаємо коефіцієнти дисипації коливань на першій і другій ступенях нульовими: $\mu_1 = \mu_2 = 0$.

Надалі звернемося до принципу вільного підвішування бурильної колони, як двохрозмірного стержня [1, 3] і застосуємо його для рішення поставленого завдання. Вважаючи закріплення вгорі стрижня пружним (рис. 1), прийнявши осьове навантаження рівним нулю, систему (11) перепишемо у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2} = \chi_1^2 \frac{\partial^2 U_1}{\partial s_1^2}, \quad s_1 \in [0, l_1]; \\ \frac{\partial^2 U_2}{\partial t^2} = \chi_2^2 \frac{\partial^2 U_2}{\partial s_2^2}, \quad s_2 \in [0, l_2]. \end{cases} \quad (14)$$

Граничні умови:

$$\begin{cases} (s_1 = 0): \frac{\partial U_1}{\partial s_1} = h U_1, h = \frac{c}{E_1 F_1}; \\ (s_1 = l_1, s_2 = 0): U_1 = U_2, \frac{\partial U_1}{\partial s_1} = \theta \frac{\partial U_2}{\partial s_2}; \\ (s_2 = l_2): \frac{\partial U_2}{\partial s_2} = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Для визначення власних частот поздовжніх коливань у системі (14) зробимо заміну змінних і перейдемо до безрозмірних параметрів:

$$\tau_1 = \frac{\chi_1}{l_1} t, \tau_2 = \frac{\chi_2}{l_2} t, \xi_1 = \frac{s_1}{l_1}, \xi_2 = \frac{s_2}{l_2}. \quad (16)$$

У обраних змінних завдання (14) приймає наступний вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 U_1}{\partial \tau_1^2} = \frac{\partial^2 U_1}{\partial \xi_1^2}, \\ \frac{\partial^2 U_2}{\partial \tau_2^2} = \frac{\partial^2 U_2}{\partial \xi_2^2} \end{cases} \quad (17)$$

Граничні умови:

$$\begin{cases} (\xi_1 = 0): \frac{\partial U_1}{\partial \xi_1} = h_0 U_1, h_0 = h l_1 = \frac{c l_1}{E_1 F_1}; \\ (\xi_1 = 1, \xi_2 = 0): U_1 = U_2, \frac{\partial U_1}{\partial \xi_1} = \theta^* \frac{\partial U_2}{\partial \xi_2}, \\ \theta^* = \theta \frac{l_1}{l_2}; \\ (\xi_2 = 1): \frac{\partial U_2}{\partial \xi_2} = 0. \end{cases} \quad (18)$$

Розв'язок системи (17) шукаємо у вигляді:

$$\begin{cases} U_1(\xi_1, \tau_1) = A_1(\xi_1) e^{j \omega_1 \tau_1}; \\ U_2(\xi_2, \tau_2) = A_2(\xi_2) e^{j \omega_2 \tau_2}, \end{cases} \quad (19)$$

де $j = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця, ω_1, ω_2 – безрозмірні постійні параметри. Після підстановки (19) в (17) одержуємо звичайні диференціальні рівняння:

$$\begin{cases} A_1''(\xi_1) + \omega_1^2 A_1(\xi_1) = 0, \\ A_2''(\xi_2) + \omega_2^2 A_2(\xi_2) = 0. \end{cases} \quad (20)$$

Граничні умови:

$$\begin{cases} \xi_1 = 0: A_1(0) = h_0 A_1(0); \\ \xi_1 = 1, \xi_2 = 0: A_1(1) e^{j \omega_1 \tau_1} = A_2(0) e^{j \omega_2 \tau_2}, \\ A_1(1) e^{j \omega_1 \tau_1} = \theta^* A_2(0) e^{j \omega_2 \tau_2}; \\ \xi_2 = 1: A_2(1) = 0. \end{cases} \quad (21)$$

Оскільки граничний переріз між ступенями колони коливається з однаковими параметрами, тому повинна виконуватися наступна умова:

$$\omega_1 \tau_1 = \omega_2 \tau_2. \quad (22)$$

Підставивши сюди значення τ_1 , і τ_2 , скоротивши на час t , одержимо:

$$\omega_1 \frac{\chi_1}{l_1} = \omega_2 \frac{\chi_2}{l_2} = \Omega. \quad (23)$$

де Ω – кругова частота.

З врахуванням (22) гранична умова на стику між ступенями бурильної колони (друга гранична умова) запишеться у формі:

$$\begin{cases} A_1(1) = A_2(0), \\ A_1(1) = \theta^* A_2(0). \end{cases} \quad (24)$$

Рішення рівнянь (20) мають вигляд:

$$\begin{cases} A_1(\xi_1) = C_{1,1} \sin \omega_1 \xi_1 + C_{2,1} \cos \omega_1 \xi_1; \\ A_2(\xi_2) = C_{1,2} \sin \omega_2 \xi_2 + C_{2,2} \cos \omega_2 \xi_2, \end{cases} \quad (25)$$

де $C_{1,1}, C_{2,1}, C_{1,2}, C_{2,2}$ – постійні інтегрування.

Продиференціюємо $(A_1(\xi_1), A_2(\xi_2))$ по часу, отримаємо:

$$\begin{cases} A_1'(\xi_1) = \omega_1 (C_{1,1} \cos \omega_1 \xi_1 - C_{2,1} \sin \omega_1 \xi_1), \\ A_2'(\xi_2) = \omega_2 (C_{1,2} \cos \omega_2 \xi_2 - C_{2,2} \sin \omega_2 \xi_2). \end{cases} \quad (26)$$

Звернемося до системи (24) і запишемо граничну умову на стику двох по-різному різних ступеней:

$$\begin{cases} A_1(1) = C_{1,1} \sin \omega_1 + C_{2,1} \cos \omega_1, \\ A_2(0) = C_{2,2}, \\ A_1'(1) = \omega_1 (C_{1,1} \cos \omega_1 - C_{2,1} \sin \omega_1), \\ A_2'(0) = \omega_2 C_{1,2}. \end{cases} \quad (27)$$

З урахуванням рівностей (27) співвідношення (24) запишемо наступним чином:

$$\begin{cases} C_{1,1} \sin \omega_1 + C_{2,1} \cos \omega_1 = C_{2,2}; \\ C_{1,1} \cos \omega_1 - C_{2,1} \sin \omega_1 = \eta C_{1,2}, \end{cases} \quad (28)$$

де $\eta = \frac{\omega_2}{\omega_1} \theta^*$.

Беручи до уваги (23), коефіцієнт η можна виразити через коефіцієнт відбиття k_n [189,194] наступною залежністю:

$$\eta = \frac{1 - k_n}{1 + k_n}, \quad k_n = \frac{\chi_2 E_1 F_1 - \chi_1 E_2 F_2}{\chi_2 E_1 F_1 + \chi_1 E_2 F_2}. \quad (29)$$

Знайдемо з (28) $C_{1,1}, C_{2,1}$, і розглянемо їхнє відношення:

$$\frac{C_{1,1}}{C_{2,1}} = \frac{C_{2,2} \sin \omega_1 + \eta C_{1,2} \cos \omega_1}{C_{2,2} \cos \omega_1 - \eta C_{1,2} \sin \omega_1}. \quad (30)$$

Надалі вираз (30) перетворимо до наступного виду:

$$\frac{C_{1,1}}{C_{2,1}} = \frac{\operatorname{tg} \omega_1 + \eta \frac{C_{1,2}}{C_{2,2}}}{1 - \operatorname{tg} \omega_1 \eta \frac{C_{1,2}}{C_{2,2}}}. \quad (31)$$

Після цього записане співвідношення (31) можна представити так:

$$\begin{cases} \frac{C_{1,1}}{C_{2,1}} = \operatorname{tg}(\omega_1 + \psi_1), \\ \psi_1 = \operatorname{arctg} \left(\eta \frac{C_{1,2}}{C_{2,2}} \right). \end{cases} \quad (32)$$

Далі з урахуванням співвідношень (25) і (26) із граничних умов 3 і 1 (21) одержуємо:

$$\frac{C_{1,2}}{C_{2,2}} = \operatorname{tg} \omega_2, \quad (33)$$

$$\frac{C_{1,1}}{C_{2,1}} = \frac{h_0}{\omega_1}. \quad (34)$$

Тепер, спільно розв'язуючи рівняння (32) і (34), отримаємо:

$$\operatorname{tg}(\omega_1 + \psi_1) = \frac{h_0}{\omega_1}, \quad (34)$$

Звідки

$$\omega_1 + \psi_1 = m\pi + \operatorname{arctg} \frac{h_0}{\omega_1}, \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (35)$$

де

$$\psi_1 = \operatorname{arctg}(\eta \operatorname{tg} \psi_2). \quad (36)$$

Безрозмірні частоти ω_1, ω_2 виражаються через резонансну частоту Ω :

$$\omega_1 = \frac{l_1}{\chi_1} \Omega, \quad \omega_2 = \frac{l_2}{\chi_2} \Omega. \quad (37)$$

Виразивши ω_1, ω_2 через Ω за залежністю (23) і підставивши їх в (35), отримаємо рівняння для визначення частот поздовжнього резонансу.

Тепер перейдемо до оцінки зони поздовжнього резонансу.

Оскільки при $c \rightarrow 0$ параметр $h_0 \rightarrow 0$, а при $c \rightarrow \infty$ параметр $h_0 \rightarrow \infty$, те знаходимо, що зони поздовжнього резонансу визначаються наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} m\pi < \omega_1 + \psi_1 < (m + 0.5)\pi, \\ m = 0, 1, 2, 3, \dots, \end{aligned} \quad (38)$$

де

$$\psi_1 = \operatorname{arctg}(\eta \operatorname{tg} \psi_2). \quad (39)$$

Після підстановки значень ω_1, ω_2 в нерівності (38) і нескладних перетворень одержуємо:

$$\begin{cases} l_2 + \frac{\chi_1}{\Omega} \left[m\pi - \arctg \left(\eta \operatorname{tg} \frac{\Omega l_2}{\chi_2} \right) \right] < L, \\ l_2 + \frac{\chi_1}{\Omega} \left[(m+0,5)\pi - \arctg \left(\eta \operatorname{tg} \frac{\Omega l_2}{\chi_2} \right) \right] > L, \end{cases} \quad (40)$$

де $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ $L = l_1 + l_2$.

Таким чином, система нерівностей (40) визначає положення зони поздовжнього резонансу для бурильної колони, що складається з двох різнорідних ступеней. Оскільки така колона складається з двох ступеней різної жорсткості та маси, вона має складний спектр власних частот, що робить її особливо вразливою. У місці переходу від одного ступеня до іншого (стик труб різного діаметру) виникає концентрація напружень. При переході хвилі через межу двох ступенів частина енергії відбивається, а частина – посилюється, що може створити "стоячу хвилю" саме в районі перехідника, призводячи до його пошкодження та подальшого руйнування.

Як показує сучасна практика буріння [1-6], на вертикальних ділянках свердловин дисипація енергії коливань значно нижча, ніж на похило-скерованих, що робить вертикальні ділянки більш схильними до тривалих резонансних коливань. Разом з тим, небезпека резонансу може бути присутня і на похило-скерованих ділянках поблизу КНБК при застосуванні ГОК. Тому для аналізу поздовжнього резонансу обрано чотири компоновки бурильних колон з ГОК для буріння скерованих ділянок свердловин із режимними параметрами: зенітним кутом α , радіусом викривлення R , густиною бурового розчину ρ_p , частотою роботи осцилятора та частотою обертання долота n (табл.1).

Для ефективного процесу буріння КНБК чотирьох компоновок оснащено ГОК. Частота роботи ГОК визначалася технологічними особливостями роботи осцилятора, зенітним кутом та конструктивними особливостями компоновок. Конструктивною особливістю компоновки №4 є те, що до її складу входить ступінь колтюбінгових гнучких труб, виготовлених з титанового сплаву. Для дослідження резонансу компоновок визначимо власні частоти поздовжніх коливань. Для двоступеневої бурильної колони у випадку коли верхній кінець підвішений, а нижній вільний, кругова частота власних коливань згідно [3] визначається за наступним рівнянням:

$$\operatorname{tg} \left(\frac{\omega l_1}{\chi_1} \right) \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\omega l_2}{\chi_2} \right) = \frac{F_1}{F_2}. \quad (41)$$

Таблиця 1

Параметри компоновок бурильних колон та параметри буріння

Позначення параметру	Од. виміру	Значення для компоновок			
		№1	№2	№3	№4
l_1	м	2225	3250	4000	4750
l_2	м	200	250	225	250
F_1	см ²	153,9	153,9	126,7	62,1
F_2	см ²	208,8	208,8	173,8	173,8
E_1	Па	$2,1 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{11}$	$1,1 \cdot 10^{11}$
E_2	Па	$2,1 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{11}$
ρ_1	кг/м ³	7850	7850	7850	4500
ρ_2	кг/м ³	7850	7850	7850	7850
α	град	60	70	80	90
R	м	500	550	600	500
ρ_p	кг/м ³	1250	1300	1250	1200
μ_1		0,02	0,02	0,03	0,03
μ_2		0,08-0,15	0,15-0,2	0,18-0,25	0,25-0,4
ν	Гц	14	16	18	20
n	об/хв	90	60	60	60

Кількість частот власних коливань може бути нескінченною, тому кожному значенню ω для довільного моменту часу t в довільному перерізі колони з координатою s відповідатимуть і певні часткові розв'язки рівнянь (41), які будуть сумою всіх часткових розв'язків для кожного значення ω . За результатами розв'язку рівняння (41) у таблиці 2 наведено значення власних частот коливань перших трьох форм.

Таблиця 2

Власні частоти поздовжніх коливань

Позначення параметру	Од. виміру	Значення для компоновок			
		№1	№2	№3	№4
ω_I	Гц	0,58	0,40	0,32	0,28
ω_{II}	Гц	1,74	1,20	0,97	0,84
ω_{III}	Гц	2,91	2,00	1,62	1,41

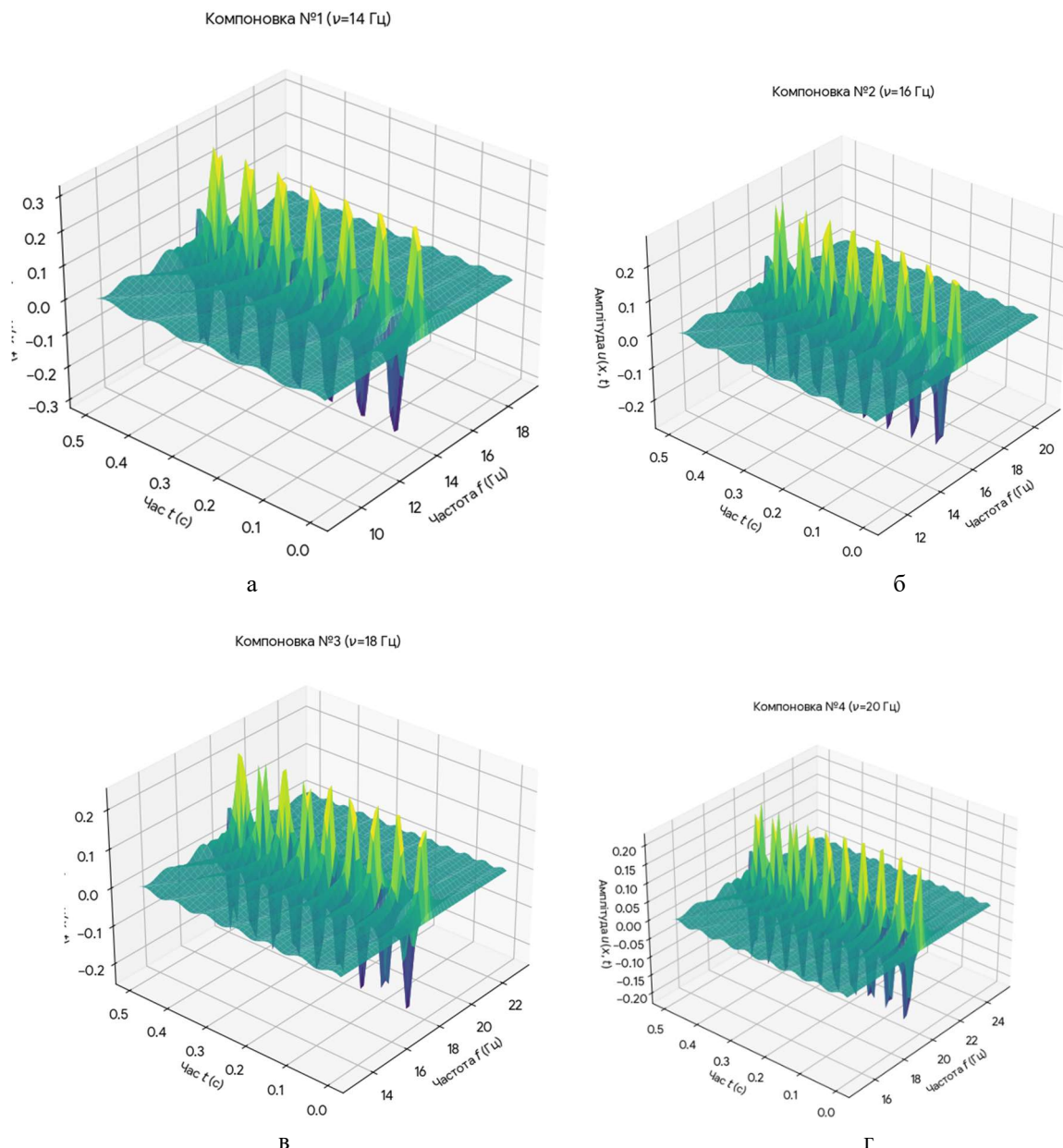


Рис. 3. АЧХ оцінки резонансу поздовжніх коливань компоновок двоступеневих бурильних колон при бурінні скерованих свердловин; а – 1; б – №2; в – №3; г – №4

Для дослідження резонансу зручно проводити шляхом побудови амплітудно-частотної характеристики (АЧХ). АЧХ бурильної колони дозволяє виявити “небезпечні” частоти, при яких відбувається різке зростання амплітуди вимушених коливань, що може призвести до обриву інструменту. Знаючи АЧХ, буровики можуть обирати такі оберти долота, щоб вийти із зони сильних вібрацій і вберегти бурове обладнання. За числовими значеннями параметрів компоновок, режимних параметрів буріння, а також визначених частот власних коливань побудовано 3D-моделі АЧХ (рис. 3). Графіки демонструють залежність амплітуди зміщення

від частоти осцилятора та часу, враховуючи зміну фізико-механічних властивостей матеріалів, геометричних параметрів ступенів, режимних параметрів буріння.

На графіках (рис. 3) видно "гребені" резонансу на частотах, близьких до робочої частоти ГОК. По осі часу спостерігається гармонічний характер коливань, що відповідає характеру роботи ГОК. АЧХ №1 і №2 Мають найбільш чітко виражені та гострі резонансні піки. Це зумовлено тим, що ці компоновки мають однорідну сталеву структуру. При відносно малих довжинах 2225 і 3250м компоновки мають більшу жорсткість. Через низьку дисипацію енергії на цих ділянках

виникає критичне зростання амплітуд напружень, що створює високий ризик втомного руйнування металу та аварійних обривів інструменту. При власній частоті 0,58 Гц і частоті роботи осцилятора 14 Гц АЧХ №1, а також при власній частоті 0,40 Гц і частоті осцилятора 16 Гц АЧХ №2 спостерігаються піки з амплітудою зміщення відповідно близько 0,3 і 0,2 ум. од. Для АЧХ №3 спостерігається явище «розмиття» резонансного піку. Велика довжина (4000 м) та значний зенітний кут (80град) призводять до високої дисипації (розсіювання) енергії коливань. Хоча піки менш виражені, резонанс все одно можливий, проте він має менш «ударний» характер порівняно з коротшими колонами. При власній частоті 0,32 Гц та частоті осцилятора 18 Гц максимальна амплітуда значно нижча, піки не перевищують 0,15 ум. од. На АЧХ №4 Спектр власних частот суттєво зміщений вниз (найнижчі значення власних частот 0,28 Гц), Використання легкого титанового сплаву для колюбінгової секції та велика загальна довжина (4750 м). При високій частоті роботи осцилятора (20 Гц) основні резонансні піки мають амплітуду до 0,2, проте спектр дуже насичений, що вказує на специфічну загрозу резонансу на вищих гармоніках (5-й або 6-й моді), що потребує особливої обережності при виборі режимів промивки. Тобто найбільш небезпечними з точки зору амплітуди є резонанси в жорстких сталевих колонах (№1, №2) з нижчими модами, тоді як у надглибоких та легкосплавних системах (№4) головною загрозою є збіг робочих частот із вищими модами власних коливань.

Висновки. Розроблено математичну модель для оцінки поздовжнього резонансу бурильної колони при бурінні скерованих ділянок свердловин. Проведений аналіз амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) та розрахунок власних частот дозволяють виділити наступне. Найбільшу небезпеку з точки зору руйнування становлять короткі сталеві колони (№1, №2). Через високу жорсткість і низьке розсіювання енергії вони мають найвищі резонансні піки (амплітуда до 0,3). Це створює критичні втомні напруження, що можуть призвести до обриву інструменту вже на перших модах коливань. У глибоких свердловинах (№3) спостерігається ефект демпфування. Зі збільшенням довжини колони (понад 4000 м) та зенітного кута спостерігається позитивний ефект «розмиття» резонансу. Висока дисипація енергії знижує пікові амплітуди (до 0,15),

роблячи роботу осцилятора більш м'якою, хоча ризик виникнення стоячих хвиль залишається. Для колтюбінгових колон (№4) позитивною є «специфіка легких сплавів». Використання титанових секцій суттєво змінює динамічний портрет колони, зміщуючи спектр власних частот вниз (0,28 Гц). Головною загрозою тут є не основний резонанс, а збіг частоти осцилятора з вищими гармоніками (5-6 мода). Це вимагає особливо точного підбору витрати промивальної рідини. Запропонована математична модель та отримана система нерівностей дозволяють ще на етапі проектування визначити «безпечні вікна» для роботи насосів. Це дає змогу уникати зон критичних вібрацій, що підвищує ресурс бурильного інструменту та запобігає аваріям у складних похило-скерованих свердловинах.

Література

1. Tao Z., Meng Y., Feng Q., Yang K., Kang W., Huang X., Fang P. Analysis of nonlinear vibration of lateral-torsional coupling for drill string in deviated well // *Journal of Vibroengineering*. 2024. Vol. 26, No. 7. P. 1584–1601. DOI: <https://doi.org/10.21595/jve.2024.24140>
2. Kropyvnytska V., Humeniuk T., Sabat N., Sementsov G. Analysis of amplitude-phase functions of the drill string as a component of automation system // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1/2 (91). P. 48–58. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.120544>
3. Liu W., Song M., Xu Z., Zhang X. Gap element method of longitudinal vibration of drill string // *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*. 2014. Vol. 6, No. 7. P. 1523–1530.
4. Гоголь В. І., Огородніков П. І., Світлицький В. М. Дослідження поздовжніх, крутильних і згинальних коливань бурильної колони // *Нафтогазова галузь України*. 2013. № 6. С. 5–8.
5. Chen J., Yang L., Huang Q., Zhang W., Qiao J., Zhang X., Jiang D. Dynamic analysis of drill string vibration enhanced by neural network based models // *Geoenery Science and Engineering*. 2025. Vol. 246. Article 213618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213618>
6. Kudaibergenov A., Kudaibergenov A., Khajiyeva L. On resonance regimes of drill string nonlinear dynamics // *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1872, No. 1. Article 020007. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4998850>
7. Kudaibergenov A. K., Kudaibergenov A. K., Khajiyeva L. A. The effect of a supersonic gas flow on resonance regimes of drill string nonlinear vibrations // *WSEAS Transactions on Fluid*

- Mechanics*. 2025. Vol. 20. P. 10-19. DOI: <https://doi.org/10.37394/232013.2025.20.2>
8. Liu D., Huang X., Deng K., Fang P., Yan H., Li C., Cai K. Research on friction characteristics of drill string in whole well section of gas drilling based on finite element method // *Journal of Vibroengineering*. 2025. Vol. 27, No. 3. P. 567–581. DOI: <https://doi.org/10.21595/jve.2025.24519>
 9. Yuan H., Dong G., Chen Y., Wang Q., Mi G. The vibration modal characteristics of drillstring in compound drilling // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2208, No. 1. Article 012006. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2208/1/012006>
 10. Han C., Yan T., Zhang Y., Wang Q. Longitudinal harmonic response analysis of drill string in deep well by using ANSYS // *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2013. Vol. 6, No. 20. P. 3815–3819.
 11. Слабий О. О., Гридчук Я. С., Царук В. Ф., Кондур Т. І., Мохній І. Ю., Михайлів А. Б. Визначення оптимального місця розташування генератора осьових коливань в бурильній колоні // *Нафтогазова енергетика*. 2024. № 1 (41). С. 86–95. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2024-1\(41\)-86-95](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2024-1(41)-86-95)
 12. Bembenek M., Grydzhuk Y., Gajdzik B., Ropyak L., Pashechko M., Slabyi O., Al-Tanakchi A., Pryhorovska T. An analytical–numerical model for determining “drill string–wellbore” frictional interaction forces // *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 2. P. 301. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17020301>
 13. Гридчук Я. С., Слабий О. О., Аль-Танакчі А., Кондур Т. І., Мохній І. Ю. Дослідження деформованого стану бурильної колоні, що обертається на ділянці похилої свердловини // *Нафтогазова енергетика*. 2023. № 2 (40). С. 38–52. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2\(40\)-38-52](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2(40)-38-52)
 14. Grydzhuk Ya., Chudyk I., Velychkovych A., Andrusyak A. Analytical estimation of inertial properties of the curved rotating section in a drill string // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 1 (7 (97)). P. 6–14. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154827>
 15. Yang Y., Huang F., Yan D., Liao H., Niu J. Dynamics study of hot dry rock percussive drilling tool based on the drill string axial vibration // *Geoenergy Science and Engineering*. 2024. Vol. 242. Article 213599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213599>
 16. Slabyi O. O., Hrydzhuk Ya. S., Kondur T. I., Mokhniy I. Yu. Features of the drill string model construction with axial vibration oscillator // *Proceedings of the XIV International Scientific and Technical Conference ATME 2026*. Ivano-Frankivsk – Yaremche, 9–13 February 2026.
 17. Бабенко А. Є., Боронко О. О., Лавренко Я. І., Трубочев С. І. Коливання стержнів, пластин та оболонки [Електронний ресурс]: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 252 с.
 18. Бабенко А. Є., Боронко О. О., Лавренко Я. І., Трубочев С. І. Коливання неконсервативних механічних систем: монографія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 153 с.

References

1. Tao Z., Meng Y., Feng Q., Yang K., Kang W., Huang X., Fang P. Analysis of nonlinear vibration of lateral-torsional coupling for drill string in deviated well // *Journal of Vibroengineering*. 2024. Vol. 26, No. 7. P. 1584-1601. DOI: <https://doi.org/10.21595/jve.2024.24140>
2. Kropyvnytska V., Humeniuk T., Sabat N., Sementsov G. Analysis of amplitude-phase functions of the drill string as a component of automation system // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1/2 (91). P. 48–58. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.120544>
3. Liu W., Song M., Xu Z., Zhang X. Gap element method of longitudinal vibration of drill string // *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*. 2014. Vol. 6, No. 7. P. 1523–1530.
4. Hohol V. I., Ohorodnikov P. I., Svitlytskyi V. M. Doslidzhennia pozdovzhnikh, krutyl'nykh i zghynal'nykh kolyvan burynoi kolony // *Naftohazova haluz Ukrainy*. 2013. № 6. P. 5–8.
5. Chen J., Yang L., Huang Q., Zhang W., Qiao J., Zhang X., Jiang D. Dynamic analysis of drill string vibration enhanced by neural network based models // *Geoenergy Science and Engineering*. 2025. Vol. 246. Article 213618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213618>
6. Kudaibergenov A., Kudaibergenov A., Khajiyeva L. On resonance regimes of drill string nonlinear dynamics // *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1872, No. 1. Article 020007. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4998850>
7. Kudaibergenov A. K., Kudaibergenov A. K., Khajiyeva L. A. The effect of a supersonic gas flow on resonance regimes of drill string nonlinear vibrations // *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics*. 2025. Vol. 20. P. 10-19. DOI: <https://doi.org/10.37394/232013.2025.20.2>
8. Liu D., Huang X., Deng K., Fang P., Yan H., Li C., Cai K. Research on friction characteristics of drill string in whole well section of gas drilling based on finite element method // *Journal of Vibroengineering*. 2025. Vol. 27, No. 3. P. 567–581. DOI: <https://doi.org/10.21595/jve.2025.24519>
9. Yuan H., Dong G., Chen Y., Wang Q., Mi G. The vibration modal characteristics of drillstring in compound drilling // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2208, No. 1. Article 012006. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2208/1/012006>
10. Han C., Yan T., Zhang Y., Wang Q. Longitudinal harmonic response analysis of drill string in deep

- well by using ANSYS // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2013. Vol. 6, No. 20. P. 3815–3819.
11. Slabyi O. O., Hrydzhuk Ya. S., Tsaruk V. F., Kondur T. I., Mokhnii I. Yu., Mykhailiv A. B. Vyznachennia optymalnoho mistsia roztashuvannia heneratora osovykh kolyvan v burylnii koloni // Naftohazova enerhetyka. 2024. № 1 (41). P. 86–95. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2024-1\(41\)-86-95](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2024-1(41)-86-95)
 12. Bembenek M., Grydzhuk Y., Gajdzik B., Ropyak L., Pashechko M., Slabyi O., Al-Tanakchi A., Pryhorovska T. An analytical–numerical model for determining “drill string–wellbore” frictional interaction forces // Energies. 2024. Vol. 17, No. 2. P. 301. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17020301>
 13. Hrydzhuk Ya. S., Slabyi O. O., Al-Tanakchi A., Kondur T. I., Mokhnii I. Yu. Doslidzhennia deformovanoho stanu burylnoi kolony, shcho obertaetsia na diliantsi pokhyloi sverdlovyny // Naftohazova enerhetyka. 2023. № 2 (40). P. 38–52. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2\(40\)-38-52](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2(40)-38-52)
 14. Grydzhuk Ya., Chudyk I., Velychkovych A., Andrusyak A. Analytical estimation of inertial properties of the curved rotating section in a drill string // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 1 (7 (97)). P. 6–14. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154827>
 15. Yang Y., Huang F., Yan D., Liao H., Niu J. Dynamics study of hot dry rock percussive drilling tool based on the drill string axial vibration // Geoenergy Science and Engineering. 2024. Vol. 242. Article 213599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213599>
 16. Slabyi O. O., Hrydzhuk Ya. S., Kondur T. I., Mokhnii I. Yu. Features of the drill string model construction with axial vibration oscillator // Proceedings of the XIV International Scientific and Technical Conference ATME 2026. Ivano-Frankivsk – Yaremche, 9–13 February 2026.
 17. Babenko A. Ye., Boronko O. O., Lavrenko Ya. I., Trubachev S. I. Kolyvannia sterzhniv, plastyn ta obolonok [Elektronnyi resurs]: pidruchnyk. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2022. 252 p.
 18. Babenko A. Ye., Boronko O. O., Lavrenko Ya. I., Trubachev S. I. Kolyvannia nekonservatyvnykh mekhanichnykh system: monohrafiia. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2020. 153 p.

Gridzhuk Ja.S., Chudyk I.I., Slabyi O.O., Kondur T.I., Mokhnii I.Yu. Mathematical model for estimating the longitudinal resonance of the drill string for drilling directional sections of wells

The article is devoted to the urgent problem of ensuring the dynamic stability of drill strings during the construction of oil and gas wells with a complex spatial

trajectory of the shaft. The work substantiates that modern technologies for deepening inclined and horizontal sections are accompanied by significant friction and adhesion forces, which cause the occurrence of harmful phenomena of intermittent slip (stick-slip) and longitudinal friction, which prevent the effective transmission of axial load to the bit. The main method of overcoming these resistances is the introduction of hydraulic axial vibration generators (HGV) into the bottom of the drill string (BHS) assemblies. However, it has been established that additional vibrations generated by oscillators, at certain frequency regimes, can provoke the occurrence of longitudinal resonance, which leads to a critical increase in stress amplitudes, fatigue fracture of the metal and emergency tool breakage. The scientific novelty of the study lies in the development and theoretical substantiation of a refined mathematical model of longitudinal vibrations of a two-stage drill string, which takes into account the specifics of curved sections of the well. The authors used the apparatus of the classical wave equation of an elastic rod with the integration of viscous damping parameters and nonlinear Coulomb friction forces. The model describes the dynamic interaction of two stages of the column (the upper part and the BHA), which have different geometric dimensions and physical and mechanical properties. Particular attention is paid to the boundary conditions at the junction of the stages, where stress concentration occurs due to reflection and amplification of waves. The influence of the zenith angle, the intensity of the barrel curvature, the density of the drilling fluid and the characteristics of the GOK was taken into account. During the study, modeling was carried out for four types of layouts, including options using steel pipes and titanium colubing sections. The results of the analysis of the amplitude-frequency characteristics (AFC) showed that for shorter and stiffer steel columns, the resonance peaks are most pronounced, while in long columns (over 4000 m) there is a “blurring” of the resonance due to high energy dissipation. It was found that the use of light alloys, such as titanium, significantly shifts the spectrum of natural frequencies downward, which creates a risk of resonance at higher harmonics at high oscillator operating frequencies (up to 20 Hz). The practical significance of the work lies in deriving a system of inequalities to determine the boundaries of longitudinal resonance zones. The resulting analytical apparatus allows drilling companies to calculate critical frequencies at the design stage and choose such bit rotation modes and flushing fluid flow rates that would guarantee the operation of the equipment outside the limits of dangerous vibrations. This will make it possible to increase the operational reliability of the drilling tool and reduce the cost of building deep directional wells.

Keywords: drill string, hydraulic oscillator, mathematical model, resonance, directional well.

Гриджук Ярослав Степанович – д. т. н, професор кафедри технічної механіки, інженерної та комп'ютерної графіки Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
<https://orcid.org/0000-0002-1429-8640>

Чудик Ігор Іванович – д. т. н, професор кафедри буріння свердловин Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
<https://orcid.org/0000-0002-7402-6962>

Слабий Орест Олегович – к. т. н, доцент кафедри технічної механіки, інженерної та комп'ютерної графіки Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

<https://orcid.org/0000-0002-1274-2875>

Кондур Тарас Ігорович – аспірант, кафедри технічної механіки, інженерної та комп'ютерної графіки Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

<https://orcid.org/0009-0009-4629-030X>

Мохній Ігор Юрійович – аспірант, кафедри буріння свердловин Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

<https://orcid.org/0000-0003-3852-3934>

Дата першого надходження статті 21.02.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.03.2026.

Дата публікації 11.05.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-301-3-65-71>

УДК 631.319

АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ НАВІСНИХ АГРЕГАТІВ У СИСТЕМІ МАШИННО-ТРАКТОРНИХ КОМПЛЕКСІВ

Мелконов Г.Л., Фесенко Г.В., Мелконова І.В., Іщенко В.К.

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF THE OPERATION OF MOUNTED IMPLEMENTS IN THE SYSTEM OF TRACTOR-IMPLEMENT COMPLEXES

Melkonov H.L., Fesenko H.V., Melkonova I.V., Ishchenko V.K.

У статті комплексно розглянуто конструктивні особливості, класифікацію та експлуатаційні характеристики навісних сільськогосподарських агрегатів як складової частини машинно-тракторних агрегатів (МТА). Узагальнено сучасні підходи до класифікації навісного обладнання за функціональним призначенням, типом приєднання, умовами експлуатації та технологічними ознаками. Проаналізовано основні конструктивні елементи навісних агрегатів, їх вплив на надійність, продуктивність і якість виконання технологічних операцій.

Особливу увагу приділено аналізу техніко-експлуатаційних показників роботи машинно-тракторних агрегатів, зокрема продуктивності, коефіцієнта використання робочого часу, енергетичної ефективності та питомих витрат палива. Визначено та систематизовано основні фактори, що впливають на ефективність роботи МТА: швидкість руху агрегату, ширина захвату, потужність енергетичного засобу, агротехнічні вимоги, технічний стан обладнання та організаційні умови використання техніки.

У роботі виконано розрахунок продуктивності машинно-тракторного агрегату за різних режимів роботи, а також визначено питомі витрати палива залежно від швидкості руху та навантаження. Побудовано аналітичні та графічні залежності продуктивності від швидкості руху агрегату, що дозволило встановити раціональні режими його функціонування. Отримані результати підтверджують, що підвищення швидкості руху сприяє зростанню продуктивності, однак потребує врахування агротехнічних обмежень і можливого зниження якості виконання робіт.

На основі проведеного аналізу обґрунтовано напрями підвищення ефективності використання навісного

обладнання, які передбачають оптимізацію режимів роботи машинно-тракторних агрегатів, удосконалення конструктивних параметрів агрегатів, впровадження енергоощадних технологій та підвищення рівня технічного обслуговування. Доведено, що раціональне поєднання конструктивних, технологічних і експлуатаційних факторів забезпечує підвищення продуктивності, зниження витрат палива та загальне зростання ефективності використання сільськогосподарської техніки.

Ключові слова: навісні агрегати, трактор, продуктивність, обробіток ґрунту, сіявка, механізація.

Вступ. Сучасне сільське господарство характеризується високим рівнем механізації та автоматизації технологічних процесів, що зумовлено необхідністю підвищення продуктивності виробництва, забезпечення продовольчої безпеки та раціонального використання ресурсів. В умовах інтенсифікації аграрного виробництва особливого значення набуває ефективне функціонування технічних засобів, серед яких провідну роль відіграють навісні сільськогосподарські агрегати, що працюють у складі машинно-тракторних агрегатів (МТА).

Застосування навісного обладнання забезпечує виконання широкого спектра технологічних операцій — обробітку ґрунту, посіву, догляду за посівами, внесення добрив та захисту рослин — із високою якістю та продуктивністю. Використання таких агрегатів

дозволяє підвищити ефективність праці, скоротити тривалість виконання польових робіт, зменшити витрати палива та інших матеріальних ресурсів, а також забезпечити дотримання агротехнічних вимог.

Механізація аграрного виробництва є одним із ключових чинників підвищення ефективності сільського господарства, оскільки вона сприяє оптимізації виробничих процесів, зниженню трудомісткості робіт та підвищенню їх якості. У цьому контексті навісні агрегати займають особливе місце, оскільки характеризуються універсальністю, можливістю швидкої зміни робочих органів та адаптацією до різних умов експлуатації. Їх використання у складі МТА забезпечує гнучкість технологічних процесів і дозволяє ефективно використовувати енергетичні засоби.

В умовах зростання вартості паливно-енергетичних і матеріально-технічних ресурсів особливої актуальності набуває питання оптимізації використання сільськогосподарської техніки. Це передбачає підвищення продуктивності машинно-тракторних агрегатів, зниження питомих витрат палива, раціональний вибір режимів роботи, а також удосконалення конструктивних і технологічних параметрів навісного обладнання. Важливим завданням є визначення оптимальних умов експлуатації агрегатів, за яких досягається максимальна ефективність при мінімальних витратах ресурсів.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення ефективності використання технічних засобів у сільському господарстві в умовах обмеженості ресурсів, підвищення цін на енергоносії та зростання вимог до якості виконання агротехнологічних операцій. Додатково це пов'язано з необхідністю впровадження енергоощадних технологій, підвищення екологічності виробництва та забезпечення сталого розвитку аграрного сектору.

Таким чином, удосконалення підходів до використання навісних сільськогосподарських агрегатів, оптимізація режимів їх роботи та підвищення ефективності функціонування машинно-тракторних агрегатів є важливим науково-практичним завданням, що має значний вплив на результати діяльності сільськогосподарських підприємств.

Метою роботи полягає в підвищенні ефективності використання навісних сільськогосподарських агрегатів шляхом удосконалення підходів до їх застосування,

оптимізації режимів роботи машинно-тракторних агрегатів та впровадження енергоощадних і екологічно орієнтованих технологій для забезпечення сталого розвитку аграрного виробництва.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У ході проведення досліджень було проаналізовано низку основних наукових праць за тематикою дослідження, присвячених питанням конструктивних особливостей, класифікації та ефективності використання навісних сільськогосподарських агрегатів. Особливу увагу приділено роботам, у яких розглядаються техніко-експлуатаційні показники машинно-тракторних агрегатів, фактори, що впливають на їх продуктивність, а також підходи до зниження енерговитрат.

У статті [1] досліджено геометрію триточкової навіски трактора з позиції підвищення підйомної здатності. Автори використали метод оптимізації з геометричними та нормативними обмеженнями й показали, що вдосконалена конструкція дозволяє збільшити максимальне підйомне зусилля приблизно на 25% порівняно з базовою схемою. Практичне значення цієї роботи полягає в тому, що вона доводить: ефективність навісного агрегату визначається не лише самим робочим органом, а й параметрами навісного механізму трактора.

У роботі [2] запропоновано систему автоматичного визначення й стабілізації глибини оранки для навісного плуга. Автори поєднали два ІМУ-датчики, енкодер, мікроконтролер і PID-керування гідросистемою навіски. За польових випробувань система підтримувала глибину в заданому інтервалі 20–24 см навіть на швидкості до 10 км/год. Сильна сторона цієї статті — перехід від простого механічного регулювання до інтелектуальної системи, яка підвищує точність обробітку та зменшує вплив випадкових коливань.

У роботі Yao et al [3] розглянуто проблему перекосу навісного агрегату на нерівному рельєфі. Автори показали, що крен трактора передається через жорстку навіску до робочого органу й викликає нерівномірну глибину заглиблення по ширині захвату. Запропонована система на основі подвійного замкненого нечіткого PID-регулятора зменшувала кут крену з 10° до 0° за 1.25–1.30 с, а в полі досягала MAE 0.19° та RMSE 0.28°.

У статті Lombardi et al [4] досліджено, як зміна маси навісного обприскувача впливає на розподіл навантаження між осями трактора, положення центра мас і експлуатаційну

стійкість. Дослід проводили для мас 550, 850 і 1150 кг. Автори встановили, що зі зростанням маси агрегату центр ваги системи зміщується назад приблизно на 0.0218 см на кожен кілограм, причому залежність є майже лінійною ($R^2 \approx 0.99$). За максимального навантаження були зафіксовані перевищення безпечних меж стійкості.

У статті роботі [5] запропоновано метод оцінювання глибини роботи навісного агрегату через вимірювання повороту елементів гідравлічної системи та геометричну модель триточкової навіски. Автори зазначають, що створили математичну залежність між параметрами ланок, розробили програму для обчислення калібрувального коефіцієнта і показали, що максимальна похибка в лабораторних умовах була в межах ± 1 см, а відхилення від ручного вимірювання в полі сягало до $\pm 13\%$.

Аналіз літературних джерел дозволив узагальнити сучасні наукові підходи до оцінювання ефективності використання навісного обладнання, визначити ключові напрями підвищення продуктивності агрегатів та виявити невирішені аспекти, що потребують подальших досліджень.

Результати дослідження. Навісний агрегат (рис. 1) працює у складі машинно-тракторного агрегату (МТА) як єдина функціональна система, в якій трактор виступає джерелом енергії, а навісне обладнання — виконавчим органом технологічного процесу. Ефективність роботи такого агрегату визначається сукупністю технічних і експлуатаційних параметрів, основними з яких є:

- ширина захвату (B) — визначає площу обробітку за один прохід і безпосередньо впливає на продуктивність агрегату;
- швидкість руху (V) — характеризує інтенсивність виконання технологічної операції та залежить від типу агрегату, стану ґрунту і потужності трактора;
- коефіцієнт використання часу (η) — враховує втрати часу на розвороти, налаштування, простої та інші допоміжні операції;
- потужність трактора (N) — визначає можливість ефективного агрегування знаряддя та забезпечує необхідне тягове зусилля.

Взаємозв'язок зазначених параметрів визначає продуктивність машинно-тракторного агрегату, яка розраховується за формулою:

$$W = \frac{B \cdot V \cdot \eta}{10}$$

де: W — продуктивність, га/год;

B — ширина захвату, м;

V — швидкість руху, км/год;

η — коефіцієнт використання часу.

З аналізу залежності видно, що збільшення ширини захвату та швидкості руху сприяє підвищенню продуктивності, однак ці параметри обмежуються агротехнічними вимогами та енергетичними можливостями трактора. Водночас коефіцієнт використання часу має суттєвий вплив на фактичну ефективність роботи агрегату в польових умовах.



Рис. 1. Схема машинно-тракторного агрегату з навісним обладнанням

Для оцінки ефективності роботи навісного сільськогосподарського агрегату прийнято такі вихідні параметри, що відповідають типовим умовам виконання польових робіт:

Для оцінки ефективності роботи навісного сільськогосподарського агрегату прийнято такі вихідні параметри, що відповідають типовим умовам виконання польових робіт:

-ширина захвату агрегату $B=2,5$ м

Цей параметр визначає ширину смуги обробітку за один прохід агрегату. Значення 2,5 м є характерним для малих і середніх ґрунтообробних машин (плугів, культиваторів), що агрегуються з тракторами потужністю до 80–100 кВт.

-швидкість руху агрегату $V=6; 8; 10$ км/год

Прийнятий діапазон швидкостей відповідає реальним умовам експлуатації. Нижня межа (6 км/год) характерна для енергоємних операцій (оранка), тоді як вищі значення (8–10 км/год) застосовуються при легших роботах, таких як

культивация або передпосівний обробіток ґрунту.

-коефіцієнт використання часу $\eta=0,75$

Даний коефіцієнт враховує втрати робочого часу, пов'язані з виконанням допоміжних операцій: розворотами на краях поля, регулюванням агрегату, технічними перервами тощо. Значення 0,75 відповідає середнім умовам роботи та свідчить про достатньо ефективну організацію технологічного процесу.

Обрані значення параметрів дозволяють провести адекватну оцінку роботи машинно-тракторного агрегату в типових умовах сільськогосподарського виробництва. Вони враховують:

- технічні характеристики сучасних тракторів середнього класу;
- агротехнічні вимоги до швидкості виконання операцій;
- організаційні втрати часу в реальних польових умовах.

Таким чином, використання зазначених вихідних даних забезпечує достовірність подальших розрахунків продуктивності та витрат палива, а також дозволяє провести порівняльний аналіз ефективності роботи агрегату при різних режимах експлуатації.

В роботі згідно вихідним даним розрахована продуктивність машинно-тракторного агрегату

Таблиця 1

Продуктивність машинно-тракторного агрегату

№	Швидкість руху, км/год	Ширина захвату, м	Коефіцієнт η	Продуктивність, га/год
1	6	2.5	0.75	1.13
2	8	2.5	0.75	1.50
3	10	2.5	0.75	1.88

Згідно з даними таблиці 1 спостерігається пряма залежність продуктивності від швидкості руху агрегату. Збільшення швидкості з 6 до 10 км/год призводить до зростання продуктивності з 1,13 до 1,88 га/год, тобто приблизно на 66%.

Однак підвищення швидкості повинно здійснюватися з урахуванням:

- агротехнічних вимог до якості обробітку ґрунту;
- потужності трактора;
- умов експлуатації (вологість, щільність ґрунту).

Таким чином, отримані результати підтверджують доцільність оптимізації швидкісного режиму роботи машинно-

тракторного агрегату для досягнення максимальної ефективності.

Одним із важливих показників ефективності роботи навісного сільськогосподарського агрегату є витрати палива. Цей показник характеризує економічність виконання технологічної операції та дає змогу оцінити доцільність вибору режиму роботи машинно-тракторного агрегату. Розрахунок витрат палива машинно-тракторного агрегату наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Розрахунок витрат палива машинно-тракторного агрегату

№	Швидкість руху, км/год	Продуктивність, га/год	Погодинна витрата палива, л/год	Витрати палива, л/га
1	6	1.13	15.7	13.89
2	8	1.50	15.7	10.47
3	10	1.88	15.7	8.35

Аналіз результатів, наведених у таблицях 1 і 2, показує, що зі збільшенням швидкості руху агрегату зростає його продуктивність і одночасно зменшуються питомі витрати палива на одиницю площі.

При швидкості 6 км/год продуктивність становить 1,13 га/год, а витрати палива — 13,89 л/га. За збільшення швидкості до 8 км/год продуктивність зростає до 1,50 га/год, а витрати палива знижуються до 10,47 л/га. При швидкості 10 км/год досягається найбільша продуктивність — 1,88 га/год, тоді як витрати палива зменшуються до 8,35 л/га.

Отже, між продуктивністю агрегату та питомими витратами палива існує обернена залежність: чим вища продуктивність, тим менші витрати пального на 1 гектар обробленої площі. Це пояснюється тим, що за сталої погодинної витрати палива збільшення обсягу виконаної роботи за годину призводить до зменшення питомих витрат.

Разом із тим, підвищення швидкості руху не завжди є безумовно позитивним фактором. Надмірне збільшення швидкості може спричинити:

- погіршення якості технологічної операції;
- нерівномірність обробітку ґрунту;
- зростання динамічних навантажень на агрегат;
- підвищене зношування робочих органів.

Тому вибір оптимальної швидкості руху машинно-тракторного агрегату повинен здійснюватися з урахуванням не лише

економічних показників, але й комплексу агротехнічних, технічних та експлуатаційних факторів. З економічної точки зору підвищення швидкості сприяє зростанню продуктивності агрегату та зниженню витрат праці на одиницю виконаної роботи. Водночас надмірне збільшення швидкості може призводити до перевитрат палива, підвищеного зношування робочих органів і зниження загальної ефективності використання техніки.

З агротехнічної позиції важливо забезпечити якісне виконання технологічного процесу: дотримання заданої глибини обробітку, рівномірність обробки ґрунту, відсутність пропусків або перекриттів, а також мінімізацію пошкодження рослин. Недотримання оптимальної швидкості може негативно вплинути на структуру ґрунту та врожайність сільськогосподарських культур.

Технічний стан машини також відіграє суттєву роль: зношені або неправильно відрегульовані робочі органи обмежують можливість роботи на підвищених швидкостях без втрати якості. Крім того, необхідно враховувати потужність трактора, його тягові характеристики та відповідність агрегатованим знаряддям.

Умови експлуатації, зокрема тип ґрунту, його вологість, рельєф місцевості та погодні фактори, також істотно впливають на вибір швидкісного режиму. Наприклад, на важких або перезволожених ґрунтах доцільно знижувати швидкість для забезпечення стабільної роботи агрегату та уникнення перевантаження техніки.

Отже, оптимальна швидкість руху є результатом компромісу між продуктивністю, економічною ефективністю та якістю виконання технологічної операції, що потребує комплексного підходу до її обґрунтування. Таким чином, проведені розрахунки підтверджують, що раціональне підвищення швидкості руху машинно-тракторного агрегату дає змогу підвищити продуктивність роботи та зменшити витрати палива на одиницю площі, що в цілому сприяє зростанню ефективності використання навісних сільськогосподарських агрегатів.

Таблиця 3

Основні техніко-економічні показники роботи агрегату

№	Швидкість, км/год	Продуктивність, га/год	Витрати палива, л/га
1	6	1.13	13.89
2	8	1.50	10.47
3	10	1.88	8.35

Висновки. Аналіз узагальнених техніко-економічних показників роботи машинно-тракторного агрегату свідчить про наявність чіткої закономірності між швидкістю руху, продуктивністю та питомими витратами палива.

Зі збільшенням швидкості руху агрегату з 6 до 10 км/год продуктивність зростає з 1,13 до 1,88 га/год, тобто приблизно на 66%, що свідчить про суттєве підвищення ефективності виконання технологічної операції. Одночасно спостерігається зниження витрат палива на одиницю площі з 13,89 до 8,35 л/га, що становить близько 40% економії.

Таким чином, результати проведених розрахунків і аналітичних оцінок свідчать про чітку залежність основних техніко-економічних показників роботи машинно-тракторного агрегату від швидкості його руху. Зокрема, встановлено, що підвищення швидкості в межах допустимого діапазону сприяє не лише зростанню змінної та годинної продуктивності агрегату, але й більш раціональному використанню паливно-енергетичних ресурсів. Це пояснюється тим, що зі збільшенням швидкості зменшується тривалість виконання технологічної операції, а отже — знижуються питомі витрати палива на одиницю обробленої площі.

Разом із тим, отримані результати необхідно інтерпретувати з урахуванням низки обмежувальних факторів. Перш за все, максимальні значення швидкості руху не можуть визначатися виключно економічними міркуваннями. Вони повинні відповідати агротехнічним вимогам до виконання конкретної операції, таким як забезпечення необхідної глибини та рівномірності обробітку ґрунту, дотримання оптимальної структури посівного шару, відсутність огріхів і перекриттів. Порушення цих вимог може призвести до погіршення умов росту рослин і, як наслідок, до зниження врожайності.

Крім того, технічні можливості агрегату також відіграють визначальну роль у виборі швидкісного режиму. Робота на надмірно високих швидкостях супроводжується зростанням динамічних навантажень на робочі органи, вузли та механізми, що спричиняє їх прискорене зношування, підвищує ймовірність відмов та збільшує витрати на технічне обслуговування і ремонт. Також необхідно враховувати потужнісні та тягові характеристики трактора, які обмежують ефективну роботу агрегату в умовах підвищених навантажень.

Не менш важливими є умови експлуатації, зокрема фізико-механічні властивості ґрунту, його вологість, щільність, рельєф поля та погодні умови. У складних ґрунтових умовах доцільно знижувати швидкість руху для забезпечення стабільності технологічного процесу та запобігання перевантаженню енергетичного засобу.

Отже, оптимальний режим роботи машинно-тракторного агрегату досягається за умов комплексного врахування економічних, агротехнічних та технічних чинників. Рациональне поєднання швидкості руху, продуктивності та паливної економічності забезпечує не лише підвищення ефективності використання навісного сільськогосподарського обладнання, але й збереження його технічного ресурсу та дотримання вимог сучасних технологій землеробства.

Література

1. Molari G., Mattetti M., Guarnieri A. Optimal Three-Point Hitch Design to Maximize Lifting Performance // Transactions of the ASABE. 2014. DOI: 10.13031/trans.57.10353.
2. Zhu Y., Cui B., Yu Z., Gao Y., Wei X. Tillage Depth Detection and Control Based on Attitude Estimation and Online Calibration of Model Parameters // Agriculture. 2024. Vol. 14, No. 12. Art. 2130. DOI: 10.3390/agriculture14122130.
3. Yao H., Zhang E., Liu Y., Du J., Yin X. Design and Experiment of an Automatic Leveling System for Tractor-Mounted Implements // Sensors. 2025. Vol. 25, No. 12. Art. 3707. DOI: 10.3390/s25123707.
4. Lombardi B. P. et al. Mass Impact of a Mounted Sprayer on the Operational Balance of an Agricultural Tractor // Machines. 2025. Vol. 7, No. 9. Art. 289.
5. Pranav P. K., Kumar A., Ansh A. K., Kumar S. Geometrical analysis of the 3-point linkage of tractors for the measurement and display of the working depth // Research in Agricultural Engineering. 2024. Vol. 70, No. 4. P. 237–244. DOI: 10.17221/23/2024-RAE.
6. Відцентровий робочий орган для розсіювання сипучих матеріалів : пат. 117438 Україна : МПК A01C 17/00. № a201709282 ; заявл. 21.09.2017 ; опубл. 25.07.2018, Бюл. № 14. 4 с.
7. Закалов О. В. Основи тертя і зношування в машинах : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 75 с.
8. Коваленко В. Ф. Загальна фізика в прикладах, запитаннях і відповідях. Механіка : навч. посіб. Київ : Київський університет, 2011. 223 с.

References

1. Molari G., Mattetti M., Guarnieri A. Optimal Three-Point Hitch Design to Maximize Lifting Performance // Transactions of the ASABE. 2014. DOI: 10.13031/trans.57.10353.
2. Zhu Y., Cui B., Yu Z., Gao Y., Wei X. Tillage Depth Detection and Control Based on Attitude Estimation and Online Calibration of Model Parameters // Agriculture. 2024. Vol. 14, No. 12. Art. 2130. DOI: 10.3390/agriculture14122130.
3. Yao H., Zhang E., Liu Y., Du J., Yin X. Design and Experiment of an Automatic Leveling System for Tractor-Mounted Implements // Sensors. 2025. Vol. 25, No. 12. Art. 3707. DOI: 10.3390/s25123707.
4. Lombardi B. P. et al. Mass Impact of a Mounted Sprayer on the Operational Balance of an Agricultural Tractor // Machines. 2025. Vol. 7, No. 9. Art. 289.
5. Pranav P. K., Kumar A., Ansh A. K., Kumar S. Geometrical analysis of the 3-point linkage of tractors for the measurement and display of the working depth // Research in Agricultural Engineering. 2024. Vol. 70, No. 4. P. 237–244. DOI: 10.17221/23/2024-RAE.
6. Centrifugal working body for spreading bulk materials [Vidsentrovnyi robocnyi orhan dlia rozsiuvannia sypkykh materialiv]. Patent UA No. 117438, IPC A01C 17/00. Application No. a201709282; filed 21.09.2017; published 25.07.2018. Bulletin. No. 14. 4 p.
7. Zakalov O. V. Fundamentals of friction and wear in machines [Osnovy tertia ta znoshuvannia v mashynakh]. Ternopil: TNTU named after I. Pului, 2011. 75 p.
8. Kovalenko V. F. General physics in examples, questions and answers. Mechanics [Zahalna fizyka v prykladakh, zapytanniakh i vidpovidiakh. Mekhanika]. Kyiv: Kyiv University, 2011. 223 p.

Melkonov H.L., Fesenko H.V., Melkonova I.V., Ishchenko V.K. Analysis and optimization of the operation of mounted implements in the system of tractor–implement complexes

The article comprehensively examines the design features, classification, and operational characteristics of mounted agricultural implements as an integral part of tractor–implement aggregates. Modern approaches to the classification of mounted equipment are generalized according to functional purpose, type of attachment, operating conditions, and technological characteristics. The main structural elements of mounted implements and their influence on reliability, productivity, and the quality of technological operations are analyzed.

Particular attention is paid to the analysis of technical and operational performance indicators of tractor–implement aggregates, including productivity, working time utilization coefficient, energy efficiency, and specific fuel consumption. The main factors influencing the efficiency of such aggregates are

identified and systematized, namely: operating speed, working width, power of the energy source, agrotechnical requirements, technical condition of equipment, and organizational conditions of machinery use.

The study includes the calculation of aggregate productivity under different operating modes, as well as the determination of specific fuel consumption depending on operating speed and load. Analytical and graphical relationships between productivity and operating speed are developed, which made it possible to determine rational operating modes. The obtained results confirm that increasing operating speed leads to higher productivity; however, it requires consideration of agrotechnical constraints and possible reduction in work quality.

Based on the conducted analysis, key directions for improving the efficiency of mounted equipment use have been substantiated and systematized. These directions primarily include the optimization of operating modes of tractor–implement aggregates through the rational selection of working speed, load level, and utilization of working time, taking into account agrotechnical requirements and field conditions. Particular importance is given to the improvement of structural parameters of mounted implements, such as the geometry of working bodies, adjustment mechanisms, and hitch system characteristics, which directly affect stability, depth control accuracy, and uniformity of technological operations.

In addition, the implementation of energy-saving technologies is emphasized, including the use of modern materials, reduction of traction resistance, and improvement of power transmission efficiency. The integration of precision agriculture elements and automated control systems also contributes to more efficient operation by enabling real-time adjustment of working parameters and minimizing resource losses. Enhancement of maintenance practices, including timely diagnostics, preventive servicing, and the use of advanced monitoring systems, ensures the reliability and durability of equipment, reducing downtime and repair costs.

Furthermore, the study highlights the importance of organizational factors, such as proper planning of field operations, operator qualification, and effective management of machinery fleets. It is demonstrated that only a comprehensive approach, which combines structural improvements, technological innovations, and optimized operational strategies, can ensure a significant increase in productivity, reduction of specific fuel consumption, and overall improvement in the efficiency and sustainability of agricultural machinery use.

Key words: mounted implements, tractor, productivity, soil tillage, sowing, mechanization.

Мелконов Григорій Леонідович – к.т.н., доц., завідувач кафедри механізації сільського господарства, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ),
ORCID: 0000-0003-3182-1648

melkonov78@snu.edu.ua

Фесенко Григорій Васильович – к.т.н., доц., доцент кафедри механізації сільського господарства, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ)
ORCID: 0000-0001-9749-8746

Мелконова Інна Вікторівна – к.т.н., доц., завідувачка кафедри електричної інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ), melkonova@snu.edu.ua,
ORCID: 0000-0001-6173-1470

Іщенко Віктор Костянтинович – студент групи АПІ-25дм кафедри механізації сільського господарства, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ)
ORCID: 0009-0001-7698-9287

Дата першого надходження статті 09.02.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.03.2026.

Дата публікації 11.05.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-301-3-72-79>

UDC 62-83

RESEARCH OF ELECTROMECHATRONIC SYSTEMS WITH VARIABLE PARAMETERS USING THE EXAMPLE OF A TRANSPORT MECHANISM

Rudniev Y.S., Romanchenko J.A.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННИХ СИСТЕМ ЗІ ЗМІННИМИ ПАРАМЕТРАМИ НА ПРИКЛАДІ ТРАНСПОРТУЮЧОГО МЕХАНІЗМУ

Руднєв Є.С., Романченко Ю.А.

In the article an analysis of the influence of the variability of the system's mass on its dynamics in electromechatronic systems is presented.

It is shown that electromechatronic systems with variable parameters are particularly relevant, as their operation is accompanied by dynamic changes in mass, inertial, force, and kinematic characteristics during operation. These changes are caused by load variations, uneven material feed, changes in speed modes, and the influence of external factors, significantly complicating control processes. This necessitates the use of modern methods of mathematical modeling and analysis to ensure the effective operation of such systems. It is shown that transport mechanisms, particularly conveyors, are typical examples of electromechatronic systems with variable parameters. It is established that, in general, three types of dynamic forces (torques) arise in a mechanical system: the first arises from changes in the system's speed, the second from changes in the mass (moment of inertia), and the third from changes in the gear ratio. Therefore, a very large number of possible system behaviors are possible.

Given the complexity of the process, mathematical modeling has been established as the only method for studying processes in mechanical systems with variable parameters. The MATLAB/Simulink software package is used in the research. A short conveyor loader operating in reversible mode to dispense bulk material into passing containers is considered as a system for studying the effect of mass variability on the system's dynamics. The kinematic and structural diagrams of the loader are presented and analyzed in detail, taking into account the relationships between its main components, allowing us to reflect the features of motion transmission and the formation of operating modes. The operating principle of individual components and their impact on the overall system dynamics are described. Furthermore, the

mechanical characteristics of the loader's electric drive are studied, their main parameters and patterns of change depending on the load and operating modes are determined, which is important for further analysis and synthesis of control systems.

A digital model of this mechanical system is presented in the MATLAB/Simulink environment. The conveyor acceleration process is simulated with no material on the belt, a fully loaded belt, and gradual loading. This results in transient processes during conveyor start-up at various throughput values. It is established that the influence of variable mass on the dynamics is significant when its value at maximum load is comparable to or greater than the constant mass.

Key words: *electromechatronic systems, variable parameters, transport mechanism, dynamic characteristics, performance, transient processes, control system.*

Introduction. In today's industrial and process automation environment, electromechatronic systems play a key role in ensuring the efficiency, flexibility, and reliability of equipment. Of particular relevance are systems with variable parameters, whose operation is accompanied by dynamic changes in mass, inertial, force, and kinematic characteristics during operation. Such changes can be caused by load variations, uneven material feed, changes in speed conditions, or the influence of external factors, complicating control processes and requiring the use of modern modeling and analysis methods [1, 2].

A typical example of electromechatronic systems with variable parameters are transport

mechanisms, particularly conveyors, which are widely used in the mining, metallurgy, food, and logistics industries. A characteristic feature of such systems is the presence of a variable load, which directly impacts drive dynamics, energy consumption, and the accuracy of maintaining specified operating modes. This necessitates considering nonlinear effects, changes in stiffness and damping, as well as the interaction of electrical and mechanical subsystems during the study [3].

A conveyor loader is an integral part of continuous handling systems and is designed to move, feed, and evenly distribute bulk or individual materials within a technological process. Its widespread use is due to its high productivity, automation capabilities, and integration into complex production lines across various industries.

Structurally, a conveyor loader consists of a traction element (belt, chain, or roller system), a drive mechanism, support elements, loading and unloading units, and a control system. The primary functional element is the electric drive, which provides movement of the traction element and determines the dynamic characteristics of the entire system. The loader's operating mode is characterized by a variable load, depending on the material feed rate, its physical and mechanical properties, and operating conditions [4, 5].

A characteristic of conveyor loader operation is the uneven flow of material, which leads to changes in the torque on the motor shaft, fluctuations in travel speed, and additional dynamic loads on structural elements. This, in turn, impacts the energy efficiency, reliability, and durability of the equipment. Considering these factors is essential for constructing adequate mathematical models and developing effective control systems [6].

Thus, the study of the operating characteristics of a conveyor loader as an electromechatronic system with variable parameters allows for a deeper understanding of the processes occurring within it and the creation of preconditions for increasing the efficiency of its operation in real production conditions.

The objective to study an electromechatronic system with variable parameters using a conveyor as an example, develop an appropriate mathematical model, and analyze the influence of variable parameters on the dynamic characteristics of the system.

Research results. Mechanisms that exhibit both real and fictitious changes in mass (moment of inertia) include loading/unloading conveyors, thin sheet coilers in rolling mills, and mine hoists with variable rope winding radii. Additionally, in some

cases, transmission devices with a variable gear ratio between the mechanism and the motor are used – slip clutches (electromagnetic, hydraulic, powder), speed variators, crank-connecting rod pairs, cams, etc.

Let us consider the equation of motion for $m \neq const$ and $i \neq const$, neglecting for simplicity the flexibility of the kinematic constraints. The equation can be obtained from the equality of the impulse of force and the momentum in differential form. For translational motion, this equation has the form [1]:

$$(F_M - F_{CM})dt = d[m_M(V_M - U_M)] \quad (1)$$

where F_M, F_{CM}, m_M – the driving force, resistance force and mass reduced to the movement of the mechanism, N, kg;

U_M – projection of the velocity of the changing mass ($m_M = var$), which coincides with the direction of movement of the main mass, m/s.

When $U_M = const$ ($dU_M/dt = 0$) we have:

$$m_M \frac{dV_M}{dt} + (V_M - U_M) \frac{dm_M}{dt} = F_M - F_{CM} \quad (2)$$

This equation does not explicitly take into account changes in the gear ratio i . Therefore, we write (2) in terms of the electric drive coordinates, reduced to the motor shaft:

$$F_M = F \cdot i; F_{CM} = F_C \cdot i; V_M = V / i; m_M = m \cdot i^2,$$

where m – the fictitious mass reduced to the generator on the engine rotor, kg;

F, F_C, V – real forces and speed on the rotor generator, N, m/s.

Then

$$i^2 m d\left(\frac{V}{i}\right) + \frac{V - U}{i} d(i^2 m) = i(F - F_C) dt.$$

Differentiating and dividing both sides by i and dt , we obtain:

$$m \frac{dV}{dt} + (V - U) \frac{dm}{dt} + \frac{m}{i} (V - 2U) \frac{di}{dt} = F - F_C \quad (3)$$

For rotating motion ($\omega = V/R; \omega_U = U/R; M = FR; J = mR^2$)

$$J \frac{d\omega}{dt} + (\omega - \omega_U) \frac{dJ}{dt} + \frac{J}{i} (\omega - 2\omega_U) \frac{di}{dt} = M - M_C \quad (4)$$

where ω_U – the component of the angular velocity of the engine corresponding to the component U_M , 1/s.

If J and i are expressed through the angle of rotation α of the motor shaft, then the last equation will have the form:

$$J(\alpha) \frac{d\omega}{dt} + \omega(\omega - \omega_U) \frac{dJ(\alpha)}{d\alpha} + \frac{J(\alpha)}{i(\alpha)} \omega(\omega - 2\omega_U) \frac{di(\alpha)}{d\alpha} = M - M_c \quad (5)$$

As can be seen from the last three equations, in general, three types of dynamic forces (moments) arise in a mechanical system: the first of these arise when the speed of the system changes, the second – when the mass (moment of inertia) changes, and the third – when the gear ratio changes.

Therefore, a very large number of possible system behaviors are possible. For example, even in the absence of external forces acting on the system, that is, at $F - F_c = 0$ ($M - M_c = 0$), it can accelerate, decelerate, or move at a constant speed (stand still). In this case, the mass (moment of inertia) and gear ratio can decrease or remain constant.

Given the complexity of the flow, mathematical modeling is the only method for studying processes in mechanical systems with variable parameters. The MATLAB/Simulink software package is used in this research.

To study the effect of mass variability on the dynamics of a system, we will consider a short conveyor loader operating in reverse mode to dispense bulk material into passing containers. Bulk material falls vertically from the loader onto the conveyor belt. Belt loading begins when the motor is started. The kinematic diagram of the loader is shown in Figure 1.

The initial data for calculations and research are [1]:

- dispenser capacity – Q , t/h;
- maximum conveyor belt speed – $V_{\max}$, m/s;
- conveyor length – L_T , m;
- linear mass of rollers and tape – q_p , kg/m.

Since the speed of the additional mass falling onto the belt is perpendicular to the speed of the main mass of the system, and the gear ratio $j = \text{const}$ is, the equation of motion (3) has the form

$$m \frac{dV}{dt} + V \frac{dm}{dt} = F_p - F_c, \quad (6)$$

where F_p – the driving force of the engine, reduced to the belt ($F_p = M_p j$), N;

M – torque on the engine shaft, Nm;

F_c – static resistance force caused by dry friction in bearings under pressure from the belt with the transported material H ,

$$F_c = F_c(t) = K_c g(m_c + m_v) = K_c L_T q_p g + K_c Q_m(t) g,$$

where K_c – the coefficient of friction ($K_c = 0.06 \div 0.1$);

m_c – constant mass, kg.

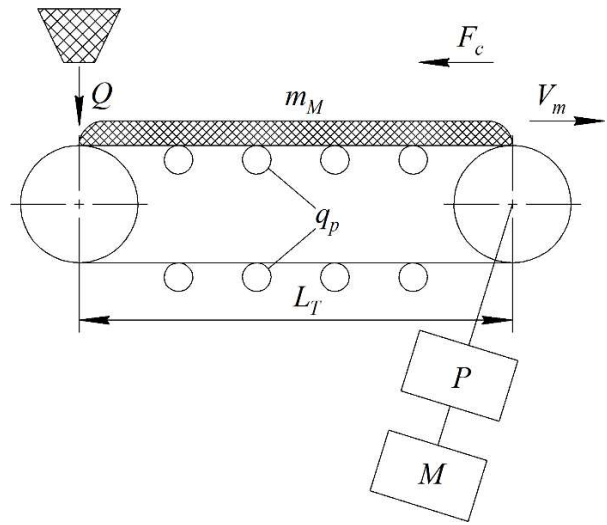


Fig. 1. Kinematic diagram of the loader

The mass of the rollers and tape,

$$m_c = q_p L_T;$$

m_v , $Q_m(t)$ – variable value of mass on the tape, kg.

$$m_v = Q_m(t) = Q_{(t/y)} \frac{1000}{3600} \cdot t = Q_{(kg/s)} \cdot t;$$

m – the total mass of the conveyor reduced to linear motion, taking into account the inertia of the engine,

$$m = m_d + m_c + m_v = 1.1 J_d \cdot j^2 + q_p L_T + Q_m(t),$$

where J_d – the moment of inertia of the engine rotor, kgm^2 .

The structural diagram of the mechanical system of the loader (Fig. 2) is obtained as the structure of the solution of equation (6) relative to V

$$V = \int \frac{1}{m} \left[M_p j - K_c g(m_c + Q \cdot t) - V \frac{dm}{dt} \right] dt.$$

The inertial force caused by the change of mass will be denoted by $F_{dm} = V \frac{dm}{dt}$.

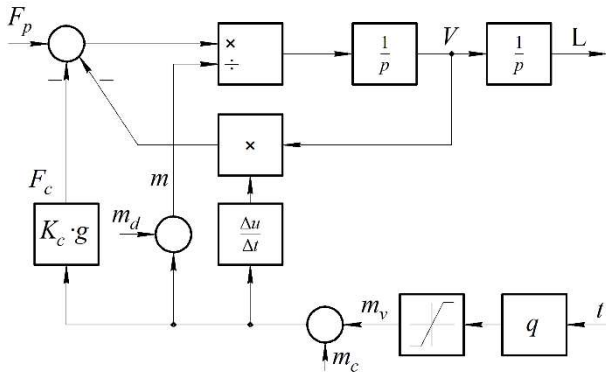


Fig. 2. Structural diagram of the mechanical system of the loader

Moment M_P engine is determined by its mechanical characteristic (Fig. 3, a), which can be generated by any electric drive system (TC-M, FC-AM, AVC) using a torque controller. It can be determined by equations [1, 2]:

section a-b – $M(\omega) = M_{\max} = \lambda_M M_H$,

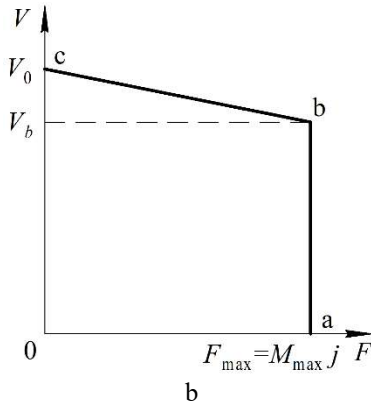
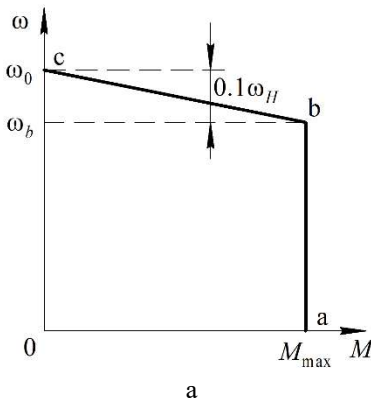


Fig. 3. Mechanical characteristics of the loader electric drive: a – speed-torque characteristic; b – speed-force characteristic

section b-c –

$$M(\omega) = M_{\max} - K_M(\omega - \omega_b) = K_M(\omega_0 - \omega), \quad (7)$$

where λ_M – the engine overload capacity by torque ($\lambda_M = 1.8 \div 2.4$);

K_M – coefficient of rigidity of mechanical characteristics,

$$K_M = M_{\max} / (\omega_0 - \omega_b) \cong M_{\max} / 0.1\omega_H,$$

if we accept

$$\omega_b = \omega_0 - 0.1\omega_H.$$

At the first stage of loading (t_l) increases $Q_m(t)$ and upon completion of the stage is equal to

$$Q_{ml} = Q \cdot t_l,$$

where t_l – the duration of the tape loading, which is determined by the time it takes the tape to travel the path L_T , i.e.

$$L_l = L_T = \int_0^{t_l} V(t) dt.$$

At the second stage (unloading) $Q_m(t)$ it begins to decrease until it reaches the value

$$Q_{mc} = Q t_T = Q L_T / V_{\max} = q_m L_T,$$

where q_m – the linear mass of bulk material on the belt at a steady belt speed $V_{\max}$;

t_T – the time it takes to travel a distance along the belt L_T at a speed of $V_{\max}$.

That is, the mass will become stable Q_{mc} after the tape has passed L_T from the moment t_l .

Thus, the second stage ends when the belt has traveled a distance equal to $2L_T$. After this, the amount of material flowing onto the belt will be equal to that flowing off the conveyor. Without significant loss of accuracy, this process can be replaced with a simpler one: once $Q_m(t)$ it reaches Q_{mc} , it can be limited to this level, i.e.,

$$Q_m(t) = Qt \text{ at } Q_m(t) < Q_{mc},$$

$$Q_m(t) = Q_{mc} = \text{const in the future.}$$

In this case, the change in driving force corresponds to the characteristic of the electric drive (Fig. 3). For ease of consideration, we will convert

the value of the torque on the motor shaft to linear motion (Fig. 3, b):

$$F(V) = M_{\max} j = F_{\max} = \text{const} \text{ at } V \leq V_b = \omega_b / j,$$

$$F(V) = M_{\max} j - K_M j (\omega - \omega_b) = F_{\max} - K_M j^2 (V - V_b) \text{ at } V > V_b.$$

The digital model of this mechanical system in the Simulink environment of the MATLAB package is shown in Fig. 4. The mechanical characteristic of the engine is formed by the Constant, Sum 1, Gain, Gain 1 blocks according to equation (7) [6, 7]. The Saturation block limits the value of the torque at the level $\pm M_{\max}$ implementing the "a b" section of the mechanical characteristic. The structure of the mechanical part repeats the structural diagram (Fig. 2). The value of the variable mass is obtained at the output of Integrator 3 by integrating the productivity q (kg/s). At the output of the comparison block (Relational Operator), a logical signal "1" is formed when $L < L_T$, otherwise ($L \geq L_T$) the output will be "0". Consequently, the increase in mass will occur until the belt passes the distance L_T , after which the input of integrator 3 will be 0, and the output will be a constant value of the mass of bulk material Q_{mc} , which corresponds to the maximum load. The described structure implements the formation of m_v with simplification of the unloading processes. In general, for the precise (two-stage) formation of variable mass, the described structure must be complicated.

Fig. 5 shows the results of modeling the conveyor acceleration process with no material on the belt, fully loaded and gradual loading.

The system was modeled with the following parameters:

$$V_{\max} = 2.5 \text{ m/s}; L_T = 6 \text{ m}; q_p = 25 \text{ kg/m}.$$

(constant mass of conveyor elements, $m_c = 150 \text{ kg}$)

Engine parameters:

$$P_H = 1.2 \text{ kW}; \omega_0 = 104.7 \text{ s}^{-1}; \omega_H = 92.6 \text{ s}^{-1};$$

$$\lambda_M = 2; J_d = 0.0575 \text{ кгм}^2.$$

$$(M_{\max} = 25.8 \text{ Нм}, K_M = 2.47).$$

$$\text{Gear ratio } j = \omega_H / V_m = 37 \text{ m}^{-1};$$

$$\text{Coefficient of friction } K_c = 0.1;$$

With two performance values:

– $Q_1 = 75 \text{ t/h} = 20.83 \text{ kg/s}$, (mass of material at full conveyor load $Q_{mc} = q_1 L_T / V_{\max} = 50 \text{ kg}$);

– $Q_2 = Q_1 \cdot 5 = 375 \text{ т/год} = 104.1 \text{ kg/s}$,
($Q_{mc} = 250 \text{ kg}$).

As can be seen from Fig. 5, at a performance level of Q_1 , the change in dynamic torque during start-up is insignificant and the nature of the speed change is practically linear. However, when operating at a performance level of Q_2 , the influence of the sliding static torque on the acceleration dynamics is significant, which is reflected in an increase in the acceleration time and a curvature of the $\omega(t)$ curve.

We see that the influence of the variable mass (Q_i) on the dynamics is significant when its value at maximum load (Q_{mc}) is commensurate with the constant mass (m_c) and greater than it.

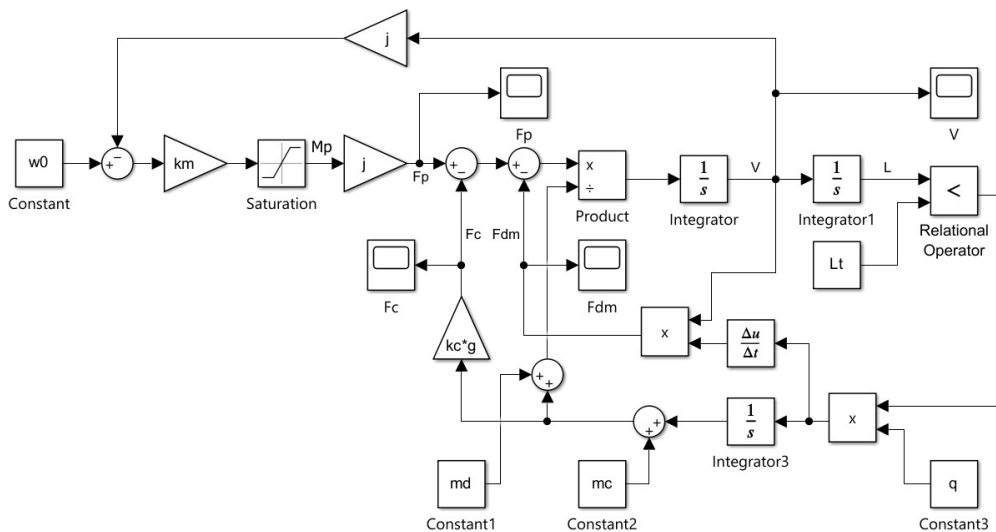


Fig. 4. Digital mathematical model of an electromechatronic system (conveyor) in the MATLAB / Simulink environment

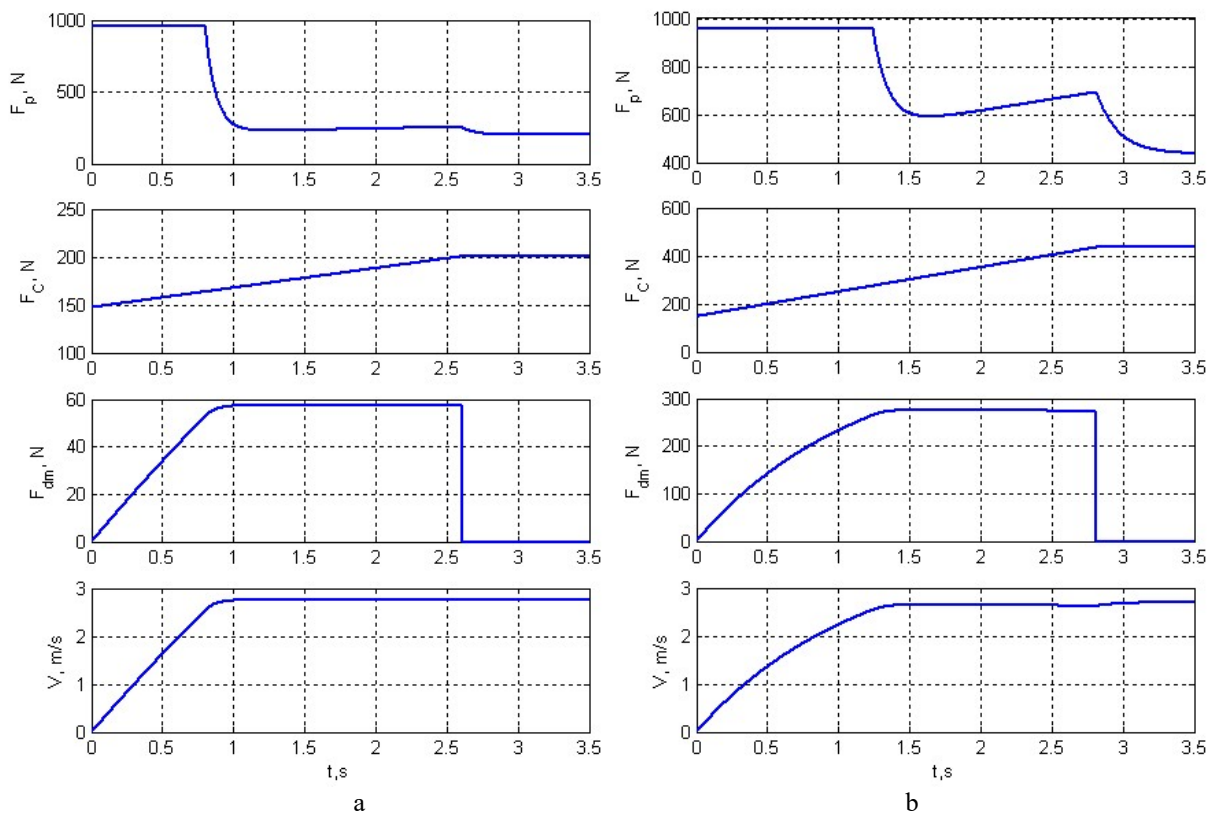


Fig. 5. Transient processes of conveyor start-up at:
a – $Q = 75$ t/h; b – $Q = 375$ t/h

The results obtained during the modeling of the electromechatronic system of the conveyor loader are of significant practical significance and can be used in several key areas [8]. First of all, they form the basis for improving electric drive control systems, in particular for the development of adaptive and robust algorithms capable of effectively compensating for the influence of variable parameters and ensuring stable operation under uneven loads [9, 10].

Furthermore, the simulation results can be used to optimize conveyor equipment operating modes to reduce energy consumption and improve overall system efficiency. Dynamic process analysis allows for the determination of optimal speed modes, reduction of peak loads, and avoidance of electric drive overloads.

An important area of application is improving the reliability and durability of equipment. Modeling allows us to identify critical operating modes that cause excessive mechanical and electrical loads and develop measures to minimize them. This helps reduce wear on structural components and decrease the likelihood of emergency situations.

Furthermore, the research results can be used during the design phase of new transport systems,

such as conveyors and roller tables, to support the informed selection of equipment parameters, including electric motor power, transmission mechanism characteristics, and control systems. They are also useful for creating digital twins of conveyor systems, enabling the prediction of their performance under various operating conditions.

Thus, the simulation results have both theoretical and practical value, helping to improve the efficiency, reliability and adaptability of electromechatronic systems with variable parameters.

Conclusions. This article examines an electromechatronic system with variable parameters and conducts simulations using a conveyor mechanism as an example. The analysis revealed that conveyor systems are characterized by significant parameter variations, particularly load, moment of resistance, and inertial characteristics, which leads to nonlinear dynamics and complicates control processes. Given the complexity of the processes, mathematical modeling is the only method for studying processes in mechanical systems with variable parameters.

A short conveyor loader operating in reversible mode to dispense bulk material into passing

containers was considered as a system for studying the influence of mass variability on its dynamics.

A mathematical model of the conveyor loader's electromechatronic system was developed. This model accounts for parameter changes over time and allows for the study of real dynamic processes within the system. Based on the simulation, the influence of variable load on key operating modes was analyzed, specifically, the conveyor acceleration process with no material on the belt, with a fully loaded belt, and with gradual loading.

The study was conducted at two performance levels: $Q_1 = 75$ t/h and $Q_2 = 75$ t/h. It was found that at a performance level of Q_1 , the change in dynamic torque during start-up is insignificant, and the speed change is virtually linear. However, when operating at a performance level of Q_2 , the influence of the sliding static torque on acceleration dynamics is significant, resulting in an increase in acceleration time and a curve curvature $\omega(t)$. The simulation results showed that the influence of variable mass on dynamics is significant when its value at maximum load is comparable to or greater than the constant mass. The simulations allowed us to establish patterns in the influence of parameter changes on the stability, accuracy, and quality of the system's transient processes.

The obtained results have practical significance and can be used in the design and modernization of control systems, particularly for selecting controller structures, adjusting their parameters, and developing adaptive and robust control algorithms. Application of the proposed approaches will contribute to increased efficiency of transport mechanisms, improving their energy performance and reliability under conditions of uncertainty and variable loads.

Using the simulation results will improve the efficiency of the transport mechanism's electric drive control by adapting to changing operating conditions, reducing energy consumption, and lowering the level of dynamic loads on system components. This, in turn, will contribute to increased reliability and durability of the equipment.

The feasibility of applying the obtained results to the design and modernization of transport mechanisms, as well as the development of modern automated control systems, is substantiated. A promising direction for further research is the

implementation of intelligent control methods and the creation of digital models capable of operating in real time.

References

1. Shevchenko I.S., Morozov D.I. Dynamics of complex electromechanical systems: navchal'nyj posibnyk. Alchevs'k: DonDTU. 2008. 171 p.
2. Rudniev Y., Romanchenko J., Romanchenko O. Study of Impact Phenomenon in Mechatronic Systems Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022, 2022, p. 1-6.
3. Bogomaz V. M., Nagachevskyi V. J. Research of the Influence of Design Parameters of a Scraper Conveyor with an Upper Working Branch on its Technical Characteristics. Science and Transport Progress, 2025, 1(109), 93–103.
4. Liashenko, O., Starodubcev, N., Makarenko, H., & Pashchenko, A. Control of electromechanical systems of conveyor lines. Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries, 2024, 4(30), 85–96.
5. Tamm C., Perfetto S. Design and Optimization of Mechatronic Systems Using a Holistic and Parametric Simulation Approach IFAC-PapersOnLine, Vol.52, 271-276p.
6. Tikhonov, V., Tykhonova, O., Tsyra, O., Yavorska, O., Taher A., Kolyada, O., Kotova, S., Semenchko, O., & Shapenko, E. Modeling the conveyor-modular transfer of multimedia data in a sensor network of transport system. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2019, 22 (98), 6–14.
7. Baltas G.N., Lai N.B., Tarraso A., Marin L., Blaabjerg F. and Rodriguez P. AI-Based Damping of Electromechanical Oscillations by Using Grid-Connected Converter, Frontiers in Energy Research, Volume 9, 2021.
8. Loveikin V., Romasevich Y., Kulpin R., Pochka K. Belt conveyor starting mode optimization. Strength of Materials and Theory of Structures. 2024. № 112, 170-184.
9. Rudniev, Y., Romanchenko, J., Morneva, M. Investigation of Oscillatory Processes in Mechatronic Systems with a Robust H_∞ -controller Proceedings of the 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System Mees 2023 Open source preview, 2023.
10. Rudniev Ye.S., Gritsyuk V.Yu., Scherbak V.V. Synthesis and Analysis of Sensitivity of the Robust Control System of a Synchronous Electric Drive. Collection of Scientific Papers of DonSTU 2018. 1 (47) 101-108 (8).

Руднєв Є.С., Романченко Ю.А. Дослідження електромехатронних систем зі змінними параметрами на прикладі транспортуючого механізму.

В статті представлений аналіз впливу змінності маси системи на її динаміку в електромехатронних системах.

Показано, що особливої актуальності набувають електромехатронні системи зі змінними параметрами, функціонування яких супроводжується динамічною зміною масових, інерційних, силових і кінематичних характеристик у процесі роботи. Зазначені зміни зумовлюються варіацією навантаження, нерівномірністю подачі матеріалу, зміною швидкісних режимів та впливом зовнішніх факторів, що істотно ускладнює процеси керування. Це обумовлює необхідність застосування сучасних методів математичного моделювання та аналізу для забезпечення ефективного функціонування таких систем. Показано, що одним із типових представників електромехатронних систем зі змінними параметрами є транспортуючі механізми, зокрема конвеєри. Встановлено, що у загальному випадку в механічній системі виникає три види динамічних сил (моментів): перші з них виникають при зміні швидкості системи, другі – маси (моменту інерції), треті – передатного числа. Тому можлива дуже велика кількість варіантів поведінки системи.

Враховуючи складність перебігу, встановлено, що єдиним методом дослідження процесів в механічних системах зі змінними параметрами може бути математичне моделювання. У дослідженнях використовується пакет прикладних програм – MATLAB / Simulink. В якості системи для дослідження впливу змінності маси системи на її динаміку, розглянуто короткий конвеєрний завантажувач, що працює у реверсивному режимі для дозування сипучого матеріалу в ємності, які рухаються повз нього. Наведено та детально проаналізовано кінематичну та структурну схеми завантажувача з урахуванням взаємозв'язків між

його основними елементами, що дозволило відобразити особливості передачі руху та формування робочих режимів. Описано принцип функціонування окремих вузлів і їх вплив на загальну динаміку системи. Крім того, досліджено механічну характеристику електроприводу завантажувача, визначено її основні параметри та закономірності зміни залежно від навантаження і режимів роботи, що є важливим для подальшого аналізу та синтезу систем керування.

Подано цифрову модель цієї механічної системи в середовищі Simulink пакета MATLAB. Змодельовано процес розгону конвеєра при відсутності матеріалу на стрічці, повністю завантаженого та при поступовому завантаженні. В результаті цього отримано перехідні процеси пуску конвеєра при різних значеннях продуктивності. Встановлено, що вплив змінної маси на динаміку суттєвий, коли її значення при максимальному завантаженні сумірне з незмінною масою і більше її.

Ключові слова: *електромехатронні системи, змінні параметри, транспортуючий механізм, динамічні характеристики, продуктивність, перехідні процеси, система керування.*

Руднєв Є.С. – д.т.н., доц., професор кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, ORCID ID: 0000-0002-4236-8407 rudnev_es@snu.edu.ua

Романченко Ю.А. – к.т.н., доц., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, ORCID ID: 0000-0001-6579-6474 romanchenko_ja@snu.edu.ua

Дата першого надходження статті 06.02.2026.
Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.03.2026.
Дата публікації 11.05.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-301-3-80-86>

УДК 004.9:37.091.33:004.89

АНАЛІТИЧНА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ РЕЗУЛЬТАТІВ STEM-ОСВІТИ

Асманкіна А.А., Сотнікова Т.Г.

ANALYTICAL COMPUTER-INTEGRATED SYSTEM FOR MONITORING STEM EDUCATION OUTCOMES

Asmankina A.A., Sotnikova T.H.

У статті розглянуто проблему автоматизації процесів моніторингу результатів STEM-освіти в умовах цифровізації освітнього середовища та зростання обсягів освітніх даних. Сучасні STEM-підходи передбачають інтеграцію навчальних результатів з різних дисциплін, проєкту та дослідницьку діяльність, що ускладнює їх об'єктивне оцінювання за допомогою традиційних, переважно ручних і фрагментарних методів моніторингу. Недостатня системність обробки освітніх даних знижує оперативність аналізу та ефективність управлінських рішень у сфері освіти. Метою статті є розробка та дослідження підходів до створення інформаційної системи автоматизованого моніторингу результатів STEM-освіти на основі комп'ютерно-інтегрованих технологій. Запропоновано концепцію комп'ютерно-інтегрованої системи, яка забезпечує централізований збір, зберігання, обробку та аналіз освітніх даних, а також формування узагальнених показників результатів навчання.

У роботі розглянуто структурну організацію системи, інформаційні потоки та алгоритми автоматизованої обробки освітніх даних. Запропоновано застосування моделей аналізу результатів STEM-освіти, що забезпечують інтегральне оцінювання навчальних досягнень та підтримку прийняття управлінських рішень. Практичне значення запропонованого підходу полягає у можливості впровадження комп'ютерно-інтегрованої системи моніторингу в закладах загальної середньої та вищої освіти з метою підвищення об'єктивності оцінювання, оперативності аналізу та ефективності управління освітнім процесом у STEM-напрямі.

Використання таких систем сприяє більш усвідомленому аналізу навчальних досягнень

здобувачів освіти, дозволяє викладачам оперативно реагувати на зміни в освітньому процесі та формувати індивідуалізовані освітні траєкторії.

Окрему увагу приділено реалізації демонстраційного веб-прототипу аналітичного модуля, який підтверджує працездатність запропонованого алгоритму нормалізації та інтегрального оцінювання результатів STEM-освіти, а також демонструє можливість його практичного використання в умовах сучасного цифрового освітнього середовища.

Ключові слова: STEM-освіта, комп'ютерно-інтегрована система, освітня аналітика.

Вступ. У сучасних умовах цифрової трансформації освіти особливої актуальності набуває створення комп'ютерно-інтегрованих аналітичних систем, здатних автоматично обробляти великі обсяги різномірних освітніх даних та формувати узагальнені показники результативності навчання. Сучасний етап розвитку освіти характеризується активним упровадженням STEM-підходів, спрямованих на інтеграцію знань з науки, технологій, інженерії та математики з практичною діяльністю здобувачів освіти. Така інтеграція зумовлює підвищені вимоги не лише до організації освітнього процесу, а й до об'єктивного, системного та оперативного моніторингу результатів навчання. У межах STEM-освіти результати діяльності здобувачів формуються на основі різномірних показників, які включають результати тестування, виконання лабораторних і проєктних робіт,

міждисциплінарні завдання та дослідницьку активність, що суттєво ускладнює їх комплексне оцінювання.

В умовах цифровізації освітнього середовища обсяги освітніх даних постійно зростають, а традиційні підходи до моніторингу результатів STEM-освіти, що ґрунтуються на ручній обробці та фрагментарному аналізі інформації, не забезпечують достатнього рівня оперативності та аналітичної глибини. Це ускладнює своєчасне виявлення проблемних аспектів навчального процесу та знижує ефективність управлінських рішень у сфері освіти. Виникає потреба у використанні автоматизованих засобів збору, обробки та аналізу освітніх даних, здатних працювати з багатокомпонентними інформаційними потоками.[1-3]

Одним із перспективних напрямів розв'язання зазначеної проблеми є застосування комп'ютерно-інтегрованих систем, які дозволяють об'єднати процеси моніторингу, аналізу та оцінювання результатів STEM-освіти в єдину інформаційну систему. Такі системи забезпечують централізований збір даних, їх структурування, формування узагальнених показників та створюють основу для підтримки прийняття управлінських рішень. Автоматизація процесів моніторингу сприяє підвищенню об'єктивності оцінювання, зменшенню впливу суб'єктивних чинників та підвищенню ефективності управління освітнім процесом.

Незважаючи на наявність окремих програмних рішень для обліку навчальних досягнень, більшість із них не враховує специфіку STEM-освіти, яка характеризується міждисциплінарністю, проектною спрямованістю та необхідністю комплексного аналізу результатів навчання. Це зумовлює актуальність розробки та дослідження комп'ютерно-інтегрованих систем автоматизованого моніторингу результатів STEM-освіти, орієнтованих на підтримку освітньої аналітики та підвищення якості управління освітнім процесом.

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є розробка та обґрунтування підходів до автоматизації процесів моніторингу результатів STEM-освіти на основі комп'ютерно-інтегрованих систем, що забезпечують ефективний збір, обробку та аналіз освітніх даних для підтримки управлінських рішень. Для досягнення поставленої мети у статті розв'язуються такі

завдання: аналіз процесу моніторингу результатів STEM-освіти як об'єкта автоматизації; розробка концептуальної структури інформаційної системи автоматизованого моніторингу та визначення основних інформаційних потоків; формалізація алгоритмів обробки й аналізу освітніх даних у межах комп'ютерно-інтегрованої системи.

Наукова новизна роботи полягає у поєднанні інтегральної моделі оцінювання результатів STEM-навчання з клієнтською веб-реалізацією аналітичного модуля та архітектурно передбаченою інтеграцією з LMS-платформами, що формує основу комп'ютерно-інтегрованої системи освітнього моніторингу.[4]

Основна частина. Процес моніторингу результатів STEM-освіти характеризується складною структурою інформаційних потоків та значною кількістю різноманітних показників, що відображають навчальні досягнення здобувачів освіти. До таких показників належать результати тестового контролю, виконання лабораторних і практичних робіт, проектної та дослідницької діяльності, а також інтегральні показники сформованості компетентностей. Інформація надходить з різних джерел, має різні формати подання та часову динаміку, що ускладнює її узагальнення та аналіз у межах традиційних підходів до оцінювання.[5]

Традиційні методи моніторингу результатів STEM-освіти, як правило, ґрунтуються на ручному зборі та обробці даних або використанні окремих програмних засобів, не інтегрованих у єдину систему. Такий підхід призводить до фрагментарності інформації, значних часових витрат на її обробку та підвищення ризику суб'єктивних помилок. Крім того, відсутність централізованої системи аналізу ускладнює формування узагальнених показників та знижує ефективність застосування результатів моніторингу для прийняття управлінських рішень у сфері STEM-освіти. У зв'язку з цим процес моніторингу доцільно розглядати як об'єкт автоматизації, що потребує застосування системного та комп'ютерно-інтегрованого підходу.

Для розв'язання зазначених проблем у роботі запропоновано концепцію комп'ютерно-інтегрованої системи моніторингу результатів STEM-освіти, яка дозволяє об'єднати процесів збору, зберігання, обробки та аналізу освітніх даних. Структура системи передбачає наявність підсистем введення даних, централізованої бази даних, аналітичного модуля та модуля

формування результатів моніторингу. База даних використовується для накопичення та структурованого зберігання інформації про навчальні результати, що забезпечує цілісність даних і можливість їх подальшого аналізу.[6, 7]

Запропонований алгоритм формує основу функціонування комп'ютерно-інтегрованої системи та забезпечує узгодженість усіх етапів обробки освітніх даних. Алгоритм обробки освітніх даних у комп'ютерно-інтегрованій системі (рис. 1) включає етапи попередньої обробки, нормалізації показників, формування інтегральних оцінок та аналітичних показників результатів STEM-освіти. На основі отриманих даних реалізується підтримка прийняття управлінських рішень шляхом формування узагальнених звітів, візуалізації результатів моніторингу та виявлення тенденцій у навчальному процесі. Запропонований підхід забезпечує підвищення об'єктивності оцінювання, скорочення часових витрат на аналіз освітніх даних та створює передумови для ефективного управління освітнім процесом у STEM-напрямі.[8]

Алгоритм автоматизованої обробки та аналізу освітніх даних

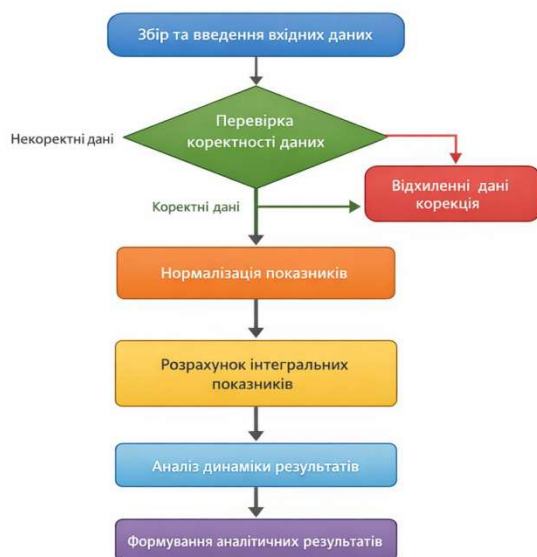


Рис. 1. Розроблений алгоритм автоматизованої обробки та аналізу освітніх даних, який є основою функціонування комп'ютерно-інтегрованої системи моніторингу результатів STEM-освіти

Для перевірки працездатності алгоритму нормалізації та формування інтегрального показника розроблено демонстраційний веб-прототип комп'ютерно-інтегрованої системи моніторингу. Прототип реалізує введення показників, їх нормалізацію в інтервалі $[0;1]$ з

урахуванням прямої/зворотної спрямованості та розрахунок ISTEM як зваженої суми.

Прототип забезпечує введення показників навчальної діяльності, їх нормалізацію відповідно до заданих діапазонів значень та напрямку впливу показників, а також автоматичне обчислення інтегрального показника ISTEM як зваженої адитивної моделі. Архітектура прототипу базується на клієнтській веб-реалізації, що імітує взаємодію підсистем збору даних, аналітичної обробки та візуалізації результатів моніторингу.[9]

Такий підхід дозволяє продемонструвати принципи функціонування комп'ютерно-інтегрованої системи без необхідності розгортання повноцінної серверної інфраструктури та може бути використаний як основа для подальшої розробки програмно-апаратного рішення.

Демонстраційний веб-прототип комп'ютерно-інтегрованої системи моніторингу (рис. 2) реалізує повний цикл автоматизованої обробки освітніх даних. На першому етапі користувач вводить або імпортує набір показників, що характеризують результати STEM-навчання, зокрема результати тестування, лабораторних робіт, проєктної діяльності та навчальної активності. Програмна частина прототипу, реалізована засобами HTML та JavaScript, виконує попередню обробку даних і здійснює їх лінійну нормалізацію відповідно до заданих діапазонів значень та напрямку впливу показників.[10] Далі система автоматично обчислює інтегральний показник ISTEM як зважену адитивну модель, що дозволяє об'єднати різномірні характеристики навчальної діяльності в єдиний кількісний індикатор. Наступним етапом є візуалізація результатів у вигляді таблиць і графічних діаграм, що забезпечує швидке порівняння результатів між записами та сприяє аналітичному осмисленню даних.[11] Прототип працює у клієнтському веб-середовищі без необхідності серверної інфраструктури, що демонструє можливість інтеграції алгоритмів моніторингу в освітні інформаційні системи різних рівнів — від закладів загальної середньої освіти до закладів вищої освіти. Основною метою розробленого програмного інструменту є спрощення процесу аналізу результатів STEM-освіти, підвищення об'єктивності оцінювання та підтримка прийняття управлінських рішень на основі цифрових освітніх даних.

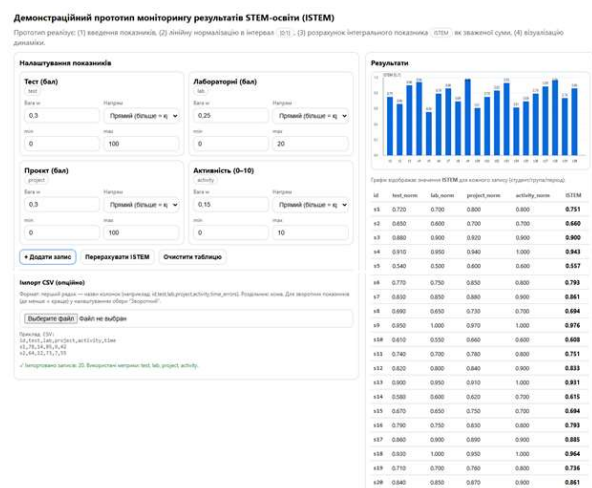


Рис. 2. Візуалізація інтегрального показника ISTEM у демонстраційному веб-прототипі системи моніторингу

З точки зору програмної архітектури розроблений прототип має модульну структуру та умовно поділяється на три функціональні компоненти: модуль введення даних, модуль аналітичної обробки та модуль візуалізації результатів.[12] Модуль введення забезпечує імпорт та редагування показників STEM-навчання, аналітичний модуль реалізує алгоритми нормалізації та обчислення інтегрального показника ISTEM, тоді як модуль візуалізації відповідає за графічне представлення результатів моніторингу.

Такий підхід відповідає принципам побудови комп'ютерно-інтегрованих систем і створює основу для подальшого розширення функціоналу, зокрема інтеграції з базами даних або освітніми платформами.

Перспективним напрямом розвитку запропонованої системи є інтеграція з існуючими системами управління навчанням, зокрема Moodle, що дозволить автоматизувати збір даних із електронних журналів оцінювання та мінімізувати ручне введення інформації.[13] Застосування API платформи LMS дозволяє можливість формування єдиного інформаційного простору моніторингу результатів STEM-освіти та підвищує рівень автоматизації освітньої аналітики.

Запропонована архітектура інтеграції (рис. 3) демонструє можливість автоматизованого обміну освітніми даними між системами управління навчанням та аналітичними модулями моніторингу. Застосування стандартизованих інтерфейсів взаємодії забезпечує масштабованість рішення та створює передумови для подальшого розвитку цифрових

інструментів оцінювання результатів STEM-освіти.[14] Інтеграція з LMS-платформами розглядається як ключовий елемент переходу від локальних прототипів до повноцінних комп'ютерно-інтегрованих освітніх систем.



Рис. 3. Схема інтеграції LMS Moodle з аналітичним модулем ISTEM у структурі комп'ютерно-інтегрованої системи моніторингу

Таким чином, запропонована концепція системи, алгоритмічна модель обробки даних та реалізований веб-прототип формують цілісну основу для експериментальної перевірки ефективності автоматизованого моніторингу результатів STEM-освіти.

Результати та їх обговорення. Результати дослідження свідчать, що автоматизація процесів моніторингу результатів STEM-освіти дозволяє суттєво підвищити оперативність та об'єктивність аналізу освітніх даних. Застосування комп'ютерно-інтегрованої системи забезпечує централізований збір і обробку інформації, зменшує часові витрати на аналіз результатів навчання та мінімізує вплив суб'єктивних чинників, притаманних традиційним методам оцінювання. Це створює умови для своєчасного виявлення проблемних аспектів освітнього процесу та оперативного коригування навчальних траєкторій.

Отримані результати узгоджуються з сучасними тенденціями розвитку освітньої аналітики, де інтегральні показники розглядаються як ефективний інструмент узагальнення різномірних навчальних даних та підтримки прийняття рішень на основі доказового підходу.

Перевагою запропонованого підходу є комплексний характер моніторингу, що поєднує різномірні показники результатів STEM-освіти в єдиній інформаційній системі та забезпечує формування інтегральних оцінок навчальних досягнень. Запропонована структура системи та алгоритми обробки даних дозволяють здійснювати аналітичну обробку результатів у статичних і динамічних режимах, а також формувати аналітичну інформацію для

підтримки прийняття управлінських рішень на різних рівнях управління освітнім процесом.

1) Нормалізація (лінійна):

$$x_i^{\text{норм}} = \frac{x_i - x_i^{\min}}{x_i^{\max} - x_i^{\min}}$$

де x_i — початкове значення i -го освітнього показника;

$x_i^{\min}$ — мінімальне допустиме або спостережуване значення i -го показника;

$x_i^{\max}$ — максимальне допустиме або спостережуване значення i -го показника;

$x_i^{\text{норм}}$ — нормалізоване значення показника, приведене до інтервалу $[0; 1]$.

2) Для показників із зворотною спрямованістю (наприклад, кількість помилок/час)

$$x_i^{\text{норм}} = \frac{x_i^{\max} - x_i}{x_i^{\max} - x_i^{\min}}$$

3) Інтегральний показник результатів STEM-освіти

$$I^{\text{STEM}} = \sum_{i=1}^n w_i x_i^{\text{норм}}$$

4) Умова для ваг

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1, w_i \geq 0$$

На першому етапі використовується лінійна нормалізація, яка переводить початкове значення показника x_i у безрозмірну величину $x_i^{\text{норм}}$ в межах інтервалу $[0; 1]$. Для цього враховуються мінімальне та максимальне можливі або спостережувані значення показника $x_i^{\min}$ та $x_i^{\max}$. Такий підхід уніфікує дані та робить їх порівнюваними незалежно від початкової шкали.

У випадках, коли показник має зворотну спрямованість — тобто менше значення відповідає кращому результату, наприклад кількість помилок або час виконання — застосовується модифікована формула нормалізації. Це дозволяє зберегти єдину інтерпретацію: більші нормалізовані значення завжди означають кращий результат.

Після нормалізації формується інтегральний показник результатів STEM-освіти I^{STEM} як зважена сума нормалізованих

показників. Вагові коефіцієнти w_i відображають значущість кожного компонента, а їх сума дорівнює одиниці, що забезпечує коректність інтегральної оцінки.

Таким чином, запропонована модель дозволяє кількісно та об'єктивно оцінювати результати STEM-освіти і надалі аналізувати їх у статичному та динамічному режимах моніторингу.

Тестування веб-прототипу на модельних наборах даних підтвердило коректність роботи етапів нормалізації та формування інтегрального показника, а візуалізація ISTEM забезпечує швидке порівняння результатів між записами та підтримує прийняття управлінських рішень.

Для перевірки працездатності алгоритму нормалізації та інтегрального оцінювання було сформовано модельний набір даних із 20 записів, що відображають результати тестування, лабораторних робіт, проектної діяльності та навчальної активності. Дані були імпортовані у розроблений веб-прототип системи моніторингу, який автоматично виконує нормалізацію показників у межах інтервалу $[0; 1]$ та обчислює інтегральний показник ISTEM. Отримані результати підтвердили коректність алгоритму обробки та можливість візуального аналізу динаміки результатів STEM-навчання.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості впровадження комп'ютерно-інтегрованої системи моніторингу в закладах загальної середньої та вищої освіти для підвищення якості оцінювання результатів STEM-освіти. Застосування автоматизованого підходу сприяє підвищенню прозорості освітньої аналітики, оптимізації управління навчальним процесом та створенню передумов для подальшого розвитку цифрових освітніх середовищ.

Застосування демонстраційного прототипу підтвердило, що навіть клієнтські веб-рішення можуть виступати ефективною основою для побудови комп'ютерно-інтегрованих систем моніторингу, забезпечуючи оперативність обробки даних та наочність представлення результатів STEM-навчання.

Висновки. Процес моніторингу результатів STEM-освіти характеризується багатокомпонентністю інформаційних потоків і різномірністю показників навчальних досягнень, що зумовлює доцільність його розгляду як об'єкта автоматизації з застосуванням комп'ютерно-інтегрованих

підходів. Запропонована концепція комп'ютерно-інтегрованої системи моніторингу забезпечує централізований збір, зберігання та обробку освітніх даних, що дозволяє підвищити цілісність інформації та ефективність аналітичної обробки результатів STEM-освіти. Реалізація алгоритмів автоматизованої обробки та інтегрального оцінювання результатів навчання сприяє підвищенню об'єктивності моніторингу та зменшенню впливу суб'єктивних чинників, притаманних традиційним методам оцінювання. Застосування комп'ютерно-інтегрованої системи створює передумови для підтримки прийняття управлінських рішень у закладах загальної середньої та вищої освіти на основі аналітичних даних про результати STEM-освіти. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшого розвитку автоматизованих систем освітньої аналітики та вдосконалення цифрових освітніх середовищ у STEM-напрямі.

Реалізація демонстраційного веб-прототипу підтвердила можливість практичного впровадження запропонованого підходу без складної серверної інфраструктури та засвідчила ефективність застосування інтегрального показника ISTEM для аналітичної підтримки освітнього процесу. Отже, перспективним напрямом подальших досліджень є інтеграція системи з LMS-платформами, зокрема Moodle, що дозволить автоматизувати збір даних із електронних журналів та розширити можливості освітньої аналітики.

Література

- Hall O., O'Neill M., Murphy P. *Computer-Integrated Information Systems: Analysis and Design*. London : Springer, 2019. 312 p.
- Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems // *Manufacturing Letters*. 2015. Vol. 3. P. 18–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>.
- Romero C., Ventura S. Educational data mining and learning analytics: an updated survey // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*. 2020. Vol. 10, no. 3. DOI: <https://doi.org/10.1002/widm.1355>
- Siemens G., Long P. Penetrating the fog: analytics in learning and education // *EDUCAUSE Review*. 2011. Vol. 46, no. 5. P. 30–40.
- Dawson S., Gašević D., Siemens G. Learning analytics: measurement innovations to support employee development // *Journal of Workplace Learning*. 2019.
- ISO/IEC 25010:2011. *Systems and software engineering – Systems and software quality requirements and evaluation (SQuaRE)*. International Organization for Standardization, 2011.
- Gartner. *Analytics ascendancy model: a framework for implementing data-driven decision making*. Gartner Research, 2021.
- Chatti M. A., Dyckhoff A. L., Schroeder U. A reference model for learning analytics // *International Journal of Technology Enhanced Learning*. 2018.
- Shute V. J., Kim Y. J. Formative and stealth assessment // *Handbook of Research on Educational Communications and Technology*. New York : Springer, 2020.
- UNESCO. *Artificial intelligence and education: guidance for policy-makers*. Paris : UNESCO Publishing, 2021.
- Kitchin R. *The data revolution: big data, open data, data infrastructures and their consequences*. London : SAGE Publications, 2019. 240 p.
- Siemens G., Baker R. S. J. d. Learning analytics and educational data mining: towards communication and collaboration // *Proceedings of the 2nd International Conference on Learning Analytics and Knowledge*. New York : ACM, 2012. P. 252–254. DOI: <https://doi.org/10.1145/2330601.2330661>.
- Ferguson R. Learning analytics: drivers, developments and challenges // *International Journal of Technology Enhanced Learning*. 2012. Vol. 4, № 5–6. P. 304–317. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJTEL.2012.051816>
- Dougiamas M., Taylor P. C. Moodle: using learning communities to create an open source course management system // *Proceedings of the World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia and Telecommunications*. 2003. P. 171–178.

Asmankina A.A., Sotnikova T.H. Analytical computer-integrated system for monitoring stem education outcomes

The article addresses automation of STEM education outcome monitoring processes under conditions of educational environment digitalization and increasing educational data volume. Modern STEM approaches involve integration of learning outcomes across disciplines, as well as project-based and research activities, which complicates objective assessment using traditional, mainly manual and fragmented monitoring methods. Insufficient systematization of educational data processing reduces analysis efficiency and limits effectiveness of decision-making in education.

The study aims to develop and investigate approaches to designing an automated STEM education

outcome monitoring information system based on computer-integrated technologies. A computer-integrated system concept is proposed, ensuring centralized data collection, storage, processing, and analysis, as well as generation of generalized learning outcome indicators.

The paper examines system structural organization, information flows, and automated educational data processing algorithms. Application of STEM education outcome analysis models is proposed, enabling integral assessment of learning achievements and supporting decision-making processes. Practical significance of the proposed approach lies in the possibility of implementing a computer-integrated monitoring system in secondary and higher education institutions to improve assessment objectivity, increase analysis efficiency, and enhance STEM education process management.

Such systems support more meaningful analysis of student learning outcomes, enable instructors to respond promptly to changes in the educational process, and facilitate development of individualized learning trajectories.

Particular attention is given to implementation of a demonstration web-based analytical module prototype, confirming functionality of the proposed normalization and integral evaluation algorithm for STEM education

outcomes and demonstrating its applicability within modern digital educational environments.

Keywords: *STEM education, computer-integrated system, educational analytics.*

Асманкіна Анастасія Анатоліївна – асистент кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля.

ORCID [0000-0002-1484-6037](https://orcid.org/0000-0002-1484-6037)

Сотнікова Тетяна Генадіївна – к.т.н., доц., кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля.

ORCID: [0000-0001-6929-7672](https://orcid.org/0000-0001-6929-7672)

Дата першого надходження статті 10.02.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.03.2026.

Дата публікації 11.05.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-301-3-87-93>

УДК 681.322

ВПЛИВ ФУНКЦІЇ АКТИВАЦІЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ НА АПРОКСИМАЦІЮ ДАНИХ ОСНОВНИХ КАНАЛІВ КЕРУВАННЯ В ПЕРІОД ПУСКУ РЕАКТОРУ СИНТЕЗУ ОЦТОВОЇ КИСЛОТИ

Поркуян О.В., Самойлова Ж.Г.

THE INFLUENCE OF THE ACTIVATION FUNCTION OF A NEURAL NETWORK ON THE APPROXIMATION OF DATA FROM THE MAIN CONTROL CHANNELS DURING THE START-UP OF AN ACETIC ACID SYNTHESIS REACTOR

Porkuian O.V., Samojlova Zh.G.

Сучасні промислові технології синтезу оцтової кислоти та її похідних переважно базуються на високоефективних каталітичних методах, серед яких провідне місце посідає карбонілювання метанолу (процеси Monsanto та Cativa). Ефективність таких виробництв безпосередньо залежить від роботи хімічних реакторів, що становлять апаратну основу галузі. В умовах високої ринкової конкуренції критично важливим є забезпечення суворої відповідності продукції галузевим специфікаціям, що потребує точного моніторингу та контролю вхідних і вихідних параметрів технологічного процесу.

Найбільш поширений підхід передбачає використання нейромереж як моделей «чорної скриньки». На основі емпіричних даних об'єкта підбирається архітектура мережі та здійснюється її навчання (налаштування вагових коефіцієнтів) для досягнення максимальної адекватності моделі. Надалі отримані моделі інтегруються в системи предиктивного керування (Model Predictive Control, MPC).

Вихід реактора синтезу оцтової кислоти (зокрема в процесі карбонілювання метанолу на родієвому каталізаторі) на робочий режим є складним динамічним процесом. Під час пуску система переходить із інертного стану в активну фазу реакції, що супроводжується різким зростанням тиску та інтенсивним екзотермічним ефектом.

Застосування штучних нейронних мереж на цьому етапі дає змогу мінімізувати перерегулювання — критичну проблему керування, що загрожує спрацюванням систем аварійного захисту та скиданням параметрів.

Чисельне моделювання здійснювалося в середовищі MATLAB (версія 2021) із застосуванням ітераційної процедури структурного синтезу нейронної мережі. Емпіричною базою дослідження слугували статистичні дані динаміки реактора синтезу оцтової кислоти у пусковий період.

Похибки моделювання за оксидом вуглецю майже ідентичні результатам за метанолом, що вказує на симетричність впливу обох реагентів на вихідні параметри реактора. Для каналів регулювання тиску, температури та рівня незалежно від вхідного впливу (метанол чи CO) оптимальною є архітектура з лінійною функцією активації *purelin* на вихідному шарі. Це забезпечує високу точність апроксимації з похибкою не більше 1.6%.

Канал концентрації оцтової кислоти виявився найбільш складним для моделювання за обома входами (мінімальна похибка 53.71%). Це вказує на те, що для прогнозування якості продукту в момент пуску стандартної структури мережі недостатньо — необхідно враховувати динамічну затримку (інерційність) або збільшувати глибину мережі.

Ключові слова: нейронні мережі, зворотне поширення помилки, реактор

Вступ. Завдяки своїм унікальним властивостям оцтова кислота є незамінною у багатьох сферах. У харчовому секторі вона допомагає зберігати продукти та входить до складу популярних соусів. У легкій промисловості з неї отримують синтетичні волокна (ацетилцелюлозу або штучний шовк) та

стійкі барвники для тканин. Окрім того, вона є сировиною у хімічному синтезі ацетону та фармацевтичному виробництві, зокрема при створенні аспірину.

Сучасні промислові технології синтезу оцтової кислоти та її похідних переважно базуються на високоефективних каталітичних методах, серед яких провідне місце посідає карбонілювання метанолу (процеси Monsanto та Cativa) [1–8]. Ефективність таких виробництв безпосередньо залежить від роботи хімічних реакторів, що становлять апаратну основу галузі. В умовах високої ринкової конкуренції критично важливим є забезпечення суворої відповідності продукції галузевим специфікаціям, що потребує точного моніторингу та контролю вхідних і вихідних параметрів технологічного процесу [9].

Проектування, оптимізація та керування складними хіміко-технологічними системами є багатокритеріальними завданнями, де традиційні аналітичні методи часто виявляються малоефективними. Згідно з результатами численних досліджень [10, 11], для моделювання таких нелінійних процесів доцільно застосовувати штучні нейронні мережі (ШНМ). На відміну від лінійних методів керування, які в умовах нелінійності призводять до зниження продуктивності, ШНМ демонструють високу ефективність в оптимізації роботи каталізаторів, розпізнаванні сигналів та управлінні великотоннажними промисловими установками.

Найбільш поширений підхід передбачає використання нейромереж як моделей «чорної скриньки». На основі емпіричних даних об'єкта підбирається архітектура мережі та здійснюється її навчання (налаштування вагових коефіцієнтів) для досягнення максимальної адекватності моделі. Надалі отримані моделі інтегруються в системи предиктивного керування (Model Predictive Control, MPC). Ефективність такої стратегії підтверджена як теоретичними розробками [12–15], так і практичним впровадженням на промислових підприємствах [16–18].

Вихід реактора синтезу оцтової кислоти (зокрема в процесі карбонілювання метанолу на родієвому каталізаторі) на робочий режим є складним динамічним процесом. Під час пуску система переходить із інертного стану в активну фазу реакції, що супроводжується різким зростанням тиску та інтенсивним екзотермічним ефектом.

Застосування штучних нейронних мереж на цьому етапі дає змогу мінімізувати

перерегулювання — критичну проблему керування, що загрожує спрацьовуванням систем аварійного захисту та скиданням параметрів. Попередні дослідження [19] підтвердили можливість моделювання алгоритмів керування пуском реактора за допомогою середовища MATLAB (Neural Network Toolbox), що забезпечує стабільну ідентифікацію нелінійних характеристик процесу навіть у нестабільних перехідних станах.

Метою даної роботи є розробка та дослідження нейромережевої моделі з алгоритмом зворотного поширення помилки для керування реактором синтезу оцтової кислоти в пусковий період. У межах дослідження проведено порівняльний аналіз впливу різних функцій активації (ФА) (hardlim, tansig, logsig, purelin) прихованого та вихідного шарів на точність апроксимації технологічних параметрів. Отримані результати обґрунтовують доцільність інтеграції розробленої мережі в автоматизовані системи керування реактором для стабілізації перехідних процесів.

Викладання основного матеріалу. Чисельне моделювання здійснювалося в середовищі MATLAB (версія 2021) із застосуванням ітераційної процедури структурного синтезу нейронної мережі. Емпіричною базою дослідження слугували статистичні дані динаміки реактора синтезу оцтової кислоти у пусковий період. Об'єкт моделювання розглядався як система з декількома входами та виходами згідно зі структурно-логічною схемою, обґрунтованою у роботі [20].

У роботі досліджено тришарову архітектуру нейронної мережі зі зворотним поширенням помилки. Вхідний шар адаптовано під розмірність вектора вхідних параметрів, а перший прихований шар містив 49 нейронів (рис. 1). Кількість елементів вихідного шару відповідала числу каналів керування реактором, що забезпечувало формування прогнозованих значень для задач регресійного аналізу.

Ключовим етапом дослідження став аналіз впливу функцій активації на точність апроксимації нелінійних залежностей пускового режиму. Експериментально порівнювалися комбінації функцій hardlim, tansig, logsig та purelin для прихованого та вихідного шарів. Такий підхід дозволив визначити оптимальну конфігурацію мережі для ефективного відпрацювання основних каналів керування в умовах перехідних процесів

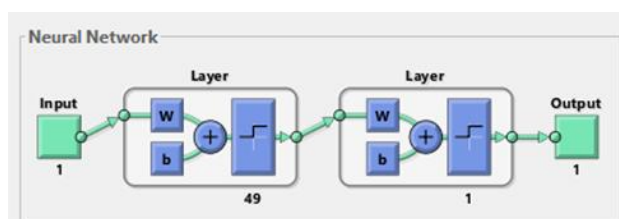


Рис. 1. Архітектура нейронної мережі

Вибірка даних містила 49 елементів. Мережа навчалася протягом 50 циклів.

Результати моделювання нейронної мережі (НМ) за каналами керування реактором синтезу оцтової кислоти у пусковий період наведено в табл. 1 та 3. Для оцінки адекватності моделей розраховано відносну похибку апроксимації.

Таблиця 1

Відносні похибки досліджуваної нейронної мережі для каналів з витратою метанолу

Канал	ФА прихованого шару	ФА вихідного шару	Відносна похибка
1	2	3	4
Витрата метанолу-тиск у реакторі	hardlim	hardlim	0.9906
		tansig	0.9644
		logsig	0.9644
		purelin	0.0076
	tansig	hardlim	0.9993
		tansig	0.9644
		logsig	0.9651
		purelin	0.0034
	logsig	hardlim	0.9651
		tansig	0.9658
		logsig	0.9644
		purelin	0.0016
	purelin	hardlim	1
		tansig	1.0356
		logsig	1
		purelin	0.0014
Витрата метанолу-температура реакційної суміші в реакторі	hardlim	hardlim	0.9990
		tansig	0.9947
		logsig	0.9947
		purelin	0.0068
	tansig	hardlim	0.9987
		tansig	0.9949
		logsig	0.9949
		purelin	0.0020
	logsig	hardlim	0.9999
		tansig	0.9947
		logsig	0.9947
		purelin	0.0017
	purelin	hardlim	0.9947
		tansig	0.9947
		logsig	1
		purelin	0.0016

Продовження табл. 1

1	2	3	4
Витрата метанолу-рівень реакційної суміші в реакторі	hardlim	hardlim	0.9995
		tansig	0.9868
		logsig	0.9868
		purelin	0.0189
	tansig	hardlim	0.9976
		tansig	0.9868
		logsig	0.9868
		purelin	0.0178
	logsig	hardlim	0.9976
		tansig	0.9868
		logsig	0.9868
		purelin	0.0164
Витрата метанолу-концентрація оцтової кислоти на виході реактора	hardlim	hardlim	1
		tansig	1.0132
		logsig	1
		purelin	0.0149
	tansig	hardlim	0.9106
		tansig	0.7837
		logsig	0.5538
		purelin	5459
	logsig	hardlim	0.8511
		tansig	0.6179
		logsig	0.5538
		purelin	4124
	purelin	hardlim	0.6860
		tansig	0.5372
		logsig	0.5372
		purelin	4449
	purelin	hardlim	0.5371
		tansig	2.5371
		logsig	1
		purelin	4183

Аналіз даних табл. 1 свідчить, що для каналів «витрата метанолу — тиск», «витрата метанолу — температура» та «витрата метанолу — рівень» мінімальну похибку (0,0014, 0,0016 та 0,0149 відповідно) забезпечує лінійна функція активації purelin у прихованому та вихідному шарах. Це свідчить про близький до лінійного характер взаємозв'язків між цими параметрами у момент пуску реактора. Для каналу «витрата метанолу — концентрація продукту» оптимальною конфігурацією є поєднання функцій purelin (прихований шар) та hardlim (вихідний шар) із похибкою 0,5371.

При цьому, найвища точність досягнута для каналів «витрата метанолу — тиск» (похибка 0.0014) та «витрата метанолу — температура» (0.0016). Середня точність спостерігається для каналу «витрата метанолу — рівень» (0.0149). Низька точність зафіксована для каналу «витрата метанолу — концентрація кислоти», де мінімальна похибка становить 0.5371 (при

комбінації purelin у прихованому та hardlim у вихідному шарі). Це вказує на складну нелінійність або інерційність процесу зміни концентрації, що потребує складніших моделей.

Використання функцій hardlim, tansig та logsig у вихідному шарі для перших трьох каналів призводить до критичного зростання похибки (до 0.96–1.0), що робить такі конфігурації непридатними для практичного застосування. Для каналу концентрації оцтової кислоти використання функції purelin у вихідному шарі призводить до аномально високих значень похибки (понад 4000), що свідчить про математичну розбіжність моделі при такій структурі.

Загальна рекомендація: Для створення системи керування реактором у пусковий період доцільно використовувати нейромереву структуру з функціями purelin-purelin, за винятком каналу концентрації, який потребує специфічного підходу (purelin-hardlim) або додаткового дослідження. Оптимальні параметри нейронної мережі за розглянутими каналами наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Оптимальні параметри нейронної мережі за каналами керування з витратою метанолу

Канал керування (витрата метанолу — параметр)	ФА прихованого шару	ФА вихідного шару	Мінімальна відносна похибка
Тиск у реакторі	purelin	purelin	0.0014
Температура суміші	purelin	purelin	0.0016
Рівень реакційної суміші	purelin	purelin	0.0149
Концентрація оцтової кислоти	purelin	hardlim	0.5371

Проаналізуємо результати для каналів з витратою оксиду вуглецю (Таблиця 3).

Згідно з табл. 3, для каналів керування за витратою оксиду вуглецю (параметри: тиск, температура, рівень) найкращі результати також отримано при використанні функції purelin, де похибки становили 0,0013, 0,0016 та 0,0075 відповідно. Винятком є канал «витрата оксиду вуглецю — концентрація», де найменшу похибку (0,5371) забезпечило використання функції logsig.

Таблиця 3

Відносні похибки досліджуваної нейронної мережі для каналів з витратою оксиду вуглецю

Канал	ФА прихованого шару	ФА вихідного шару	Відносна похибка
1	2	3	4
Витрата оксиду вуглецю - тиск у реакторі	hardlim	hardlim	0.9956
		tansig	0.9644
		logsig	0.9644
		purelin	0.0041
	tansig	hardlim	0.9942
		tansig	0.9644
		logsig	0.9651
		purelin	0.0014
	logsig	hardlim	0.9717
		tansig	0.9644
		logsig	0.9644
		purelin	0.0013
	purelin	hardlim	0.9644
		tansig	1.0356
		logsig	0.9644
		purelin	0.0013
Витрата оксиду вуглецю - температура реакційної суміші в реакторі	hardlim	hardlim	0.9993
		tansig	0.9947
		logsig	0.9947
		purelin	0.0026
	tansig	hardlim	0.9993
		tansig	0.9947
		logsig	0.9947
		purelin	0.0019
	logsig	hardlim	0.9991
		tansig	0.9947
		logsig	0.9947
		purelin	0.0016
	purelin	hardlim	0.9947
		tansig	1.0053
		logsig	0.9947
		purelin	0.0016
Витрата оксиду вуглецю - рівень реакційної суміші в реакторі	hardlim	hardlim	0.9949
		tansig	0.9868
		logsig	0.9868
		purelin	0.0193
	tansig	hardlim	0.9984
		tansig	0.9868
		logsig	0.9868
		purelin	0.0167
	logsig	hardlim	0.9984
		tansig	0.9868
		logsig	0.9868
		purelin	0.0223
	purelin	hardlim	1
		tansig	0.9868
		logsig	1
		purelin	0.0158

Продовження табл. 3

1	2	3	4
Витрата оксиду вуглецю - концентрація оцтової кислоти на виході реактора	hardlim	hardlim	1
		tansig	0.9886
		logsig	0.5538
		purelin	3132
	tansig	hardlim	0.5724
		tansig	0.5372
		logsig	0.5373
		purelin	2931
	logsig	hardlim	0.9479
		tansig	0.5373
		logsig	0.5371
		purelin	35960
	purelin	hardlim	1
		tansig	2.5371
		logsig	1
		purelin	4229

Для каналів тиску та температури функції logsig та purelin у прихованому шарі дають ідентично високу точність (0.0013–0.0016), що вказує на стійкість моделі до вибору активації прихованих нейронів за умови лінійного виходу.

Таблиця 4

Оптимальні конфігурації за критерієм мінімальної похибки за каналами з витратою оксиду вуглецю

Канал керування (витрата CO — параметр)	ФА прихованого шару	ФА вихідного шару	Мінімальна відносна похибка
Тиск у реакторі	logsig / purelin	purelin	0.0013
Температура суміші	logsig / purelin	purelin	0.0016
Рівень реакційної суміші	purelin	purelin	0.0158
Концентрація оцтової кислоти	logsig	logsig	0.5371

На відміну від метанолу (де кращим був hardlim), для оксиду вуглецю в каналі концентрації найкращий результат (0.5371) отримано при використанні логістичної сигмоїди (logsig) в обох шарах. Це свідчить про суттєву нелінійність взаємозв'язку «витрата CO — вихід продукту». Використання функції purelin на виході для прогнозування концентрації призводить до катастрофічних похибок (до 35960), що робить таку конфігурацію абсолютно неприпустимою для цього каналу. Оптимальні конфігурації за критерієм мінімальної похибки за каналами з витратою оксиду вуглецю зведено в таблицю 4.

Висновки. Встановлено, що лінійна нейронна мережа зі зворотним поширенням помилки ефективно апроксимує технологічні дані для шести основних каналів керування. Оптимальні результати зведено в таблицю 5.

Похибки моделювання за оксидом вуглецю майже ідентичні результатам за метанолом, що вказує на симетричність впливу обох реагентів на вихідні параметри реактора. Для каналів регулювання тиску, температури та рівня незалежно від вхідного впливу (метанол чи CO) оптимальною є архітектура з лінійною функцією активації purelin на вихідному шарі. Це забезпечує високу точність апроксимації з похибкою не більше 1.6%.

Канал концентрації оцтової кислоти виявився найбільш складним для моделювання за обома входами (мінімальна похибка 53.71%). Це вказує на те, що для прогнозування якості продукту в момент пуску стандартної структури мережі недостатньо — необхідно враховувати динамічну затримку (інерційність) або збільшувати глибину мережі. Цікавим є той факт, що для каналу метанолу найкраще спрацював hardlim (порогова функція), а для оксиду вуглецю — logsig (сигмоїда). Це свідчить про різну природу впливу реагентів на динаміку накопичення продукту.

Таблиця 5

Оптимальні параметри нейронної мережі для керування реактором

Вхідний канал (керуюча дія)	Вихідний параметр (регульована величина)	ФА прихованого шару	ФА вихідного шару	Мінімальна відносна похибка
Витрата метанолу	Тиск у реакторі	purelin	purelin	0.0014
	Температура суміші	purelin	purelin	0.0016
	Рівень суміші	purelin	purelin	0.0149
	Концентрація кислоти	purelin	hardlim	0.5371
Витрата оксиду вуглецю	Тиск у реакторі	logsig / purelin	purelin	0.0013
	Температура суміші	logsig / purelin	purelin	0.0016
	Рівень суміші	purelin	purelin	0.0158
	Концентрація кислоти	logsig	logsig	0.5371

Отримані моделі для тиску, температури та рівня можуть бути впроваджені в систему керування реактором вже зараз, тоді як канал концентрації потребує додаткової доробки (наприклад, використання рекурентних нейронних мереж типу LSTM).

Л і т е р а т у р а

1. METHODS FOR PRODUCING ACETIC ACID, United States Patent, Patent No.: US 7,683,212 B2, Date of Patent: Mar. 23, 2010
2. PROCESS FOR MONITORING A CONTINUOUS ACETIC ACID AND/OR METHYLACETATE PRODUCTION, United States Patent, Patent No.: US 6,642,413 B2, Date of Patent: Nov. 4, 2003
3. LOW WATER METHANOL CARBONYLATION PROCESS FOR HIGH ACETIC ACID PRODUCTION AND FOR WATER BALANCE CONTROL, United States Patent, Patent No.: US 7,005,541 B2, Date of Patent: Feb. 28, 2006
4. Jane H. Jones. The Cativa™ Process for the Manufacture : Plant of Acetic Acid Location Year Bottlenecking or increased throughput achieved, IRIIDIUM CATALYST IMPROVES PRODUCTIVITY IN AN ESTABLISHED INDUSTRIAL PROCESS/ Jane H. Jones // Platinum Metals Rev., 2000,44, (3), pp. 94-105, DOI: [10.1595/003214000X44394105](https://doi.org/10.1595/003214000X44394105)
5. Golhosseini Bidgoli, Reza. Kinetic Study, Modeling and Simulation of Homogeneous Rhodium-Catalyzed Methanol Carbonylation to Acetic Acid / Golhosseini Bidgoli, Reza; Naderifar, Abas//Iran. J. Chem. Chem. Eng., Vol. 31, No. 1, 2012, pp.57-73, DOI: [10.30492/ijcce.2012.6076](https://doi.org/10.30492/ijcce.2012.6076)
6. [Naderifar](#) A. Kinetic Study, Modeling and Simulation of Homogeneous Rhodium-Catalyzed Methanol Carbonylation to Acetic Acid/[Abbas Naderifar](#)2012, Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering-international English Edition, Vol. 31, No. 1, 2012, p. 57-73, <https://doi.org/10.30492/IJCCE.2012.6076>
7. Mandake M.B. Kinetic Study of Catalyzed and Uncatalyzed Esterification Reaction of Acetic acid with Methanol / M.B. Mandakea, S.V. Anekarb, S.M.Walkec //American International Journal of Research in Formal, Applied & Natural Sciences, 3(1), June-August, 2013, pp. 114-121, CorpusID:33223967
8. [Haynes](#) A. Acetic Acid Synthesis by Catalytic Carbonylation of Methanol/[Anthony Haynes](#), May 2006, [ChemInform](#) 18(45):179-205, DOI:[10.1007/3418_021](https://doi.org/10.1007/3418_021)
9. Reddi, K. (2016). Adaptive ANN model based nonlinear control of a semi-batch polymerization reactor challenge problem. / Reddi, Kamesh & Rani, K. Yamuna, Conference: 2016 Indian Control Conference (ICC), Hyderabad, Volume: 222 – 229, DOI: [10.1109/INDIANCC.2016.7441132](https://doi.org/10.1109/INDIANCC.2016.7441132)
10. Emuoyibofarhe J.. An optimum solution for a process control problem (continuous stirred tank reactor) using a hybrid neural network. / Emuoyibofarhe, Justice & Reju, Sunday, Journal of Theoretical and Applied Information Technology © 2005 - 2008 JATIT. P.906-915, CorpusID:11391265
11. McCulloch WS. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity/ [Warren McCulloch](#), [Walter Pitts](#), Bulletin of Mathematical Biophysics, 1943, 5: 115-133, DOI: [10.7551/mitpress/12274.003.0011](https://doi.org/10.7551/mitpress/12274.003.0011)
12. Hinton, G. Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks./ G.Hinton & R.Salakhutdinov & Yoesoep Rachmad, Science (New York, N.Y.), 2006, 313. 504-7. DOI:[10.1126/science.1127647](https://doi.org/10.1126/science.1127647)
13. Hinton G.E. A fast learning algorithm for deep belief nets / G.E.Hinton, S.Osindero, Y.W. Teh NEURAL COMPUTATION, 2006,18(7): p.1527-1554, DOI:[10.1162/neco.2006.18.7.1527](https://doi.org/10.1162/neco.2006.18.7.1527)
14. Osindero S. Topographic product models applied to natural scene statistics, / S. Osindero, M. Welling, and G.E. Hinton., NEURAL COMPUTATION, 2006, 18 (2): 381-414, DOI:[10.1162/089976606775093936](https://doi.org/10.1162/089976606775093936)
15. Hodgkin A. L. A Quantitative Description of Ion Currents and Its Applications to Conduction and Excitation in Nerve Membranes / A. L. Hodgkin, A .F. Huxley, Journal of Physiology, 1952, 117:500-544. [https://doi.org/10.1016/S0092-8240\(05\)80004-7](https://doi.org/10.1016/S0092-8240(05)80004-7)
16. Rosenblatt F. The perceptron: Probabilistic model for information storage and organization in the brain / F.Rosenblatt, Psychological Review, 1958, 65(6): 386-408, DOI: [10.1037/h0042519](https://doi.org/10.1037/h0042519)
17. Widrow B. Adaptive Switching Circuits [C] / B. Widrow, M. E. Hoff, 1960 I RE WESCON convention record: part 4.Computers : Man-machine Systems, Los Angeles: 96~104, DOI: 10.21236/ad0241531
18. Sun L. (2021). Artificial Neural Network and Its Application Research Progress in Chemical Process/ Li Sun & Fei Liang & Wutai Cui. Asian Journal of Research in Computer Science, 2021, 177-185. DOI:[10.9734/ajrcos/2021/v12i430302](https://doi.org/10.9734/ajrcos/2021/v12i430302)
19. Porkujan O. Neural network simulation in running of acetic acid syntesis unit while start-up / Olga Porkujan, Zhanna Samojlova.- ТЕКА, Польща, Academy of Sciences (PAN), with registered offices in Warsaw, 2013, p.188-192
20. Samoilova Zh.G. Development of a mathematical model of technological processes in a reactor for the synthesis of otic acid / Zh.G. Samoilova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5/2 (113), 2021, pp. 94-104, DOI: 10.15587/1729-4061.2021.242816

Porkuian O.V., Samojlova Zh.G. The influence of the activation function of a neural network on the approximation of data from the main control channels during the start-up of an acetic acid synthesis reactor

Modern industrial technologies for the synthesis of acetic acid and its derivatives are mainly based on highly efficient catalytic methods, among which methanol carbonylation (Monsanto and Cativa processes) occupies a leading position. The efficiency of such production facilities directly depends on the operation of chemical reactors, which form the hardware basis of the industry. In a highly competitive market, it is critical to ensure strict compliance of products with industry specifications, which requires accurate monitoring and control of the input and output parameters of the technological process.

The most common approach involves using neural networks as black box models. Based on empirical data from the object, the network architecture is selected and trained (weight coefficients are adjusted) to achieve maximum model adequacy. The models obtained will subsequently be integrated into predictive control systems (Model Predictive Control, MPC).

The start-up of an acetic acid synthesis reactor (in particular, in the process of methanol carbonylation on a rhodium catalyst) to operating mode is a complex dynamic process. During start-up, the system transitions from an inert state to an active reaction phase, accompanied by a sharp increase in pressure and an intense exothermic effect.

The use of artificial neural networks at this stage makes it possible to minimise overregulation — a critical control problem that threatens to trigger emergency protection systems and reset parameters.

Numerical modeling was performed in MATLAB (version 2021) using an iterative procedure for structural synthesis of a neural network. The empirical basis for the study was provided by statistical data on the dynamics of the acetic acid synthesis reactor during the start-up period.

Modeling errors for carbon monoxide are almost identical to the results for methanol, indicating the

symmetry of the effect of both reagents on the reactor output parameters. For pressure, temperature, and level control channels, regardless of the input influence (methanol or CO), the optimal architecture is one with a linear purelin activation function on the output layer. This ensures high approximation accuracy with an error of no more than 1.6%.

The acetic acid concentration channel proved to be the most difficult to model for both inputs (minimum error 53.71%). This indicates that it is not enough to predict product quality at the moment of launching a standard network structure—it is necessary to take into account dynamic delay (inertia) or increase the depth of the network.

Keywords: neural networks, backpropagation, reactor

Поркуян Ольга Вікторівна — доктор технічних наук, професор, радник ректора Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м.Київ)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4046-0998>

porkuyan@snu.edu.ua

Самойлова Жанна Георгіївна — кандидат технічних наук, доцент кафедри Комп'ютерно-інтегрованих систем управління Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м.Київ)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4509-4501>

samojlova@snu.edu.ua

Дата першого надходження статті 20.02.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.03.2026.

Дата публікації 11.05.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-301-3-94-100>

УДК 665.6

ВПЛИВ РЕЖИМУ ПІРОЛІЗУ ВІДПРАЦЬОВАНОЇ КОМПРЕСОРНОЇ ОЛИВИ НА ВЛАСТИВОСТІ ОДЕРЖАНИХ ПРОДУКТІВ

Червінський Т.І., Копач А.М., Гринишин О.Б.

INFLUENCE OF PYROLYSIS MODE OF WASTE COMPRESSOR OIL ON THE PROPERTIES OF THE OBTAINED PRODUCTS

Chervinskyi T.I., Kopach A.M., Grynysyn O.B.

Дослідження спрямоване на розв'язання проблеми раціональної утилізації відпрацьованих змащувальних матеріалів та отримання альтернативних джерел енергоносіїв. У роботі встановлена можливість утилізації відпрацьованої компресорної оливи МГД-20С низькотемпературним піролізом за двох температурних режимів: м'якого, що передбачав повільний нагрів реактора з наважкою сировини, та жорсткого, який характеризувався швидким нагріванням до температури завершення процесу. Продукт цього процесу – піроконденсат. Отримані піроконденсати являли собою рідкі малов'язкі продукти темно-коричневого забарвлення з характерним специфічним запахом, вихід яких за досліджуваних умов не перевищував 89,9 % мас. від маси вихідної сировини. Встановлено, що піроконденсати, отримані за обох температурних режимів, містять значну частку ненасичених вуглеводнів, що підтверджується підвищеними значеннями йодного числа. Методом фракційної перегонки з отриманих піроконденсатів виділено бензинову та дизельну фракції й вуглеводневий залишок. Доведено, що зразки бензинової фракції містять значну кількість парафінових вуглеводнів та сірковмісних сполук, що негативно впливає на величину їх октанового числа. Зразки дизельної фракції відзначаються підвищеним значенням йодного числа та вищим за нормоване значення вмістом сірковмісних сполук, що зумовлює підвищену схильність до осмолення, нагароутворення в камері згорання двигуна та істотно скорочує термін їх зберігання. Встановлено, що у зразках залишків фракційної перегонки піроконденсатів піролізу відпрацьованої компресорної оливи МГД-20С присутні ненасичені та сірковмісні вуглеводні. За отриманими значенням кінематичної в'язкості отримані зразки залишків

належать до I та II груп базових нафтових олив й з використанням процесів доочищення можуть бути використані як добавки для приготування пластичних мастильних матеріалів. Практична цінність роботи полягає у розробці комплексного підходу до переробки відходів МГД-20С, де важкі залишки після доочищення можуть бути використані як компоненти пластичних масил, а світлі фракції — як сировина для нафтохімічного синтезу або альтернативне котельне паливо.

Ключові слова: відпрацьовані оливи, компресорна олива, утилізація, регенерація, піроліз, піроконденсат, паливні фракції, залишок.

Вступ. Як відомо, нафтові оливи є невід'ємним компонентом сучасної технічної інфраструктури. Вони широко використовуються для змащення, охолодження та захисту механічних вузлів і агрегатів у транспортних засобах, промисловому обладнанні та енергетичних системах від дії агресивних середовищ. Проте, в процесі експлуатації оливи зазнають термічного, механічного та хімічного впливу, що призводить до деградації їхніх експлуатаційних властивостей і утворення відпрацьованих нафтових олив (ВНО) [1-4].

Проблема управління відпрацьованими мастильними матеріалами має як екологічний, так і економічний вимір. З одного боку, ВНО містять широкий спектр небезпечних для живих організмів компонентів: поліциклічні ароматичні вуглеводні, галогеноорганічні та

металоорганічні сполуки тощо. Потрапляння мізерних кількостей ВНО у довкілля може спричинити довготривале забруднення ґрунтів, водних ресурсів та атмосфери. Однак, з іншого боку, ВНО є потенційно цінною органічною сировиною, що містять базову оливну фракцію, яка, після використання належних процесів очищення, може повторно бути використана у виробництві товарної мастильної продукції, або ж в енергетичних цілях. Водночас, застосування традиційних методів утилізації ВНО, таких як спалювання або захоронення, супроводжується великими витратами ресурсів, високими викидами шкідливих речовин та втратами цінних компонентів [5-11].

Світова практика демонструє, що регенерація ВНО є одним із найбільш екологічно доцільних і економічно вигідних способів їх обробки. Однак широке впровадження таких технологій дещо стримується низкою технічних, нормативних та економічних бар'єрів, серед яких висока вартість очищення, недосконалість систем збору ВНО, недостатня нормативна регламентація процесів поводження з відпрацьованими оливами та низька обізнаність суб'єктів господарювання щодо можливостей їхньої переробки.

На сьогоднішній день все більший інтерес у технології рециклінгу займає метод низькотемпературного піролізу вуглеводневої сировини з отриманням паливних продуктів цінного хімічного складу [12]. Термічний розклад відпрацьованих олив дозволяє отримувати, як продукти процесу, низькомолекулярні вуглеводні, склад яких є близьким до вуглеводневих нафтових фракцій. Водночас, за умови коректної технологічної реалізації цього процесу відкривається можливість не лише скоротити рівень негативного впливу на навколишнє середовище, а й зменшити залежність від викопних ресурсів, зокрема сирої нафти. Водночас не всі різновиди відпрацьованих олив є придатними для одержання рідких і газоподібних вуглеводнів, які можуть бути використані в паливній галузі. У зв'язку з цим виникає потреба в детальному дослідженні процесів піролізу для кожного типу ВНО з метою оцінювання ефективності та доцільності їх перероблення. Слід також відзначити, що в Україні система утилізації відпрацьованих нафтових олив характеризується низьким рівнем розвитку. Незважаючи на наявність значної кількості наукових праць, присвячених піролізу

відпрацьованих олив [13, 14], проблема їх утилізації залишається невирішеною, а подальші наукові дослідження в цьому напрямі є актуальними та мають важливе практичне значення.

Мета роботи. За різних умов (температура, тривалість) здійснити процес низькотемпературного процесу піролізу відпрацьованої компресорної оливи (ВКО) з одержанням продуктів процесу; здійснити аналіз складу та фізико-хімічних властивостей одержаного піроконденсату, оцінити доцільність використання отриманих з піроконденсату паливних фракцій як компонентів для товарних моторних палив.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сировиною для проведення процесу піролізу слугувала відпрацьована мінеральна компресорна олива марки МГД-20С, яка була відібрана з картера газомотокомпресора після завершення встановленого строку експлуатації.

Процес піролізу відпрацьованої нафтової оливи МГД-20С здійснювали з використанням лабораторної установки, до складу якої входили герметичний металевий реактор, електричний нагрівальний елемент, водяний холодильник та ємність для збору продуктів. У реактор завантажували попередньо зважену наважку відпрацьованої компресорної оливи. Після монтажу установки запускали систему нагрівання та поступово підвищували температуру до значень, необхідних для перебігу піролізу. Температурний режим контролювали за допомогою термопари. У процесі термічного розкладання утворені пароподібні продукти відводили до водяного холодильника, де відбувалася їх часткова конденсація. Рідкий продукт піролізу (піроконденсат) накопичувався у приймальній ємності, тоді як газоподібні неконденсовані продукти (пірогази) відводилися в атмосферу. Після завершення процесу установку демонтували, а реактор і приймач повторно зважували з метою визначення маси твердого залишку та кількості отриманого піроконденсату. На підставі отриманих даних складали матеріальний баланс піролізу.

Подальше розділення піроконденсату на окремі вузькі фракції проводили методом фракційної перегонки з використанням стандартної лабораторної установки для аналізу легких нафтопродуктів. Установка складалася з перегінної колби, електричного колбонагрівача, водяного холодильника, розподільного

пристрою типу «павук» та приймальних посудин для збору фракцій. Температуру відбору фракцій фіксували за допомогою термометра, встановленого на вході до холодильника, що забезпечувало точний контроль температури парової фази.

Вивчення складу та фізико-хімічних характеристик піроконденсату і виділених з нього фракцій здійснювали відповідно до чинних стандартизованих методик. Фракційний склад легких фракцій визначали із застосуванням апарата АРНС. Температуру спалаху легких фракцій вимірювали в закритому тиглі, а важких – у відкритому. Густина піроконденсату та окремих фракцій встановлювали пікнометричним методом, тоді як йодне число для всіх фракцій визначали за методом Маргошеса.

Піроліз відпрацьованої компресорної оливи МГД-20С проводили за двох температурних режимів: м'якого, що передбачав повільний нагрів реактора з наважкою сировини, та жорсткого, який характеризувався швидким нагріванням до температури завершення процесу (рис. 1). Матеріальні баланси піролізу за обох режимів наведено в табл. 1. Вихід піроконденсату за досліджуваних умов не перевищував 89,9 % мас. від маси вихідної сировини, тоді як кількість залишку в реакторі після піролізу становила не більше 2,8 % мас. Для отриманих піроконденсатів визначали основні експлуатаційні показники та фракційний склад згідно зі стандартизованими методиками. Результати експериментальних досліджень наведено в табл. 2.

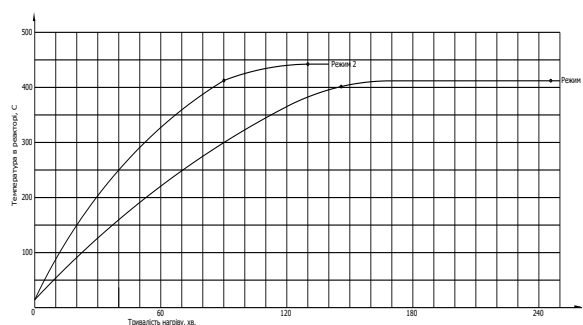


Рис. 1. Температурні режими процесу піролізу ВКО МГД-20С: режим 1 – м'який; режим 2 – жорсткий

Отримані в результаті піролізу відпрацьованої компресорної оливи МГД-20С піроконденсати являли собою рідкі малов'язкі продукти темно-коричневого забарвлення з характерним специфічним запахом. Згідно з даними, наведеними в табл. 2, встановлено, що піроконденсати, отримані за обох

температурних режимів, містять значну частку ненасичених вуглеводнів, що підтверджується підвищеними значеннями йодного числа.

Таблиця 1

Матеріальний баланс процесу піролізу відпрацьованої компресорної оливи МГД-20С

Сировина і продукти	Температурний режим процесу піролізу	
	М'який	Жорсткий
Взято: ВКО МГД-20С	100,0	100,0
Отримано:		
Піроконденсат	89,2	89,9
Залишок	2,8	2,5
Газ і втрати	8,0	7,6
Всього	100,0	100,0

Температура застигання досліджуваних зразків була нижчою за -20°C , що вказує на незначний вміст у їх складі аліфатичних, зокрема парафінових, вуглеводневих структур. Крім того, у піроконденсатах зафіксовано високий вміст сірки, присутність якої обумовлена нафтовим походженням вихідної оливи МГД-20С.

Обидва зразки піроконденсатів характеризуються низькими значеннями температури спалаху, що свідчить про їх підвищену вибухо- та пожежонебезпечність. У зв'язку з цим використання отриманих продуктів як складових котельних палив є недоцільним.

Таблиця 2

Характеристика піроконденсатів піролізу відпрацьованої оливи МГД-20С

Показник	Температурний режим процесу піролізу	
	М'який	Жорсткий
Зовнішній вигляд	Маловязка прозора рідина темно-коричневого кольору	
Густина, кг/м^3	828	837
Показник заломлення	1,4657	1,4697
Вміст сірки, % мас.	0,178	0,180
Йодне число, $\text{г I}_2/100 \text{ г}$	52,9	55,7
Температура застигання, $^{\circ}\text{C}$	<-20	<-20
Температура спалаху у відкритому тиглі, $^{\circ}\text{C}$	54	55
Температура спалаху у закритому тиглі, $^{\circ}\text{C}$	36	38

Для проведення наступних наукових досліджень від отриманих піроконденсатів здійснювали відгін бензинової (википає до 200°C) та дизельної ($200-350^{\circ}\text{C}$) фракцій. Надалі, отримані паливні фракції аналізували

окремо за стандартизованими методиками аналізів нафтових палив.

Отримані результати проведених досліджень зразків бензинової фракції подані у табл. 3.

Таблиця 3

Характеристика зразків бензинової фракції піроконденсату піролізу відпрацьованої компресорної оливи МГД-20С

Показник	Температурний режим процесу піролізу	
	М'який	Жорсткий
Зовнішній вигляд	Прозора рідина світло-жовтого кольору	
Вихід на піроконденсат, % мас.	19,2	16,3
Густина, кг/м ³	746	741
Показник заломлення	1,4241	1,4237
Вміст сірки, % мас.	0,114	0,116
Йодне число, г I ₂ /100 г	74,8	78,2

За показниками густини обидва зразки бензинової фракції відповідають типовим значенням, характерним для легких бензинових компонентів. Водночас бензинова фракція, отримана за жорсткого температурного режиму піролізу, характеризується дещо нижчою густиною, що свідчить про підвищену частку легколетких сполук у її складі.

Близькі значення показника заломлення для обох зразків вказують на подібну молекулярну будову та хімічний склад фракцій, а також на значний вміст парафінових вуглеводнів. Наявність таких компонентів негативно впливає на октанове число бензинової фракції, що обмежує можливості її безпосереднього використання як моторного палива.

Обидва зразки бензинової фракції характеризуються відносно невисоким вмістом сірки. Проте зразок, отриманий за жорсткого режиму піролізу, містить дещо більшу кількість сірковмісних сполук. З огляду на екологічні вимоги та необхідність відповідності стандартам Євро-5/Євро-6, використання таких фракцій у складі моторних паливних сумішей потребує проведення процесів гідроочищення.

Підвищені значення йодного числа бензинових фракцій піроконденсатів, отриманих у процесі піролізу відпрацьованої компресорної оливи МГД-20С, свідчать про значну частку ненасичених вуглеводнів у їх складі.

Для двох зразків дизельної фракції піроконденсатів піролізу ВКО МГД-20С визначали основні експлуатаційні

характеристики з використанням загальноприйнятих стандартизованих методик. Результати проведених досліджень наведено у табл. 4.

Таблиця 4

Характеристика зразків дизельної фракції піроконденсату піролізу відпрацьованої компресорної оливи МГД-20С

Показник	Температурний режим процесу піролізу	
	М'який	Жорсткий
Зовнішній вигляд	Прозора рідина насиченого жовтого кольору	
Вихід на піроконденсат, % мас.	45,4	41,2
Густина, кг/м ³	832	833
Показник заломлення	1,4639	1,4652
Йодне число, г I ₂ /100 г	62,0	67,9
Вміст сірки, % мас.	0,180	0,178
Температура помутніння, °С	-12	-11
Температура застигання, °С	<-20	<-20
Температура спалаху в закритому тиглі, °С	51	38

Аналіз результатів досліджень, наведених у табл. 4, показує, що експлуатаційні характеристики дизельних фракцій піроконденсатів, отриманих у процесі піролізу відпрацьованої компресорної оливи МГД-20С, лише незначною мірою відрізняються залежно від температурного режиму проведення процесу. Значення густини досліджуваних зразків перебувають у межах, характерних для товарного дизельного палива.

Показники йодного числа свідчать про наявність у складі дизельних фракцій ненасичених вуглеводнів, що обумовлює їх знижену хімічну стійкість до окиснювальних процесів, підвищену схильність до осмолення та обмежені можливості тривалого зберігання. З урахуванням вмісту сірки та екологічних вимог, такі дизельні фракції доцільно спрямовувати на стадію гідроочищення.

Низькотемпературні властивості досліджуваних зразків дизельної фракції вказують на незначну частку лінійних парафінових вуглеводнів у їх складі, що свідчить про потенційну можливість використання цих фракцій у процесах формування зимових дизельних палив.

В процесі відгонки паливних фракцій від піроконденсату піролізу ВКО МГД-20С був отриманий залишок, властивості якого

визначали за стандартизованими методиками, а отримані результати досліджень подано у табл. 5

Таблиця 5

Характеристика залишку перегонки піроконденсату піролізу відпрацьованої компресорної оливи МГД-20С

Показник	Температурний режим процесу піролізу	
	М'який	Жорсткий
Зовнішній вигляд	В'язка рідина темно-коричневого кольору	
Вихід на піроконденсат, % мас.	35,4	42,5
Густина, кг/м ³	887	896
Показник заломлення	1,4923	1,4960
Вміст сірки, % мас.	0,211	0,202
Йодне число, г I ₂ /100 г	41,3	45,7
Температура застигання, °С	–6	–8
Температура спалаху у відкритому тиглі, °С	200	225
В'язкість:		
ν ₅₀ , мм ² /с	14,12	20,33
ν ₁₀₀ , мм ² /с	4,31	5,72

На підставі результатів експериментальних досліджень експлуатаційних характеристик залишкових продуктів фракційної перегонки піроконденсатів, отриманих у процесі піролізу відпрацьованої компресорної оливи МГД-20С, можна зробити такі висновки. Значення показника заломлення для обох зразків залишку відповідають фракціям із підвищеним вмістом ароматичних та поліциклічних вуглеводнів.

Підвищена концентрація сірки в залишкових продуктах свідчить про доцільність застосування гідрогенізаційних методів очищення з метою покращення їх екологічних та експлуатаційних показників. Значення йодного числа вказують на наявність у складі залишків ненасичених сполук, що зумовлює їх обмежену стабільність під час зберігання, схильність до окиснювальних процесів та утворення смолистих речовин.

Показники температури спалаху, визначені у відкритому тиглі, підтверджують достатній рівень вогнестійкості залишкових фракцій, що дозволяє розглядати можливість їх використання як складових компонентів пластичних мастил. Разом з тим значення кінематичної в'язкості досліджуваних залишків відповідають характеристикам базових нафтових олив І та ІІ груп.

Висновки. Вивчено процес низькотемпературного піролізу відпрацьованої нафтової компресорної оливи марки МГД-20С

за умов м'якого та жорсткого температурних режимів.

Досліджено склад та основні експлуатаційні властивості отриманих зразків піроконденсату піролізу відпрацьованої компресорної оливи марки МГД-20С.

Досліджено склад і властивості паливних фракцій, виділених із піроконденсату процесу піролізу ВКО МГД-20С. Доведено, що зразки бензинової фракції містять значну кількість парафінових вуглеводнів та сірковмісних сполук, що негативно впливає на величину їх октанового числа. Зразки дизельної фракції відзначаються підвищеним значенням йодного числа та вищим за нормоване значення вмістом сірковмісних сполук, що зумовлює підвищену схильність до осмолення, нагароутворення в камері згоряння двигуна та істотно скорочує термін їх зберігання.

Встановлено, що у зразках залишків фракційної перегонки піроконденсатів піролізу ВКО МГД-20С присутні ненасичені та сірковмісні вуглеводні. За отриманими значеннями кінематичної в'язкості отримані зразки залишків належать до І та ІІ груп базових нафтових олив й можуть бути використані як добавки для приготування пластичних мастильних матеріалів.

Підтверджено, що вузькі паливні фракції піроконденсату піролізу ВКО МГД-20С не можуть бути використані як компоненти товарних палив без застосування процесів додаткового очищення.

Література

1. Кузнецова О., Нетреба З. Дослідження старіння мінеральних гідравлічних олив. І. Фракційний склад. *Технологічний аудит і резерви виробництва*. 2015. Том 3, № 4. С. 64–68.
2. Dominguez-Rosado E., Pichtel J. Chemical Characterization of Fresh, Used and Weathered Motor Oil Via GC/MS, NMR and FTIR Techniques. *Proceeding of Indiana Academy Science*. 2003. Vol. 112, No 2. P. 109–116.
3. Sánchez-Alvarracín, C.; Criollo-Bravo, J.; Albuja-Arias, D.; García-Ávila, F.; Pelaez-Samaniego, M.R. Characterization of Used Lubricant Oil in a Latin-American Medium-Size City and Analysis of Options for Its Regeneration. *Recycling*. 2021. Vol. 6, No 10. P. 1–22. doi: 10.3390/recycling6010010.
4. Караулов А., Худолій Н. Автомобільні масла. Моторні і транспортні. Асортимент і застосування: навч. посіб. Київ: Райдуга, 2000. 165 с.
5. Червінський Т., Гринишин О., Корчак Б. Регенерація відпрацьованих моторних олив в

- присутності карбаміду. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Хімія, технологія речовин та їх застосування*. 2015. № 812. С. 158–163.
6. Hrynyshyn O., Korchak B., Chervinsky T., Kochubei V. Change in Properties of M-10DM Mineral Motor Oil After Its Using in the Diesel Engine. *Chemistry & Chemical Technology*. 2017. Vol. 11, № 3. P. 387–391.
 7. Korchak B., Hrynyshyn O., Chervinsky T., Polyuzhin I. Application of Vacuum Distillation for the Used Mineral Oils Recycling. *Chemistry & Chemical Technology*. 2018. Vol. 12, № 3. P. 365–371.
 8. Korchak B., Hrynyshyn O., Chervinsky T., Shapoval P., Nagursky A. Thermooxidative Regeneration of Used Mineral Motor Oils. *Chemistry & Chemical Technology*. 2020. Vol. 14, № 1. P. 129–134.
 9. Чайка О.Г., Ковальчук О.З., Чайка Ю.А. Моніторинг утворення відпрацьованих олив в Україні. *Вісник НУ «Львівська політехніка» «Хімія, технологія речовин та їх застосування»*. 2009. № 644. С. 221–224.
 10. Zhirong Liang, Longfei Chen, Mohammed S. Alam, Soheil Zeraati Rezaei, Christopher Stark, Hongming Xu, Roy M. Harrison. Comprehensive chemical characterization of lubricating oils used in modern vehicular engines utilizing GC × GC-TOFMS. *Fuel*. 2018. Vol. 220. P. 792–799.
 11. Zhiwei C., Yingjie L., Chunxiao Z., Yi F.; Jianli Z. A review on resource utilization of oil sludge based on pyrolysis and gasification. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023. Vol. 11. P. 109692.
 12. Johnson O., Affam A. Petroleum sludge treatment and disposal: A review. *Environmental Engineering Research*. 2019. Vol. 24, № 2. P. 191–201.
 13. Jia H., Zhao S., Zhou X., Qu C., Fan D., Wang C. Low-temperature pyrolysis of oily sludge: roles of Fe/Al-pillared bentonites. *Archives of Environmental Protection*. 2017. Vol. 43. P. 82–90.
 14. Vdovenko S., Boichenko S., Kochubey V. Composition and properties of the refinery oily sludge. *Chemistry & Chemical Technology*. 2015. Vol. 9, № 3. P. 257–260.
 - American Medium-Size City and Analysis of Options for Its Regeneration. *Recycling*. 2021. Vol. 6, No 10. P. 1–22. doi: 10.3390/recycling6010010.
 4. Karaulov A., Khudoliy N. Avtomobil'ni masla. Motorni i transportni. Asortyment i zastosuvannya: navch. posib. Kyiv: Rayduha, 2000. 165 s.
 5. Chervinsky T., Hrynyshyn O., Korchak B. Reheneratsiya vidprats'ovanykh motornykh olyv v prysutnosti karbamidu. *Visnyk Natsional'noho universytetu «L'viv's'ka politekhnika»*. Seriya: Khimiya, tekhnolohiya rechovyn ta yikh zastosuvannya. 2015. № 812. S. 158–163.
 6. Hrynyshyn O., Korchak B., Chervinsky T., Kochubei V. Change in Properties of M-10DM Mineral Motor Oil After Its Using in the Diesel Engine. *Chemistry & Chemical Technology*. 2017. Vol. 11, № 3. P. 387–391.
 7. Korchak B., Hrynyshyn O., Chervinsky T., Polyuzhin I. Application of Vacuum Distillation for the Used Mineral Oils Recycling. *Chemistry & Chemical Technology*. 2018. Vol. 12, № 3. P. 365–371.
 8. Korchak B., Hrynyshyn O., Chervinsky T., Shapoval P., Nagursky A. Thermooxidative Regeneration of Used Mineral Motor Oils. *Chemistry & Chemical Technology*. 2020. Vol. 14, № 1. P. 129–134.
 9. Chayka O.H., Koval'chuk O.Z., Chayka YU.A. Monitorynh utvorennia vidprats'ovanykh olyv v Ukraini. *Visnyk NU «L'viv's'ka politekhnika» «Khimiya, tekhnolohiya rechovyn ta yikh zastosuvannya»*. 2009. № 644. S. 221–224.
 10. Zhirong Liang, Longfei Chen, Mohammed S. Alam, Soheil Zeraati Rezaei, Christopher Stark, Hongming Xu, Roy M. Harrison. Comprehensive chemical characterization of lubricating oils used in modern vehicular engines utilizing GC × GC-TOFMS. *Fuel*. 2018. Vol. 220. P. 792–799.
 11. Zhiwei C., Yingjie L., Chunxiao Z., Yi F.; Jianli Z. A review on resource utilization of oil sludge based on pyrolysis and gasification. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023. Vol. 11. P. 109692.
 12. Johnson O., Affam A. Petroleum sludge treatment and disposal: A review. *Environmental Engineering Research*. 2019. Vol. 24, № 2. P. 191–201.
 13. Jia H., Zhao S., Zhou X., Qu C., Fan D., Wang C. Low-temperature pyrolysis of oily sludge: roles of Fe/Al-pillared bentonites. *Archives of Environmental Protection*. 2017. Vol. 43. P. 82–90.
 14. Vdovenko S., Boichenko S., Kochubey V. Composition and properties of the refinery oily sludge. *Chemistry & Chemical Technology*. 2015. Vol. 9, № 3. P. 257–260.

References

1. Kuznetsova O., Netreba Z. Doslidzhennya starinnya mineral'nykh hidravlichnykh olyv. I. Fraktsiynny sklad. *Tekhnolohichnyy audyt i rezervy vyrobnytstva*. 2015. Tom 3, № 4. S. 64–68.
2. Dominguez-Rosado E., Pichtel J. Chemical Characterization of Fresh, Used and Weathered Motor Oil Via GC/MS, NMR and FTIR Techniques. *Proceeding of Indiana Academy Science*. 2003. Vol. 112, No 2. P. 109–116.
3. Sánchez-Alvarracín, C.; Criollo-Bravo, J.; Albuja-Arias, D.; García-Ávila, F.; Pelaez-Samaniego, M.R. Characterization of Used Lubricant Oil in a Latin-

Chervinskyi T.I., Kopach A.M., Hrynyshyn O.B.
Influence of pyrolysis conditions of waste compressor oil on the properties of the obtained products.

This work investigates the potential for recycling waste lubricants and their conversion into alternative energy resources. The study established the feasibility of recycling used compressor oil MHD-20S by low-temperature pyrolysis under two temperature regimes: a mild regime, involving slow heating of the reactor loaded with the feedstock, and a severe regime, characterized by rapid heating to the final process temperature. The main product of the process was a pyrocondensate. The obtained pyrocondensates were dark brown, low-viscosity liquid products with a characteristic odor.

Under the investigated conditions, their yield did not exceed 89.9 wt.% relative to the initial feedstock. It was found that pyrocondensates produced under both temperature regimes contained a significant proportion of unsaturated hydrocarbons, as evidenced by increased iodine values. Gasoline and diesel fractions, as well as a hydrocarbon residue, were isolated from the pyrocondensates by fractional distillation. It was demonstrated that the gasoline fraction samples contained a considerable amount of paraffinic hydrocarbons and sulfur-containing compounds, which negatively affected their octane number. The diesel fractions were characterized by elevated iodine values and sulfur contents exceeding standard limits, resulting in an increased tendency toward resin formation and carbon deposition in the engine combustion chamber, as well as a significant reduction in storage stability. It was also established that unsaturated and sulfur-containing hydrocarbons were present in the fractional distillation residues of the pyrocondensates obtained from the pyrolysis of used compressor oil MHD-20S. Based on the measured kinematic viscosity values, the residue samples can be classified as Group I and Group II base petroleum oils and, after further purification, may be used as components for the formulation of plastic lubricants. The practical significance of this work lies in the development of a comprehensive approach to MHD-20S waste processing, where heavy residues, following additional purification, can serve as components for lubricating greases, while light fractions can be utilized as feedstocks for petrochemical synthesis or as alternative boiler fuels.

Keywords: waste oils, compressor oil, utilization, regeneration, pyrolysis, pyrocondensate, fuel fractions, residue.

Червінський Тарас Ігорович – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології переробки нафти та газу Національного університету «Львівська політехніка»,
orcid.org/0000-0002-0193-1507
e-mail: taras.i.chervinskyi@lpnu.ua

Копач Андрій Миколайович – аспірант кафедри хімічної технології переробки нафти та газу Національного університету «Львівська політехніка»,
orcid.org/0009-0002-4162-8550
e-mail: andrii.m.kopach@lpnu.ua

Гринишин Олег Богданович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімічної технології переробки нафти та газу Національного університету «Львівська політехніка»,
orcid.org/0000-0003-4103-3784
e-mail: ogrynyshyn@ukr.net

Дата першого надходження статті 12.02.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.03.2026.

Дата публікації 11.05.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Наукове видання

**ВІСНИК
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
№ 3 (301) 2026**

Науковий журнал

Відповідальний за випуск

Лорія М.Г.

Оригінал-макет

Могильна О.В.

Статті надруковано в авторській редакції

Підписано до друку 15.04.2026 р.
Формат 60 x 84 1/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 12,2. Обл.-вид. арк. 13,5.
Наклад 50 прим. Вид. № 3440.

Видавництво
Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

Адреса університета: вул. Іоанна Павла II, 17,
м. Київ, 01042, Україна
E-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com