



ISSN 2520-6524 (print)
ISSN 3041-1726 (online)

УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ
ЕКСПЕРТИЗИ ТА ІНФОРМАЦІЇ

■ НАУКА ■ ТЕХНОЛОГІЇ ■ ІННОВАЦІЇ

science • technologies • innovations

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№1 (37)/2026

ЗАСНОВНИКИ:

ДНУ “Український інститут науково-технічної експертизи та інформації”

ДУ “Інститут досліджень науково-технічного потенціалу та історії науки ім. Г. М. Доброва НАН України”

ДВНЗ “Український державний хіміко-технологічний університет” МОН України

ISSN 2520-6524 (print)

ISSN 3041-1726 (online)

№ 1 (37) / 2026

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Виходить 1 раз на квартал / Видається з 1 січня 2017 р.

Ідентифікатор медіа: R40-05187

УДК 001:(62+004)+001.895

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР

Камишин В. В., д-р пед. наук

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА:

Рева О. М., д-р техн. наук

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Аврамчук Б. О., канд. екон. наук

Верещак В. Г., д-р техн. наук

Дубницький В. І., д-р екон. наук

Єгоров І. Ю., д-р екон. наук

Писаренко Т. В., канд. техн. наук

Півоваров О. А., д-р техн. наук

Попович О. С., д-р екон. наук

Федулова С. О., д-р екон. наук

Черваков О. В., д-р екон. наук

ІНОЗЕМНІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Гусейнова А., д-р екон. наук (Азербайджан)

Борусевич А., д-р наук (Польща)

EDITORIAL BOARD

CHIEF EDITOR

Kamyslyn V. V., D. Sc. in Pedagogy

ASSOCIATE EDITOR:

Reva O. M., D. Sc. in Engineering

EDITORIAL BOARD MEMBERS:

Avramchuk B. O., PhD in Economics

Vereshchak V. G., D. Sc. in Engineering

Dubnytskyi V. I., D. Sc. in Economics

Yehorov I. Yu., D. Sc. in Economics

Pysarenko T. V., PhD in Engineering

Pivovarov O. A., D. Sc. in Engineering

Popovych O. S., D. Sc. in Economics

Fedulova S. O., D. Sc. in Economics

Chervakov O. V., D. Sc. in Economics

FOREIGN MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

Huseinova A., D. Sc. in Economics (Azerbaijan)

Borusiewicz A., Doctor of Sciences (Poland)

РОЗВИТОК НАЦІОНАЛЬНОЇ ІННОВАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

<i>Федулова С.О., Холод С. Б., Соколова В.В.</i> Геополітична продовольча безпека: трансформація продовольчих систем	3
<i>Осадча А.Б.</i> Аналіз стану реалізації пріоритетних напрямів наукової та інноваційної діяльності в енергетичній сфері	12
<i>Салімлі Гусейн Еркен огли</i> Економічні ефекти цифровізації в економіці нового покоління Азербайджану.	21

ПРОБЛЕМИ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

<i>Мусіна Л.А., Кваша Т.К.</i> Проблеми та перспективи цифрової трансформації сфери НТІ в Україні та її впливу на досягнення ЦСР.	28
--	----

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ВЛАСНІСТЬ

<i>Андрощук Г.О., Хвостенко В.С.</i> Патентний ландшафт технологій Visual SLAM: стратегічні наслідки для автономних систем.	42
--	----

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

<i>Івухін Є.В., Шелякін Г. В.</i> Рекомендаційна модель прогнозування даних на основі нечіткої логіки та методу колаборативної фільтрації.	58
<i>Шабельник Т.В., Євсєєва С.О.</i> Квантитативне моделювання портфельних стратегій з використанням alpha-сигналів на основі машинного навчання та бектестингу	68
<i>Пасєка Б.В.</i> Контекстно-залежна адаптивна редукція та еквівалентування моделі електромобіля з перемиканням режимів руху для системи підтримки прийняття рішень.	80

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Казачков І.В., Нестеренко О.В., Федоров В.В., Яцук П.П.</i> Інформаційно-комунікаційні технології у публічному управлінні: від початків до використання в умовах викликів і потреб воєнного стану.	90
<i>Вишнівський О.В.</i> База даних антен для техніки 3D-2D перетворення геометрії у задачах авіаційної електромагнітної сумісності	103
<i>Сучков В.І.</i> Методи попереднього оброблення рентген-знімків грудної клітини в задачі класифікації.	110

THE DEVELOPMENT OF A NATIONAL INNOVATION SYSTEM

<i>Fedulova S.O., Kholod S.B., Sokolova V.V.</i> Geopolitical food security: the transformation of food systems.	3
<i>Osadcha A.B.</i> Analysis of the implementation status of priority areas of scientific and innovation activity in the energy sector	12
<i>Salimli Huseyn Erken oqlu</i> Digitalization and economic performance in Azerbaijan's new economy	21

PROBLEMS OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL ACTIVITIES

<i>Musina L.A., Kvasha T.K.</i> Problems and prospects of digital transformation of the STI sector in Ukraine and its impact on achieving the SDGs	28
---	----

INTELLECTUAL PROPERTY

<i>Androshchuk H.O., Khvostenko V.S.</i> Patent landscape of Visual SLAM technologies: strategic implications for autonomous systems.	42
--	----

SYSTEM ANALYSIS AND DECISION MAKING

<i>Ivokhin Y.V., Shelyakin G.V.</i> Recommender model for data prediction based on fuzzy logic and collaborative filtering method.	58
<i>Shabelnyk T.V., Yevsyeyeva S.O.</i> Quantitative modeling of portfolio strategies using machine learning-based alpha signals and backtesting.	68
<i>Pasieka B.V.</i> Context-dependent adaptive reduction and equivalent modeling of an electric vehicle with driving mode switching for a decision support system.	80

INFORMATIONAL TECHNOLOGIES

<i>Kazachkov I.V., Nesterenko O.V., Fedorov V.V., Yatsuk P.P.</i> Information and communication technologies in public administration: from its beginnings to use in the conditions of challenges and needs of martial law	90
<i>Vishnevsky A.V.</i> Antenna database for aircraft electromagnetic compatibility problems 3D-to-2D geometry transformation technique	103
<i>Suchkov V.I.</i> Methods of preprocessing chest X-ray images for classification tasks	110

С. О. ФЕДУЛОВА, д-р екон. наук, проф.

С. Б. ХОЛОД, д-р екон. наук, проф.

В. В. СОКОЛОВА, д-р філософії з публічного управління та адміністрування

ГЕОПОЛІТИЧНА ПРОДОВОЛЬЧА БЕЗПЕКА: ТРАНСФОРМАЦІЯ ПРОДОВОЛЬЧИХ СИСТЕМ¹

Резюме. Це дослідження має на меті зробити внесок у наукову дискусію щодо формування бачення геополітичної продовольчої безпеки та дослідити пов'язані з нею процеси трансформації глобальних продовольчих систем. Нині продовольча безпека стала однією з ключових засад національного суверенітету. Будь-які прогалини в цій сфері можуть бути швидко використані геополітичними опонентами. У статті акцентовано на посиленні ролі геополітики у функціонуванні глобальної продовольчої системи, що викликає занепокоєння. Це може означати, що продовольчі ресурси дедалі частіше розглядатимуться як інструмент впливу або навіть тиску — як у ситуаціях відкритого конфлікту, так і в умовах міжнародної конкуренції. Автори дослідження пропонують розглядати геополітичну продовольчу безпеку через поєднання фундаментальних вимірів класичної продовольчої безпеки з геополітичними факторами та визначають такі складники геополітичної продовольчої безпеки, як продовольчий суверенітет; самозабезпеченість продовольством; контроль над ресурсами аграрного виробництва; стійкість продовольчих систем; геоекономічна позиція на світових ринках і політичне використання продовольства. У статті також висвітлюються трансформаційні процеси у функціонуванні продовольчих систем у світі під впливом геополітики продовольства. Визначено, що сучасне використання голоду як зброї діє значно складніше, аніж просто відмова в продажу продукції. Вона передбачає цілеспрямоване руйнування сільськогосподарської інфраструктури, використання продовольчої допомоги для політичного маніпулювання та навіть стратегічне провокування продовольчої інфляції для дестабілізації урядів. Також у дослідженні визначено, що продовольча незабезпеченість функціонує як своєрідний “мультиплікатор ризиків”, посилюючи нестабільність одразу в декількох вимірах: соціальної нестабільності, розширенні вербування до збройних угруповань, загостренні конкуренції за ресурси. Аналіз доводить, що продовольство стало невіддільною частиною гібридних війн. Зазначені тенденції неминуче ведуть до трансформації продовольчих систем світу, що передбачає перехід до стійких, здорових та інклюзивних моделей, які враховують геополітичні кризи, клімат і торгівлю.

Ключові слова: продовольча безпека, геополітика продовольства, голодування, міжнародний конфлікт, продовольча влада, продовольча незабезпеченість.

ВСТУП

У сучасній системі міжнародних відносин, де традиційні засоби ведення війни дедалі частіше переплітаються з економічним примусом і технологічним домінуванням, продовольство трансформувалося з базової гуманітарної категорії в стратегічний ресурс найвищого порядку.

Концепція “продовольство як зброя” (food as a weapon) більше не є метафорою, що описує середньовічні облоги. Нині це багатогранний інструмент геополітичного тиску, що охоплює контроль над ланцюгами постачань, маніпулювання цінами на світових біржах, монополізацію

генетичного матеріалу насіння та використання добрив як важеля дипломатичного впливу [1]. Цілеспрямоване знищення зернових складів, зрощувальної інфраструктури, атаки на порти кваліфікуються низкою аналітиків як застосування голоду як зброї. Резолюція Ради Безпеки ООН 2417 (2018) забороняє використання голоду як методу ведення війни, проте механізму примусового виконання немає.

Продовольча безпека, тобто спроможність населення мати стабільний доступ до достатньої кількості безпечної та поживної їжі, стала однією з ключових засад національного

¹ Стаття підготовлена в рамках реалізації міжнародного проекту «Висвітлення нової архітектури європейської безпеки у викладанні та наукових дослідженнях» № 101126795 – EuSANU – ERASMUS-JMO-2023-HEI-TCH-RSCH.



Co-funded by
the European Union

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

Фінансується Європейським Союзом. Проте висловлені погляди та думки належать лише автору/-ам і не обов'язково відображають погляди Європейського Союзу чи Європейського виконавчого агентства з питань освіти та культури. Ані Європейський Союз, ані грантодавець не можуть нести за них відповідальність.

суверенітету. Будь-які прогалини в цій сфері можуть бути швидко використані геополітичними опонентами.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Найсерйознішою загрозою для продовольчої безпеки дедалі відчутніше стає роздробленість світової економічної та торговельної системи. Хоча аграрний сектор досить тривалий час функціонує в умовах значних торговельних обмежень, нові тарифні заходи з боку США та низки інших держав можуть ще більше розділити ключові світові аграрні ринки.

Посилення ролі геополітики у функціонуванні глобальної продовольчої системи викликає занепокоєння. Це може означати, що продовольчі ресурси дедалі частіше розглядатимуться як інструмент впливу або навіть тиску — як у ситуаціях відкритого конфлікту, так і в умовах міжнародної конкуренції.

На відміну від класичної концепції продовольчої безпеки, у науковому дискурсі не існує єдиного стандартизованого бачення геополітичної продовольчої безпеки. Однак здебільшого геополітична перспектива у сфері продовольства враховує баланс сил між державами, контроль над ресурсами та здатність протистояти зовнішньому економічному чи політичному тиску.

Метою цієї статті є розвиток теоретичного осмислення геополітичної продовольчої безпеки та узагальнення наукових напрацювань, що висвітлюють трансформаційні процеси у функціонуванні продовольчих систем.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Базове визначення продовольчої безпеки закріплено на Всесвітньому саміті з продовольства у 1996 р.: вона існує, коли “всі люди завжди мають фізичний, соціальний та економічний доступ до достатньої кількості безпечного й поживного продовольства”. У 2009 р. Комітет із всесвітньої продовольчої безпеки уточнив концепцію, додавши четвертий фундаментальний вимір (**табл. 1**) [1; 2].

У 2020 р. Група експертів високого рівня (HLPE) при ФАО запропонувала розширити наявну модель, додавши два нові виміри: суб’єктність (agency), що означає здатність людей і спільнот самостійно визначати рішення щодо власного харчування, а також стійкість (sustainability), що відображає екологічну сталість продовольчих систем. У результаті базова концепція була трансформована в модель із *шести складових* [3].

Паралельно з посиленням ролі геополітики у функціонуванні глобальної продовольчої системи дедалі частіше трапляються згадки про концепт “продовольчої влади” (food power). Продовольча влада базується на асиметрії між країнами-експортерами, що володіють надлишками аграрної продукції, та країнами-імпортерами, чиє виживання залежить від зовнішніх постачань. Якщо нація, яка критично потребує імпорту зерна, стикається з політичною напруженістю зі своїм постачальником або якщо торгові шляхи перекриваються через геополітичну нестабільність, то її продовольча система миттєво стає об’єктом атаки [1]. Проте сучасна

Таблиця 1

Фундаментальні виміри продовольчої безпеки ФАО* та геополітичний вплив [1; 2]

Фундаментальні виміри продовольчої безпеки ФАО	Зміст і геополітичний ризик
Доступність (Availability)	Фізична наявність їжі, яка пов’язана з виробництвом, імпортом і резервами. Геополітичний ризик: блокади та знищення інфраструктури
Доступ (Access)	Економічна та фізична можливість придбати їжу. Геополітичний ризик: санкції, підвищення цін, девальвація валют
Використання (Utilization)	Засвоєння їжі організмом, що залежить від якості продуктів, води та медицини. Геополітичний ризик: руйнування санітарної та медичної інфраструктури
Стабільність (Stability)	Стійкість доступу до їжі в часі. Геополітичний ризик: конфлікти, цінова волатильність, кліматичні шоки

Примітка: *ФАО — Food and Agriculture Organization, FAO.

зброя голоду діє значно складніше, ніж просто відмова в продажу продукції. Вона передбачає цілеспрямоване руйнування сільськогосподарської інфраструктури, використання продовольчої допомоги для політичного маніпулювання та навіть стратегічне провокування продовольчої інфляції для дестабілізації урядів.

Історична ретроспектива використання їжі як зброї демонструє жахливі масштаби її застосування (табл. 2). Одним із найтрагічніших прикладів є штучний голод в Україні — Голодомор 1932–1933 рр., створений сталінською політикою для придушення національного опору, що коштував мільйонів життів [4]. У 1941 р. нацистський режим Німеччини реалізовував “план голоду”, спрямований на виснаження населення окупованих територій Радянського Союзу. У новітній час режим Башара Асада в Сирії застосовував тактику “голодування до підкорення” проти обложених міст, перетворюючи доступ до хліба на інструмент примусу до капітуляції [4].

Дані, наведені в таблиці 2, демонструють, що продовольчі ресурси можуть застосовуватися як засіб впливу як у міжнародних протистояннях, так і у внутрішніх соціальних конфліктах, коли контроль над доступом до необхідного рівня споживання фактично стає механізмом економічного та політичного тиску.

Отже, традиційна концепція ФАО переважно характеризує стан продовольчої безпеки, однак

майже не розкриває владні та політичні механізми, що впливають на її формування. Геополітичний підхід розширює це бачення, вводячи три ключові виміри, які залишаються недостатньо відображеними в класичній концепції [7]:

- *продовольчий суверенітет*, тобто спроможність держави самостійно визначати політику розвитку власної продовольчої системи без зовнішнього тиску чи примусу;
- *самозабезпеченість продовольством і стратегічна автономія*, що визначають рівень незалежності від провідних постачальників ключових ресурсів виробництва, серед яких насіння, добрива, техніка або водні ресурси;
- *геополітична стійкість продовольчих систем*, тобто здатність країни протистояти навмисному зовнішньому впливу, враховуючи санкції, блокади, торговельні конфлікти та інформаційні кампанії.

У науковій літературі поняття геополітичної продовольчої безпеки не має єдиної загальноприйнятої моделі, але, як уже було зазначено, воно зазвичай формується як розширення класичної концепції продовольчої безпеки ФАО (availability, access, utilization, stability) із додаванням чинників влади, державної автономії та міжнародної конкуренції.

Аналіз наукової літератури дає змогу дійти висновку, що головні складники геополітичної

Таблиця 2

Історична ретроспектива використання їжі як зброї

Історичний період / Конфлікт	Суб'єкт застосування	Методи	Наслідки для населення
Голодомор (1932–1933)	СРСР (Сталін)	Примусове вилучення продовольства, блокада сіл	Мільйони загиблих, знищення соціальної структури
Друга світова війна (1941)	Нацистська Німеччина	План голоду (Hungerplan), блокада Ленінграда	Масовий голод на окупованих територіях і в облозі
Громадянська війна в Сирії (після 2011)	Режим Б. Асада	Кампанія “Голодування до підкорення”, блокада міст	Тотальне виснаження опозиційних районів
Ембарго Катару (2017)	Саудівська Аравія, ОАЕ	Закриття єдиного сухопутного кордону та логістичних шляхів	Швидка зміна постачальників, зростання націоналізму
Облога Маріуполя (2022)	Росія	Інтенсивні обстріли та бомбардування не дали змоги міжнародним гуманітарним організаціям налагодити стабільні гуманітарні коридори до міста	Цивільне населення та військові були змушені залишити місто після тривалого періоду без їжі, води та електроенергії

Джерело: складено авторами за [4–6].

продовольчої безпеки можна представити в такий спосіб (рис. 1).

1. Продовольчий суверенітет. Його можна розглядати як здатність держави самостійно формувати свою аграрну та продовольчу політику без критичної залежності від зовнішніх акторів, транснаціональних корпорацій або політичного тиску. Така позиція передбачає контроль над земельними ресурсами, національну аграрну політику, незалежність у забезпеченні стратегічними продуктами.

2. Самозабезпеченість продовольством. Рівень самозабезпеченості продовольством оцінюють за співвідношенням внутрішнього виробництва та внутрішнього споживання з обчисленням показників коефіцієнта продовольчої самодостатності; залежності від імпорту та рівня формування стратегічних резервів. Багато країн розглядають продовольство як елемент національної безпеки.

3. Контроль над ресурсами аграрного виробництва. Геополітика продовольства значною мірою визначається контролем над такими ключовими ресурсами, як земля, вода, насіння, добрива, енергія, технології. Хто контролює ці ресурси — той контролює майбутнє виробництва їжі.

4. Стійкість продовольчих систем. Зазначена стійкість виражається через здатність системи витримувати війни, санкції, блокади, кліматичні кризи та руйнування логістики. Стійкість охоплює резерви, диверсифікацію ринків та адаптивність системи.

5. Геоекономічна позиція на світових ринках. Важливим елементом є роль держави в глобальній торгівлі продовольством (експортер, імпортер, транзитна держава). Порушення логістики чи торгових потоків може спричинити глобальні продовольчі кризи.

6. Політичне використання продовольства. Їжа може застосовуватись як інструмент впливу через торгові ембарго, блокади портів, санкції, маніпуляції цінами. Саме тому продовольча безпека розглядається як елемент геополітичної сили.

Повномасштабне вторгнення Росії в Україну у 2022 р. спровокувало найбільше зростання глобальної продовольчої незахищеності за останнє століття. Україна, яку традиційно називають “житницею світу”, до війни забезпечувала близько 46 % світового експорту соняшникової олії, 9 % пшениці, 17 % ячменю та 12 % кукурудзи [10]. Російська стратегія з перших днів



Рис. 1. Складники геополітичної продовольчої безпеки

Джерело: складено авторами за [1; 2; 7–9].

Довоєнний рівень залежності від імпорту зерна з України

Країна / Регіон	Рівень залежності від імпорту зерна з України	Соціально-економічні наслідки війни
Ліван, Ємен, Лівія	30 % і більше імпорту пшениці	Ризик голоду, зростання цін, політична нестабільність
Східна Африка	45 % імпорту зернових	Загострення хронічної продовольчої кризи
Регіон MENA (Близький Схід)	Третина всіх постачань зернових	Висока інфляція, навантаження на бюджети через субсидії
Глобальний ринок	46 % експорту соняшникової олії	Дефіцит рослинних жирів, переорієнтація на сою та пальмову олію

Джерело: складено авторами за [10–12].

війни була спрямована не лише на захоплення територій, а й на системне знищення аграрного потенціалу України як частини ширшої геополітичної війни проти Глобального Заходу та Глобального Півдня (табл. 3).

Це мало на меті створення дефіциту на світовому ринку, який Росія згодом спробувала заповнити власним експортом, використовуючи його як інструмент “м’якої сили” та політичного підкупу країн Глобального Півдня.

Упродовж липня–жовтня 2024 р. російський експорт пшениці до Субсахарської Африки сягнув 2,7 млн т — це близько п’ятої частини загального експорту країни та на 39 % більше, ніж за той самий період минулого року [13]. Окрім комерційних постачань, Росія передавала зерно як гуманітарну допомогу державам-партнерам, серед яких Буркіна-Фасо, Еритрея, Малі, Зімбабве, Сомалі та Центральноафриканська Республіка.

Збільшення експорту зерна відбувається на тлі розширення російського впливу у сфері безпеки в Сахельському регіоні, куди були направлені російські військові у складі “Африканського корпусу”. Паралельно Центральноафриканська Республіка прагне розмістити російську військову базу, розраховуючи отримати в обмін озброєння та військову підготовку [14].

Якщо зерно — це кінцевий продукт, то добрива є критично важливим базовим ресурсом, контроль над яким надає державі можливість впливати на врожайність в інших регіонах світу. Геополітична вага добрив визначається концентрацією мінеральних ресурсів у невеликій кількості країн. Азотні добрива залежать від природного газу, тоді як фосфорні та калійні ресурси зосереджені в геологічних родовищах лише декількох держав.

Росія разом зі своїм стратегічним партнером Білоруссю відіграє ключову роль на глобальному ринку добрив, контролюючи близько

40 % світового експорту калію. Окрім того, Росія є провідним експортером азотних добрив: станом на 2021 р. на неї припадало приблизно 23 % світових постачань аміаку та 14 % експорту сечовини [15]. Після початку повномасштабного вторгнення держава запровадила квоти та експортні обмеження на добрива, що спричинило різке зростання глобальних цін — приблизно на 50 % у період із лютого до квітня 2022 р. (рис. 2, 3) [15].

Такі обмеження суттєво посилили ризики для аграрного виробництва в країнах, які значною мірою залежать від імпорту добрив, зокрема у Бразилії, яка є одним із найбільших світових виробників сільськогосподарської продукції. У результаті це змусило окремі держави шукати дипломатичні та економічні механізми для збереження доступу до критично важливих ресурсів [16].

Європейський Союз є одним із найбільш залежних від імпорту добрив регіонів світу. Понад 60 % добрив, що споживаються в ЄС, імпортуються, а залежність від постачань калію та фосфору є майже тотальною [17]. До війни Росія забезпечувала 25 % постачань азотних

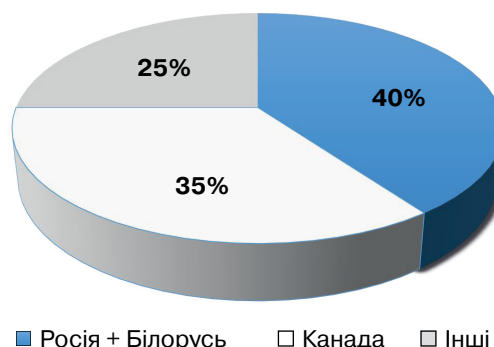


Рис. 2. Питома вага країн на ринку калійних добрив, %

Джерело: складено авторами за [15; 16].

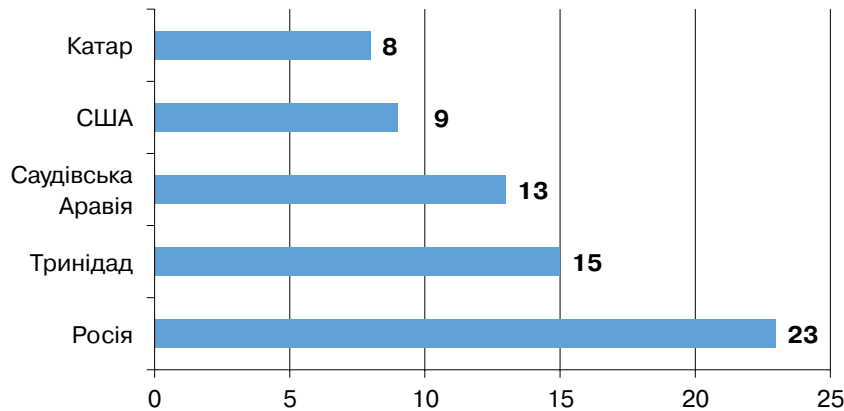


Рис. 3. Топ-5 експортерів аміаку, %

Джерело: складено авторами за [15; 16].

добрив до ЄС. Відмова від російського газу та добрив поставила європейських фермерів у складне становище, змушуючи їх купувати значно дорожчі аналоги зі США чи Катару [17].

Варто зазначити, що сучасна геополітика продовольства не обмежується державами; вона охоплює й транснаціональні корпорації, які контролюють інтелектуальну власність у сфері біотехнологій, а саме — насіння та засоби захисту рослин. Сьогодні на ринку утворилася олігополія, де всього чотири компанії (Bayer, Corteva, Syngenta та BASF) контролюють 60–70 % світового ринку пестицидів та 50–60 % ринку насіння [18].

В умовах глобальної нестабільності держави також дедалі частіше використовують продовольчий протекціонізм для захисту власного населення, що часто має руйнівні наслідки для світової стабільності. Коли великий експортер обмежує продажі, то це викликає паніку на ринку та провокує інші країни до аналогічних дій, створюючи каскадний ефект зростання цін.

Також треба зазначити, що майбутнє геополітики продовольства буде нерозривно пов'язане зі зміною клімату, що постає як глобальний дестабілізатор. Найбільш вразливі до кліматичних змін регіони, розташовані поблизу екватора та населені значною часткою бідного населення світу, зіштовхнуться з частішими екстремальними погодними явищами — посухами, хвилями спеки та повенями. Це спричинить деградацію продовольчих систем і посилить глобальний міграційний тиск на більш розвинені економіки.

Близько 70 % доступної прісної води у світі спрямовується на потреби сільського господарства. Через це спільні водні басейни між державами можуть перетворюватися на геополітичні точки конфлікту: контроль над дамбами у верхній течії річок може використовуватися як

засіб впливу на аграрне виробництво та продовольчу стабільність сусідів.

Отже, продовольча незабезпеченість функціонує як своєрідний “мультиплікатор ризиків”, посилюючи нестабільність одразу в декількох вимірах, що окреслено нижче.

1. Соціальна нестабільність.

Різке зростання цін на продукти харчування — явище, яке часто називають “хлібними бунтами”, — здатне швидко трансформуватися в масштабні політичні протести, що спрямовані проти корупції та неефективного управління. Подібні процеси спостерігалися під час продовольчих криз 2008 та 2011 рр., що в окремих державах завершилися зміною політичних режимів [20].

2. Розширення вербування до збройних угруповань.

Коли аграрні системи руйнуються, для молодого населення зменшуються альтернативні економічні можливості. У таких умовах приєднання до повстанських або екстремістських груп може розглядатися як спосіб забезпечити базові потреби, зокрема доступ до їжі та доходу.

3. Загострення конкуренції за ресурси.

Неврожаї, пов'язані з кліматичними змінами, підсилюють боротьбу за обмежені ресурси — воду, землю та пасовища. Це часто призводить до міжгрупових і міжетнічних конфліктів, як це неодноразово фіксувалося в Сахельському регіоні [1].

Аналіз показує, що продовольство стало невіддільною частиною гібридної війни. Зв'язок між продовольчою незабезпеченістю та насильницькими конфліктами має двосторонній і взаємопідсилювальний характер. З одного боку, збройні протистояння є одним із ключових чинників виникнення голоду, а з іншого — дефіцит продовольства може стати потужним каталізатором нових конфліктів.

ВИСНОВКИ

У XXI ст. продовольство постає не лише базовим гуманітарним правом людини, а й стратегічним ресурсом і засобом геополітичного впливу. У представленому дослідженні поняття геополітичної продовольчої безпеки пропонується розглядати як поєднання фундаментальних вимірів класичної продовольчої безпеки (гарантований доступ до достатньої, безпечної та поживної їжі для всіх у будь-який час) з такими геополітичними чинниками, як війни, санкції чи блокада портів, що порушують ланцюги поставчань. Автори визначили складники геополітичної продовольчої безпеки, серед яких: продовольчий суверенітет; самозабезпеченість продовольством; контроль над ресурсами аграрного виробництва; стійкість продовольчих систем; геоекономічна позиція на світових ринках і політичне використання продовольства.

Держави, які недооцінюють геополітичний аспект функціонування власної продовольчої системи, можуть залишатися стратегічно вразливими навіть за наявності достатніх обсягів внутрішнього виробництва. Суверенна, диверсифікована та технологічно самодостатня продовольча система виходить за межі звичайної аграрної політики, оскільки фактично формує одну з ключових засад національної безпеки.

У дослідженні визначено, що продовольство стало невіддільною частиною гібридних війн, а зв'язок між продовольчою незабезпеченістю та насильницькими конфліктами має двосторонній і взаємопідсилювальний характер, що породжує "мультиплікатор ризиків" для країн. Зазначені тенденції неминуче ведуть до трансформації продовольчих систем світу, що передбачає перехід до стійких, здорових та інклюзивних моделей, які враховують геополітичні кризи, клімат і торгівлю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Geopolitical Food Security [Electronic resource] / Sustainability Directory. — 2024. — Access mode: <https://fashion.sustainability-directory.com/term/geopolitical-food-security/>.
2. Committee on World Food Security: Official website [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.fao.org/cfs/en/>.
3. HLPE. Food security and nutrition: building a global narrative towards 2030. — Rome : HLPE, Committee on World Food Security, 2020. — 150 p.
4. Mudie-Mantz A., Werz M., Werz M. Turning Dependency Into Despair [Electronic resource] / A. Mudie-Mantz, M. Werz, M. Werz // The Munich Security Conference. — 2017. — Access mode: <https://securityconference.org/en/publications/analyses/food-weaponization-turning-dependency-into-despair/>.
5. Koch N. Food as a weapon? The geopolitics of food and the Qatar-Gulf rift [Electronic resource] / N. Koch // The Peace Research Institute Oslo (PRIO). — 2020. — Access mode: <https://www.prio.org/comments/1211>.
6. Wilson N. Mississippi Delta History Describe Food Power Against and For Blacks in US [Electronic resource] / N. Wilson // Sanford School of Public Policy, Duke University. — 2024. — Access mode: <https://wfpc.sanford.duke.edu/podcasts/mississippi-delta-history-describe-food-power-against-and-for-blacks-in-us/>.
7. Increasing Connectivity for Enhanced Food Supply Chain Resilience [Electronic resource] / World Bank Group. — 2024. — Access mode: https://www.worldbank.org/en/results/2024/04/11/increasing-connectivity-for-enhanced-food-supply-chain-resilience?utm_source=chatgpt.com.
8. Quitzow R. et al. The Nexus of Geopolitics, Decarbonization, and Food Security: Fertilizer Supply Chains / R. Quitzow et al. // ScienceDirect. — 2025. — 101173.
9. Zhou J. et al. The Geopolitics of Food Security: Barriers to the SDG of Zero Hunger [Electronic resource] / J. Zhou et al. // SIPRI Insights on Peace and Security. — 2020. — Access mode: <https://www.sipri.org/publications/2020/sipri-insights-peace-and-security/geopolitics-food-security-barriers-sustainable-development-goal-zero-hunger>.
10. Filho W. et al. How the War in Ukraine Affects Food Security / W. Filho et al. // Foods. — 2023. — Vol. 12 (21). — 3996. PMID: 37959115; PMCID: PMC10648107.
11. Glauben Th. et al. The War in Ukraine, Agricultural Trade and Risks to Global Food Security [Electronic resource] / Th. Glauben et al. // Intereconomics. — 2022. — Vol. 57, No. 3. — Access mode: <https://www.intereconomics.eu/contents/year/2022/number/3/article/the-war-in-ukraine-agricultural-trade-and-risks-to-global-food-security.html>.
12. Sharma T., Dhawale H. Addressing the Impact on India of Indonesia's 2022 Export Ban on Palm Oil [Electronic resource] / T. Sharma, H. Dhawale // Institute H21 z.ú. — 2022. — Access mode: <https://www.ih21.org/aktuality/addressing-impact-india-indonesia-export-ban-palm-oil>.
13. Russia Uses Grain Shipments to Exert Influence on African Nations [Electronic resource] / ADF. — 2024. — Access mode: <https://adf-magazine.com/2024/04/russia-uses-grain-shipments-to-exert-influence-on-african-nations/>.
14. Klomegah K. Africa Beyond Russia's Grains Partnerships. [Electronic resource] / K. Klomegah // ModernDiplomacy. — 2024. — Access mode: <https://moderndiplomacy.eu/2024/02/28/africa-beyond-russias-grains-partnerships/>.
15. Kee J. et al. Global Fertilizer Market Challenged by Russia's Invasion of Ukraine [Electronic resource] / J. Kee et al. // Economic Research Service, U.S. Department of Agriculture. — 2023. — Access mode: <https://www.ers.usda.gov/amber-waves/2023/september/global-fertilizer-market-challenged-by-russia-s-invasion-of-ukraine>.
16. Grant J., Arita S., Xie C., Sydow S. Russia's Invasion of Ukraine: The War's Initial Impacts on Agricultural Trade [Electronic resource] / J. Grant, S. Arita, C. Xie, S. Sydow // Choices. — 2023. — Access mode: <https://www.choicesmagazine.org/choices-magazine/theme-articles/turmoil-in-global-food-agricultural-and-input-markets-implications-of-russias-invasion-of-ukraine/russias-invasion-of-ukraine-the-wars-initial-impacts-on-agricultural-trade>.
17. Abis S. Geopolitics of Fertilisers: The Dependence of European Agriculture [Electronic resource] /

- S. Abis // French Institute for International and Strategic Affairs (IRIS). — 2026. — Access mode: <https://www.iris-france.org/en/geopolitics-of-fertilisers-the-dependence-of-european-agriculture/>.
18. Clapp J. How a few giant companies came to dominate global food [Electronic resource] / J. Clapp // *The land and climate Review*. — 2025. — Access mode: <https://landclimate.org/how-a-few-giant-companies-came-to-dominate-global-food/>.
 19. Fedulova S., Zadoia A., Shkura I., Komirna V., & Savchenko M. Determining the impact of virtual water scarcity risk on the global food crisis 2022 as a result of hostilities / S. Fedulova, A. Zadoia, I. Shkura, V. Komirna, M. Savchenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. — 2023. — No. 1/13 (121). — P. 18–31.
 20. Delgado C., Murugani V., Tschunkert K. Food systems in conflict and peacebuilding settings. Pathways and Interconnection [Electronic resource] / C. Delgado, V. Murugani, K. Tschunkert // Stockholm International Peace Research Institute. — 2021. — Access mode: https://www.sipri.org/sites/default/files/2021-06/2106_food_systems.pdf.

REFERENCES

1. (2024). Geopolitical Food Security. Sustainability Directory. Retrieved from: <https://fashion.sustainability-directory.com/term/geopolitical-food-security/>.
2. (2026). Committee on World Food Security. Retrieved from: <https://www.fao.org/cfs/en/>.
3. (2020). HLPE. Food security and nutrition: building a global narrative towards 2030. Rome: *HLPE, Committee on World Food Security*. 150 p.
4. Mudie-Mantz, A., Werz, M., Werz, M. (2017). Turning Dependency Into Despair. *The Munich Security Conference*. Retrieved from: <https://securityconference.org/en/publications/analyses/food-weaponization-turning-dependency-into-despair/>.
5. Koch, N. (2020). Food as a weapon? The geopolitics of food and the Qatar-Gulf rift. *The Peace Research Institute Oslo (PRIO)*. Retrieved from: <https://www.prio.org/comments/1211>.
6. Wilson, N. (2024). Mississippi Delta History Describe Food Power Against and For Blacks in US. *Sanford School of Public Policy. Duke University*. Retrieved from: <https://wfpc.sanford.duke.edu/podcasts/mississippi-delta-history-describe-food-power-against-and-for-blacks-in-us/>.
7. (2024). Increasing Connectivity for Enhanced Food Supply Chain Resilience. World Bank Group. Retrieved from: https://www.worldbank.org/en/results/2024/04/11/increasing-connectivity-for-enhanced-food-supply-chain-resilience?utm_source=chatgpt.com.
8. Quitzow, R. et al. (2025). The Nexus of Geopolitics, Decarbonization, and Food Security: Fertilizer Supply Chains. *ScienceDirect*, January, 101173.
9. Zhou, J. et al. (2020). The Geopolitics of Food Security: Barriers to the SDG of Zero Hunger. *SIPRI Insights on Peace and Security*. Retrieved from: <https://www.sipri.org/publications/2020/sipri-insights-peace-and-security/geopolitics-food-security-barriers-sustainable-development-goal-zero-hunger>.
10. Filho, W. et al. (2023). How the War in Ukraine Affects Food Security. *Foods*. 12(21): 3996. PMID: 37959115; PMID: PMC10648107.
11. Glauben, Th. et al. (2022). The War in Ukraine, Agricultural Trade and Risks to Global Food Security. *Intereconomics*. 57(3). Retrieved from: <https://www.intereconomics.eu/contents/year/2022/number/3/article/the-war-in-ukraine-agricultural-trade-and-risks-to-global-food-security.html>.
12. Sharma, T., & Dhawale, H. (2022). Addressing the Impact on India of Indonesia's 2022 Export Ban on Palm Oil. *Institute H21 z.ú.* Retrieved from: <https://www.ih21.org/aktuality/addressing-impact-india-indonesia-export-ban-palm-oil>.
13. (2024). Russia Uses Grain Shipments to Exert Influence on African Nations. *ADF*. Retrieved from: <https://adf-magazine.com/2024/04/russia-uses-grain-shipments-to-exert-influence-on-african-nations/>.
14. Klomegah, K. (2024). Africa Beyond Russia's Grains Partnerships. *ModernDiplomacy*. Retrieved from: <https://moderndiplomacy.eu/2024/02/28/africa-beyond-russias-grains-partnerships/>.
15. Kee, J. et al. (2023). Global Fertilizer Market Challenged by Russia's Invasion of Ukraine. Economic Research Service. U.S. *Department of Agriculture*. URL: <https://www.ers.usda.gov/amber-waves/2023/september/global-fertilizer-market-challenged-by-russia-s-invasion-of-ukraine>.
16. Grant, J., Arita, S., Xie, C., & Sydow, S. (2023). Russia's Invasion of Ukraine: The War's Initial Impacts on Agricultural Trade. *Choices*. Retrieved from: <https://www.choicesmagazine.org/choices-magazine/theme-articles/turmoil-in-global-food-agricultural-and-input-markets-implications-of-russias-invasion-of-ukraine/russias-invasion-of-ukraine-the-wars-initial-impacts-on-agricultural-trade>.
17. Abis, S. (2026). Geopolitics of Fertilisers: The Dependence of European Agriculture. *French Institute for International and Strategic Affairs (IRIS)*. Retrieved from: <https://www.iris-france.org/en/geopolitics-of-fertilisers-the-dependence-of-european-agriculture/>.
18. Clapp, J. (2025). How a few giant companies came to dominate global food. *The land and climate Review*. Retrieved from: <https://landclimate.org/how-a-few-giant-companies-came-to-dominate-global-food/>.
19. Fedulova, S., Zadoia, A., Shkura, I., Komirna, V., & Savchenko, M. (2023). Determining the impact of virtual water scarcity risk on the global food crisis 2022 as a result of hostilities. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/13(121), 18-31.
20. Delgado, C., Murugani, V., & Tschunkert, K. (2021). Food systems in conflict and peacebuilding settings. *Pathways and Interconnection*. Stockholm International Peace Research Institute. URL: https://www.sipri.org/sites/default/files/2021-06/2106_food_systems.pdf.

S. O. FEDULOVA, D. Sc. in Economics, Professor

S. B. KHOLOD, D. Sc. in Economics, Professor

V. V. SOKOLOVA, PhD in Public Administration and Management

GEOPOLITICAL FOOD SECURITY: THE TRANSFORMATION OF FOOD SYSTEMS

Abstract. *This study aims to contribute to the academic discussion on the concept of geopolitical food security and to examine the related processes that are transforming global food systems. Today, food security has become one of the fundamental pillars of national sovereignty. Any vulnerabilities in this area can quickly be exploited by geopolitical rivals. The article emphasizes the growing role of geopolitics in the functioning of the global food system, a trend that raises increasing concern. It suggests that food resources are increasingly viewed as instruments of influence or even pressure – both in situations of open conflict and conditions of international competition. The authors propose conceptualizing geopolitical food security through the integration of the core dimensions of classical food security with geopolitical factors. In this context, the key components of geopolitical food security are identified as follows: food sovereignty; food self-sufficiency; control over agricultural production resources; resilience of food systems; geo-economic positioning in global markets; and the political use of food. The article also highlights the transformative processes currently reshaping food systems worldwide under the influence of food geopolitics. It is argued that the modern weaponization of hunger operates in far more complex ways than simply restricting access to food supplies. It may involve the deliberate destruction of agricultural infrastructure, the use of food aid as a tool of political manipulation, and even the strategic triggering of food inflation aimed at destabilizing governments. The study further demonstrates that food insecurity functions as a kind of risk multiplier, intensifying instability across several dimensions: social unrest, increased recruitment into armed groups, and intensified competition over resources. The analysis shows that food has become an integral component of hybrid warfare. These trends inevitably lead to the transformation of global food systems, driving a transition toward sustainable, healthy, and inclusive models that take into account geopolitical crises, climate challenges, and shifts in global trade.*

Keywords: food security, food geopolitics, hunger, international conflicts, food power, food insecurity.

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

Федулова Світлана Олександрівна — д-р екон. наук, проф., завкафедри глобальної економіки, ВНЗ “Університет імені Альфреда Нобеля”, вул. Січеславська Набережна, 18, м. Дніпро, Україна, 49000; +38 (067) 775-76-89; fedulova.s@duan.edu.ua; ORCID: 0000-0002-5163-3890

Холод Сергій Борисович — д-р екон. наук, проф., ректор, ВНЗ “Університет імені Альфреда Нобеля”, вул. Січеславська Набережна, 18, м. Дніпро, Україна, 49000; +38 (050) 320-23-20; kholod.sergii@gmail.com; ORCID: 0000-0003-2556-864X

Соколова Вікторія Вікторівна — д-р філософії з публічного управління та адміністрування, проректор з наукової та міжнародної діяльності, ВНЗ “Університет імені Альфреда Нобеля”, вул. Січеславська Набережна, 18, м. Дніпро, Україна, 49000; +38 (067) 545-83-88; sokolova.v@duan.edu.ua; ORCID: 0000-0002-1162-2396

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fedulova S. O. — D. Sc. in Economics, Professor, Head of the Department of Global Economy, Higher Education Institution “Alfred Nobel University”, 18, Sicheslavska Naberezhna Str., Dnipro, Ukraine, 49000; +38 (067) 775-76-89; fedulova.s@duan.edu.ua; ORCID: 0000-0002-5163-3890

Kholod S. B. — D. Sc. in Economics, Professor, Rector, Higher Education Institution “Alfred Nobel University”, 18, Sicheslavska Naberezhna Str., Dnipro, Ukraine, 49000; +38 (050) 320-23-20; kholod.sergii@gmail.com; ORCID: 0000-0003-2556-864X

Sokolova V. V. — PhD in Public Administration and Management, Vice-Rector for Research and International Cooperation, Higher Education Institution “Alfred Nobel University”, 18, Sicheslavska Naberezhna Str., Dnipro, Ukraine, 49000; +38 (067) 545-83-88; sokolova.v@duan.edu.ua; ORCID: 0000-0002-1162-2396.

Надійшла до редакції 04.03.2026

Прийнята до друку 13.03.2026



А. Б. ОСАДЧА, С. Н. С.

АНАЛІЗ СТАНУ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРІОРИТЕТНИХ НАПРЯМІВ НАУКОВОЇ ТА ІННОВАЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ В ЕНЕРГЕТИЧНІЙ СФЕРІ

Резюме. Сектор енергетики відіграє критичну роль у забезпеченні економічної безпеки та сталого розвитку держави. У контексті інтеграції до Європейського енергетичного простору, модернізації інфраструктури та підвищення енергоефективності роль наукових досліджень і розробок у сфері енергетики значно зростає.

У статті представлено результати авторського дослідження щодо реалізації пріоритетних напрямів наукової та інноваційної діяльності в енергетичній сфері, затверджених постановами Кабінету Міністрів України від 30 квітня 2024 р. № 476 та від 28 грудня 2016 р. № 1056 (зі змінами) на період до 31 грудня року, що настає за роком припинення або скасування воєнного стану в Україні.

Здійснено комплексний аналіз стану фінансування та результативності наукових досліджень і розробок за пріоритетним напрямом розвитку науки і техніки “Енергетика та енергоефективність” у розрізі пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень та науково-технічних розробок і за стратегічним пріоритетним напрямом “Освоєння нових технологій транспортування енергії, впровадження енергоефективних, ресурсозберігаючих технологій, освоєння альтернативних джерел енергії” у розрізі середньострокових пріоритетних напрямів загальнодержавного рівня.

Додатково здійснено бібліометричний аналіз публікацій із проблем енергетики та енергоефективності, індексованих у міжнародній наукометричній базі даних Web of Science, що підтвердив стабільну міжнародну представленість українських дослідників попри вплив воєнного стану. Встановлено концентрацію наукової активності в провідних науково-освітніх центрах і домінування міждисциплінарних досліджень, зорієнтованих на розвиток відновлюваних джерел енергії, цифровізацію, підвищення енергоефективності та декарбонізацію енергетичного сектору.

За результатами аналізу окреслено ключові тенденції розвитку сектору енергетики та енергоефективності.

Ключові слова: енергетика, енергоефективність, пріоритетні тематичні напрями, середньострокові пріоритетні напрями, наукові (науково-технічні) роботи, наукова (науково-технічна) продукція.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Енергетичний сектор України перебуває в стані трансформації, зумовленої як глобальними викликами, так і внутрішніми чинниками. Зростання попиту на енергоресурси, обмеженість традиційних джерел, необхідність інтеграції до європейського енергетичного простору та виконання кліматичних зобов'язань формують потребу в модернізації енергетичної інфраструктури та підвищенні її стійкості. Додатковим чинником є масштабні руйнування енергетичних об'єктів унаслідок збройної агресії проти України, що суттєво ускладнює балансування системи та забезпечення надійного енергопостачання.

У контексті післявоєнного відновлення та необхідності підвищення енергетичної безпеки актуальним стає формування комплексної стратегії розвитку енергетики з акцентом на підвищення енергоефективності, децентралізацію виробництва та використання інноваційних технологій. Важливим є аналіз ефективності чинних регуляторних механізмів, оцінювання

їх відповідності європейським стандартам і пошук інструментів для прискорення модернізації енергосистеми. У цих умовах наукові дослідження, що спрямовані на оптимізацію енергоспоживання, відновлення інфраструктури та впровадження технологічно й економічно обґрунтованих рішень, набувають особливої значущості для забезпечення сталого розвитку України.

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАНИХ ПУБЛІКАЦІЙ

Сучасні тенденції у сфері енергоефективності та сталого енергоспоживання відображають необхідність комплексного підходу, що поєднує технічні, соціальні та економічні аспекти. Інтеграція соціальних і демографічних чинників у стратегії енергоефективності підвищує успішність впровадження нових технологій. У науковій праці [1] досліджено, наскільки і яким чином три перспективи можуть бути інтегровані в метатеоретичну структуру, зокрема для застосування до чотирьох різних тематичних досліджень: французька ядерна

енергетика, грецька енергія вітру, сонячна енергія Папуа-Нової Гвінеї та естонський нафтовий сланець.

Перешкоди у впровадженні енергоефективних заходів часто пов'язані з інформаційною нерівністю та культурними чинниками, що підкреслює важливість врахування соціально-поведінкових аспектів під час розроблення політики енергоефективності. У праці [2] акцентовано на необхідності підвищення обізнаності політиків щодо співіснування додаткових дисциплінарних перспектив соціальних наук для кращого визначення та розв'язання проблем енергоефективності.

Технологічні інновації залишаються ключовими для підвищення енергоефективності. Постпандемічні зміни в споживанні енергії та роль інтелектуальних мереж і автоматизації для оптимізації енергоспоживання розглянуто в дослідженні [3]. Використання регресійних моделей і метаевристичних алгоритмів дає змогу ефективно оптимізувати енергоспоживання будівель [4].

У промисловому секторі інтеграція енергетичної матеріалоефективності дає змогу одночасно скорочувати споживання енергії та зменшувати витрати на матеріали [5].

На міжнародному рівні енергоефективність визнається ключовим інструментом для скорочення енергоспоживання та досягнення кліматичних цілей, що потребує активізації узгоджених і послідовних дій у середньостроковій перспективі [6].

Аналіз публікацій, індексованих у міжнародній наукометричній базі даних Web of Science [7] за період 2020–2024 рр., свідчить, що світовий науковий простір у сфері енергетики розвивається під впливом декількох домінантних тенденцій. До них належать масштабування відновлюваних джерел енергії, декарбонізація економіки, цифровізація енергосистем (зокрема технології Digital Twin, Smart Grids, штучний інтелект), інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в енергомережі, а також підвищення енергоефективності будівель і промисловості. Динаміка світових публікацій у зазначених напрямках характеризується стійким зростанням, високою міждисциплінарністю та активною участю країн-лідерів, які забезпечують потужне фінансування енергетичних досліджень.

У межах української вибірки, що охоплює 1696 українських наукових публікацій за той самий період, аналіз динаміки публікацій характеризується помірною нерівномірністю, що може бути пов'язано як із коливаннями фінансування наукових досліджень, так і з впливом зовнішніх чинників, зокрема воєнного стану в

країні. У середньому щорічно оприлюднюється близько 140–170 публікацій, що дає змогу говорити про інтеграцію українських учених у міжнародний дослідницький дискурс і відповідність національних наукових пошуків актуальним світовим пріоритетам.

Найбільшу публікаційну активність у 2020–2024 рр. демонструють провідні науково-освітні центри України, зокрема Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (58 публікацій) [8], Національний університет біоресурсів і природокористування України (35) [9], Сумський державний університет (32) [10], Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна (31) [11] та Національний науковий центр “Харківський фізико-технічний інститут” (30) [12], що підтверджує концентрацію дослідницького потенціалу в ключових технічних і академічних установах.

Помірна кількісна динаміка та концентрація публікацій у декількох установах свідчать про обмежене фінансування галузі. Значна частина робіт має міждисциплінарний характер і поєднує технічні, економічні та управлінські підходи до розвитку енергетичного сектору. Отже, Україна є в тренді глобальних досліджень, проте подальше зміцнення позицій потребує стабільної та достатньої фінансової підтримки.

Розвиток сектору енергетики та енергоефективності станом на початок 2026 р. характеризується системною трансформацією від централізованої моделі до децентралізованих, цифрових і низьковуглецевих енергосистем. Ключовими драйверами змін виступають активне впровадження ВДЕ, розвиток систем накопичення, цифровізація управління мережами та зростання електрифікації транспорту й промисловості.

У сфері енергоефективності спостерігається посилення модернізаційних процесів у житловому та промисловому секторах, а також формування ринків гнучкості, що сприяє оптимізації енергоспоживання та зниженню навантаження на мережу.

Для України ці тенденції мають стратегічне значення, оскільки поєднують завдання відновлення енергосистеми з переходом до європейської моделі сталого розвитку. Реалізація принципу Build Back Better у межах Національного плану з енергетики та клімату [13] формує підґрунтя для підвищення енергетичної стійкості, декарбонізації та інтеграції до Європейського енергетичного простору.

Щорічний моніторинг реалізації пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень та науково-технічних розробок і середньо-

строкових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності загальнодержавного рівня в Україні проводять фахівці УкрІНТЕІ за підтримки МОН України як центрального органу виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері наукової, науково-технічної та інноваційної діяльності [14; 15].

Мета статті полягає у висвітленні результатів моніторингу та аналізу стану реалізації пріоритетних напрямів наукової та інноваційної діяльності в енергетичній сфері за даними головних розпорядників бюджетних коштів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

В умовах трансформації державної науково-технічної політики та зростання ролі енергетичної безпеки в забезпеченні сталого розвитку економіки актуальності набуває аналіз фінансування та результативності досліджень і розробок (ДіР) у сфері енергетики.

Обсяг видатків загального фонду державного бюджету на ДіР за пріоритетним напрямом **“Енергетика та енергоефективність”** (далі — пріоритетний напрям № 4) у 2024 р. становив 213,15 млн грн (2,7 % загального обсягу фінансування ДіР за сімома пріоритетними напрямами розвитку науки та техніки).

Динаміка обсягу видатків загального фонду на ДіР за пріоритетним напрямом № 4 за період 2020–2024 рр. свідчить про помірне щорічне зростання фінансування наукових досліджень в енергетичному секторі, яке досягло піку в 2023 р. (4,6 % загального обсягу видатків на ДіР за пріоритетними напрямами), що зумовлено необхідністю термінового відновлення та посилення стійкості енергетичної інфраструктури, а також зростанням витрат на безпеку та альтернативні джерела енергії. Однак у 2024 р.

спостерігається спад фінансування до рівня, нижчого в порівнянні з 2021 р. (**рис. 1**).

Динаміка фінансування відображає реакцію державної політики на кризові виклики в енергетичному секторі: зростання видатків у період загострення безпекових ризиків і потреби відновлення інфраструктури з подальшим коригуванням фінансування у 2024 році. Такий спад пов’язаний із перерозподілом бюджетних ресурсів, а не зі зменшенням стратегічної значущості наукових досліджень у сфері енергетики.

Найбільшу частку коштів спрямовано на ДіР за пріоритетним тематичним напрямом 4.1 “Системи генерації і транспортування електричної та теплової енергії” (32,6 %), а також за напрямами 4.4 “Енергоефективність і енергозбереження, ринки енергоресурсів” (27,5 %) та 4.3 “Технології розроблення та використання нових видів палива, відновлюваних і альтернативних джерел енергії та видів палива” (20,8 %) (**табл. 1**).

З чотирьох головних розпорядників, які спрямовували кошти на проведення ДіР за цим пріоритетним напрямом, найбільші частки загального обсягу видатків — 50,8 % та 47,3 % припадали на НАН та МОН України відповідно, значно менші — на Мінагрополітики України (1,7 %) та Міненерго України (0,2 %).

Найбільшу частку видатків на виконання ДіР у 2024 р за пріоритетним напрямом № 4 було спрямовано на дослідження за напрямом бюджетного базового фінансування “Прикладні ДіР” — 74,3 %, з яких 29,6 % (найбільше) витрачено за пріоритетним тематичним напрямом 4.1.

На ДіР за напрямами бюджетного програмно-цільового фінансування виділено 25,7 %, зокрема:

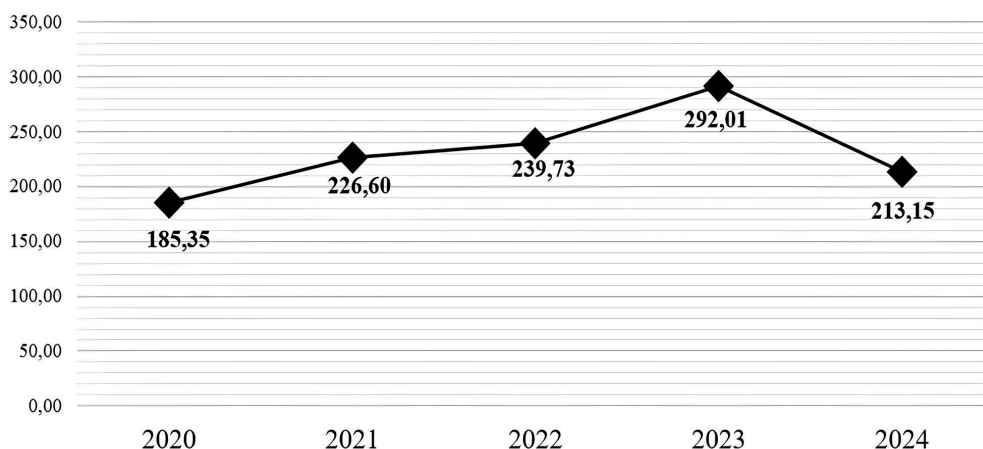


Рис. 1. Динаміка обсягу видатків загального фонду на ДіР за пріоритетним напрямом “Енергетика та енергоефективність” за період 2020–2024 рр., млн грн

- “Проекти грантового фінансування НФДУ” — 22,4 % (за трьома пріоритетними тематичними напрямками), найбільшу частку видатків (44,7 %) спрямовано на ДіР за пріоритетним тематичним напрямом 4.1;
- “Розробки за державним замовленням” — 2,0 % (за трьома пріоритетними тематичними напрямками), найбільшу частку видатків (53,2 %) спрямовано на ДіР за пріоритетним тематичним напрямом 4.4;
- “Проекти у межах міжнародного науково-технічного співробітництва” — 1,3 % (за одним пріоритетним тематичним напрямом 4.4) (табл. 2).

У 2024 р. виконано 151 науково-технічну розробку (НТР) (3,3 % загальної кількості робіт

за пріоритетними напрямками), з яких найбільшу кількість — за пріоритетним тематичним напрямом 4.4 — 36,5 %, що зумовлено його високою актуальністю в період енергетичної трансформації (рис. 2).

Переважну кількість НТР (97 од. або 64,2 %) виконано за напрямом бюджетного базового фінансування “Прикладні ДіР”, водночас найбільшу кількість (36,1 %) — за пріоритетним тематичним напрямом 4.4.

Окрім того, за напрямками бюджетного програмно-цільового фінансування виконано 54 НТР (35,8 %), зокрема:

- “Проекти грантового фінансування НФДУ” — 36 НТР (23,8 %) за трьома пріоритетними тематичними напрямками, з яких найбільшу

Таблиця 1

Видатки загального фонду на ДіР за пріоритетними тематичними напрямками пріоритетного напрямку № 4 у розрізі напрямів бюджетного фінансування у 2024 році

Пріоритетний тематичний напрям	Видатки на ДіР	
	млн грн	%
4.1. Системи генерації і транспортування електричної та теплової енергії	69,57	32,6
4.2. Паливні бази, системи транспортування та використання	25,85	12,1
4.3. Технології розроблення та використання нових видів палива, відновлюваних і альтернативних джерел енергії та видів палива	44,35	20,8
4.4. Енергоефективність і енергозбереження, ринки енергоресурсів	58,55	27,5
4.5. Енергоменеджмент, інформаційно-аналітичне та нормативно-методичне забезпечення енергетичної галузі	14,83	7,0
Усього	213,15	100,0

Таблиця 2

Видатки загального фонду на ДіР за пріоритетними тематичними напрямками пріоритетного напрямку № 4 у розрізі напрямів бюджетного фінансування у 2024 році

Пріоритетний тематичний напрям*	Проекти Національного фонду досліджень України (НФДУ)		Прикладні ДіР		Розробки за державним замовленням		Проекти в межах міжнародного науково-технічного співробітництва	
	млн грн	%	млн грн	%	млн грн	%	млн грн	%
4.1	21,32	30,6	46,92	67,4	1,33	2,0		
4.2	18,17	70,3	6,97	27,0	0,71	2,7		
4.3			44,35	100,0				
4.4	8,23	14,0	45,29	77,4	2,33	4,0	2,69	4,6
4.5			14,83	100,0				
Усього	47,72	22,4	158,36	74,3	4,38	2,0	2,69	1,3

Примітка: * нумерація пріоритетних тематичних напрямів відповідає даним табл. 1.

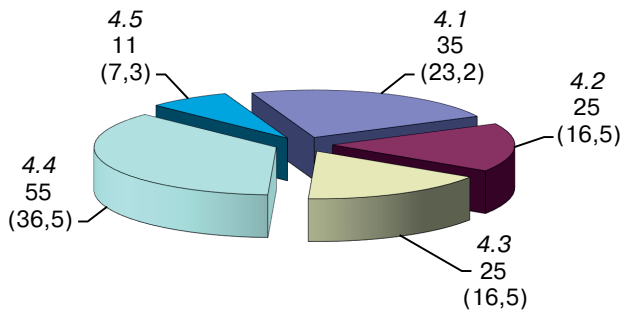


Рис. 2. Розподіл кількості НТР пріоритетного напрямку № 4 за пріоритетними тематичними напрямками, од. (%)

Примітка: * нумерація пріоритетних тематичних напрямів відповідає даним табл. 1.

кількість (58,3 %) — за пріоритетним тематичним напрямом 4.2;

- “Розробки за державним замовленням” — 4 НТР (2,7 %) за трьома пріоритетними тематичними напрямками, з яких найбільшу кількість (50,0 %) — за пріоритетним тематичним напрямом 4.4;
- “Проекти у межах міжнародного науково-технічного співробітництва” — 14 НТР (9,3 %) за одним пріоритетним тематичним напрямом 4.4 (**табл. 3**).

За результатами ДіР у 2024 р. створено 413 од. науково-технічної продукції (НТП) (3,2 % загальної кількості НТП за пріоритетними напрямками), з яких найбільшу кількість зафіксо-

вано за такими пріоритетними тематичними напрямками:

- 4.1 — 162 од. (39,2 % загальної кількості НТП пріоритетного напрямку № 4), зокрема за видами: “Пристрої” — 50,0 % загальної кількості цього виду НТП за пріоритетним напрямом, “Технології” — 39,1 %, “Методи, теорії, гіпотези” — 22,9 %, “Методичні документи” — 34,8 %, “Програмні продукти, програмно-технологічна документація” — 73,3 %, “Аналітичні матеріали” — 54,7 %;
- 4.4 — 114 од. НТП (27,6 %), зокрема за видами: “Пристрої” — 32,4 %, “Матеріали” — 13,3 %, “Методи, теорії, гіпотези” — 58,6 %, “Методичні документи” — 21,7 %, “Програмні продукти, програмно-технологічна документація” — 13,3 %, “Аналітичні матеріали” — 10,9 %;
- 4.3 — 78 од. НТП (18,9 %), зокрема за видами: “Пристрої” — 5,9 %, “Технології” — 17,4 %, “Матеріали” — 66,7 %, “Методичні документи” — 8,7 %, “Аналітичні матеріали” — 26,6 % (**табл. 4**).

У цьому контексті обсяг видатків *спеціального фонду*¹ на виконання ДіР, тематика яких відповідає стратегічним пріоритетним напрямам інноваційної діяльності (далі — стратегічні пріоритетні напрями) та середньостроковим пріоритетним напрямам інноваційної діяльності загальнодержавного рівня (далі — середньострокові пріоритетні напрями), становив у 2024 р. 875,07 млн грн. Із цієї суми 130,55 млн грн

Таблиця 3

Кількість НТР за пріоритетними тематичними напрямками пріоритетного напрямку № 4 у розрізі напрямів бюджетного фінансування в 2024 році

Пріоритетний тематичний напрям*	Проекти Національного фонду досліджень України (НФДУ)		Прикладні ДіР		Розробки за державним замовленням		Проекти в межах міжнародного науково-технічного співробітництва	
	млн грн	%	млн грн	%	млн грн	%	млн грн	%
4.1	11	31,4	23	65,7	1	2,9		
4.2	21	84,0	3	12,0	1	4,0		
4.3			25	100,0				
4.4	4	7,3	35	63,6	2	3,6	14	25,5
4.5			11	100,0				
Усього	36	23,8	97	64,2	4	2,7	14	9,3

Примітка: * нумерація пріоритетних тематичних напрямів відповідає даним табл. 1.

¹ Обсяг видатків спеціального фонду — виключно кошти, отримані організаціями головних розпорядників за договорами/контрактами від іноземних та українських замовників (госпдоговори) на виконання ДіР.

(14,9 % загального обсягу фінансування ДіР за вісьмома стратегічними пріоритетними напрямками) було спрямовано на виконання наукових досліджень за стратегічним пріоритетним напрямом **“Освоєння нових технологій транспортування енергії, впровадження енергоефективних, ресурсозберігаючих технологій, освоєння альтернативних джерел енергії”** (далі — стратегічний пріоритетний напрям № 2).

Із трьох головних розпорядників, організації яких спрямовували кошти спеціального фонду

на проведення ДіР, тематика яких відповідає стратегічним та середньостроковим пріоритетним напрямом, 72,1 % обсягу видатків припадає на НАН України, 27,3 % — на МОН України та 0,6 % — на Мінагрополітики України.

Найбільш профінансованим (понад 50 % загального обсягу фінансування стратегічного пріоритетного напрямку № 2) виявився середньостроковий пріоритетний напрям 2.4, а найменш профінансованим (1,0 %) — середньостроковий пріоритетний напрям 2.2 (табл. 5).

Таблиця 4

Результати ДіР за пріоритетним напрямом “Енергетика та енергоефективність” у розрізі пріоритетних тематичних напрямів

Пріоритетний тематичний напрям*	Створено у звітному році НТП, усього, од	зокрема за видами НТП, од.											
		пристрої	технології	матеріали	сорти рослин	породи тварин	методи, теорії, гіпотези	проекти нормативно-правових документів	проекти нормативних документів	методичні документи	програмні продукти, програмно-технологічна документація	аналітичні матеріали	інше
4.1	162	17	9				16		1	8	11	35	65
4.2	42	4	9	3			6			6	2		12
4.3	78	2	4	10			4			2		17	39
4.4	114	11	1	2			41		1	5	2	7	44
4.5	17						3			2		5	7
Разом за пріоритетом	413	34	23	15			70		2	23	15	64	167

Примітка: * нумерація пріоритетних тематичних напрямів відповідає даним табл. 1.

Таблиця 5

Обсяг видатків спеціального фонду на ДіР за середньостроковими пріоритетними напрямками стратегічного пріоритетного напрямку № 2 у 2024 році

Середньостроковий пріоритетний напрям	Видатки на ДіР	
	млн грн	%
2.1. Системи генерації і транспортування електричної та теплової енергії	18,52	14,2
2.2. Паливні бази, системи транспортування та використання	1,25	1,0
2.3. Технології розроблення та використання нових видів палива, відновлюваних і альтернативних джерел енергії та видів палива	11,43	8,8
2.4. Енергоефективність і енергозбереження, ринки енергоресурсів	65,59	50,2
2.5. Екологічно збалансована енергетична безпека	33,76	25,8
Усього	130,55	100,0

Таблиця 6

Результати ДіР за стратегічним пріоритетним напрямом № 2 у розрізі середньострокових пріоритетних напрямів

Середньостроковий пріоритетний напрям*	Виконано у звітному році НТР, усього, од.	Створено у звітному році НТП, усього, од.	зокрема за видами НТП, од.									
			пристрої	технології	матеріали	методи, теорії, гіпотези	проекти нормативно-правових документів	проекти нормативних документів	методичні документи	програмні продукти, програмно-технологічна документація	аналітичні матеріали	інше
2.1	15	22										
2.2	15	18	1	1	6	1			8			1
2.3	29	45	4	15		2			1	6	2	15
2.4	192	216	15	5	2	33		3	34	15	74	35
2.5	141	135	3	1		17		1	5		12	96
Разом	392	436	25	22	13	57		4	50	21	92	152

Примітка: * 2.1. Системи генерації і транспортування електричної та теплової енергії.
 2.2. Паливні бази, системи транспортування та використання.
 2.3. Технології розроблення та використання нових видів палива, відновлюваних і альтернативних джерел енергії та видів палива.
 2.4. Енергоефективність і енергозбереження, ринки енергоресурсів.
 2.5. Екологічно збалансована енергетична безпека.

За видами ДіР найбільшу частку видатків (87,0 %) спрямовано на “Прикладні наукові дослідження”, з яких на ДіР організацій НАН України — 70,0 %, найменшу частку — на “Науково-технічні (експериментальні) розробки” (2,3 %), з яких найбільша частка (55,2 %) належить МОН України.

Загалом виконано 392 НТР (11,4 % загальної кількості НТР за стратегічними пріоритетними напрямками), створено 436 од. НТП (13,4 % загальної кількості НТП за стратегічними пріоритетними напрямками). Близько 50 % од. НТП створено за найбільш профінансованим середньостроковим пріоритетним напрямом 2.4, зокрема за такими видами НТП: “Пристрої” — 60,0 % загальної кількості НТП цього виду, “Методи, теорії, гіпотези” — близько 58,0 %, “Методичні документи” – 68,0 %, “Програмні продукти, програмно-технологічна документація” — 71,4 %, “Аналітичні матеріали” — 80,4 % (табл. 6).

ВИСНОВКИ

Попри стабільну публікаційну активність та інтеграцію українських учених у міжнародні нау-

кові мережі, частка державного фінансування ДіР за пріоритетним напрямом “Енергетика та енергоефективність” залишається недостатньою та становить менше 3 % загального обсягу видатків на проведення досліджень за всіма науковими пріоритетними напрямками. Це обмежує реалізацію наукового потенціалу галузі.

Відносно низькі обсяги фінансування спрямовано на напрям 4.5, що відповідає за стандартизацію та енергоменеджмент. Водночас результативними є напрями 4.1 та 4.4, які формують основу технологічного оновлення галузі. НАН України та МОН України забезпечили переважну частку виконаних НТР і створеної НТП. Загалом розвиток пріоритетного напрямку залишається нестабільним, а його потенціал щодо модернізації енергетичного комплексу України реалізується неповною мірою через недостатній рівень фінансового забезпечення.

Частка фінансування ДіР за кошти спеціального фонду в межах стратегічного пріоритетного напрямку 2 “Освоєння нових технологій транспортування енергії, впровадження енергоефективних, ресурсозберігаючих технологій, освоєння альтернативних джерел енергії”

становила у 2024 р. 14,9 % загального обсягу видатків на проведення досліджень за всіма інноваційними пріоритетними напрямками. Найбільші обсяги видатків спеціального фонду та кількість отриманих результатів у 2024 р. зафіксовано за середньостроковим пріоритетним напрямом 2.4 “Енергоефективність і енергозбереження, ринки енергоресурсів”. За цим стратегічним пріоритетним напрямом частка видатків становила 50,2 % загального обсягу фінансування ДіР; частка створеної НТП — 49,5 % загальної кількості НТП за стратегічним пріоритетним напрямом.

Подальше зміцнення позицій українських дослідників у сфері енергетики та енергоефективності потребує розширення внутрішньої фінансової підтримки, розвитку інституційної інфраструктури та посилення стратегічної координації наукових досліджень відповідно до цілей енергетичної безпеки та післявоєнної модернізації енергетичного комплексу України.

Результати аналізу та сучасні наукові дослідження свідчать, що підвищення енергоефективності можливе лише за умови поєднання технічних, соціальних та економічних підходів в узгоджені стратегії енергозбереження. З огляду на воєнні виклики та необхідність відновлення енергетичної інфраструктури України, посилення підтримки наукових досліджень у сфері енергетики набуває стратегічного значення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sovacool B. K. Energy transitions from the cradle to the grave: A meta-theoretical framework [Electronic resource] / B. K. Sovacool, D. J. Hess, R. Cantoni // *Energy Research & Social Science*. — 2021. — No. 75 (May, 2021), 102027. — P. 1–16. — Access mode: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3813194.
2. Della Valle N. Promoting Energy Efficiency: Barriers, Societal Needs and Complementary Social Science Resources / N. Della Valle, P. Bertoldi // *Frontiers in Energy Research*. — 2021. — Vol. 9. — Art. 804091. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.804091>.
3. Energy-saving technologies and energy efficiency in the post-pandemic world [Electronic resource] / W. Strielkowski, L. Gorina, E. Korneeva, O. Kovalova // *arXiv preprint*. — 2023. — Access mode: <https://arxiv.org/abs/2312.11711>.
4. Building Energy Efficiency through Advanced Regression Models and Metaheuristic Techniques [Electronic resource] / H. Khosravi, H. Sahebi, R. Khanizad, I. Ahmed // *arXiv preprint*, 2023. — Access mode: <https://arxiv.org/abs/2305.08886>.
5. Energy, material, and resource efficiency for industrial decarbonization: A systematic review of socio-technical systems, technological innovations, and policy options / J. Kim, B. Sovacool, M. Bazilian, S. Griffiths, M. Yang // *Energy Research & Social Science*. — 2024. — Vol. 112. — 103521. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103521>.
6. Energy Efficiency: The Decade for Action : Ministerial briefing for the IEA's 8th Annual Global

- Conference on Energy Efficiency [Electronic resource]. — Paris : International Energy Agency, 2023. — Access mode: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-the-decade-for-action>.
7. Web of Science [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/smart-search>.
 8. Martyniuk V. Dynamic solar panel array reconfiguration system / V. Martyniuk, K. Klen, V. Zhuikov // 2024 IEEE 7th International Conference on Smart Technologies in Power Engineering and Electronics (STEE) (Kyiv, Ukraine, 24–26 Sept. 2024). — New York : IEEE, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/STEE63556.2024.10748158>.
 9. Determining the Optimal Directions of Investment in Regional Renewable Energy Development / I. Sotnyk, T. Kurbatova, Y. Romaniuk, O. Prokopenko et al. // *Energies*. — 2022. — Vol. 15. — No. 10. — Art. 3646. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15103646>.
 10. Energy Security Assessment of Emerging Economies under Global and Local Challenges / I. Sotnyk, T. Kurbatova, O. Kubatko, O. Prokopenko et al. // *Energies*. — 2021. — Vol. 14, No. 18. — Art. 5860. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14185860>.
 11. Shaping cost-optimal and environmentally friendly strategies for household heating systems: case of Ukraine / I. Sotnyk, M. Sotnyk, T. Kurbatova, O. Prokopenko et al. // *Polityka Energetyczna — Energy Policy Journal*. — 2024. — Vol. 27. — No. 3. — P. 161–192. DOI: <https://doi.org/10.33223/epj/191811>.
 12. Belik M. Implementation of digital twin for increasing efficiency of renewable energy sources / M. Belik, O. Rubanenko // *Energies*. — 2023. — Vol. 16. — No. 12. — Art. 4787. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16124787>.
 13. Національний план з енергетики та клімату на період до 2030 року [Електронний ресурс]: схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 25 черв. 2024 р. № 587-р. — Режим доступу: <https://me.gov.ua/view/bb0b9ef5-ea96-4b8a-8f2f-471faf32c9df>.
 14. Реалізація пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки та отримані результати у 2024 р. [Електронний ресурс]: аналітична довідка / Т. В. Писаренко, Т. К. Куранда, Т. В. Гаврис та ін. — Київ : УкрІНТЕІ, 2025. — 69 с. — Режим доступу: <https://mon.gov.ua/static-objects/mon/sites/1/nauka/informatsiyno-analitychni/2025/14-07-2025/analit-dov-realiz-priorytetnykh-napr-rozv-nauky-i-tekhnta-otrym-rezult-u-2024-14-07-2025.pdf>.
 15. Реалізація середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності загальнодержавного рівня у 2024 р. [Електронний ресурс]: аналітична довідка / Т. В. Писаренко, Т. К. Куранда, Н. Ю. Швед та ін. — Київ : УкрІНТЕІ, 2025. — 63 с. — Режим доступу: <https://mon.gov.ua/static-objects/mon/sites/1/nauka/2025/07/28/analit-dovidka-realiz-serednostrok-priorytet-napr-innovats-diyal-zahalnoderzh-rezultaty-2024-08-07-2025.pdf>.

REFERENCES

1. Sovacool, B. K., Hess, D. J., & Cantoni, R. (2021). Energy transitions from the cradle to the grave: A meta-theoretical framework. *Energy Research & Social Science*, 75, 102027, 1-16. Retrieved from: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3813194.
2. Della Valle, N., & Bertoldi, P. (2021). Promoting Energy Efficiency: Barriers, Societal Needs and Complementary Social Science Resources. *Frontiers*

- in *Energy Research*, 9, Art. 804091. Retrieved from: <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2021.804091/full>.
3. Strielkowski, W., Gorina, L., Korneeva, E., & Kovalova, O. (2023). Energy saving technologies and energy efficiency in the post-pandemic world. arXiv preprint. Retrieved from: <https://arxiv.org/abs/2312.11711>.
 4. Khosravi, H., Sahebi, H., Khanizad, R., & Ahmed, I. (2023). Building Energy Efficiency through Advanced Regression Models and Metaheuristic Techniques. arXiv preprint. Retrieved from: <https://arxiv.org/abs/2305.08886>.
 5. Kim, J., Sovacool, B., Bazilian, M., Griffiths, S., & Yang, M. (2024). Energy, material, and resource efficiency for industrial decarbonization: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options. *Energy Research & Social Science*, 112, 103521. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103521>.
 6. (2023). Energy Efficiency: The Decade for Action: Ministerial briefing for the IEA's 8th Annual Global Conference on Energy Efficiency. Paris. Retrieved from: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-the-decade-for-action>.
 7. Web of Science. Retrieved from: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/smart-search>.
 8. Martyniuk, V., Klen, K., & Zhuikov, V. (2024). Dynamic solar panel array reconfiguration system. *2024 IEEE 7th International Conference on Smart Technologies in Power Engineering and Electronics (STEE)* (Kyiv, Ukraine, 24–26 Sept. 2024). New York. DOI: <https://doi.org/10.1109/STEE63556.2024.10748158>.
 9. Sotnyk, I., Kurbatova, T., Romaniuk, Y., Prokopenko, O., Gonchar, V., & Sayenko, Y. et al. (2022). Determining the Optimal Directions of Investment in Regional Renewable Energy Development. *Energies*, 15 (10), 3646. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15103646>.
 10. Sotnyk, I., Kurbatova, T., Kubatko, O., Prokopenko, O., Prause, G., & Kovalenko, Y., et al. (2021). Energy Security Assessment of Emerging Economies under Global and Local Challenges. *Energies*, 14 (18), 5860. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14185860>.
 11. Sotnyk, I., Sotnyk, M., Kurbatova, T., Prokopenko, O., & Telizhenko, O. (2024). Shaping cost-optimal and environmentally friendly strategies for household heating systems: case of Ukraine. *Polityka Energetyczna [Energy Policy Journal]*, 27 (3), 161–192. DOI: <https://doi.org/10.33223/epj/191811>. [in Ukr.].
 12. Belik, M., & Rubanenko, O. (2023). Implementation of digital twin for increasing efficiency of renewable energy sources. *Energies*, 16 (12), 4787. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16124787>.
 13. Natsionalnyi plan z enerhetyky ta klimatu na period do 2030 roku [National Energy and Climate Plan of Ukraine until 2030]. *Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of June 25, 2024 No. 587-r*. Retrieved from: <https://me.gov.ua/view/bb0b9ef5-ea96-4b8a-8f2f-471faf32c9df> [in Ukr.].
 14. Pysarenko, T. V., Kuranda, T. K., Havrys, T. V., & Osadcha, A. B. (2025). Realizatsiia prioritetnykh napriamiv rozvytku nauky i tekhniky ta otrymani rezultaty u 2024 r. [Implementation of Priority Areas of Science and Technology Development and the Results Achieved in 2024]. Kyiv. 69 p. Retrieved from: <https://mon.gov.ua/static-objects/mon/sites/1/nauka/informatsiyno-analitychni/2025/14-07-2025/analit-dov-realiz-prioritetnykh-napr-rozv-nauky-i-tekhnik-ta-otrym-rezult-u-2024-14-07-2025.pdf> [in Ukr.].
 15. Pysarenko, T. V., Kuranda, T. K., Shved, N. I., Havrys, T. V., & Osadcha, A. B. (2025). Realizatsiia serednostrokovykh prioritetnykh napriamiv innovatsiinoi diialnosti zahalnodержavnogo rivnia u 2024 r. [Implementation of Mid-Term Priority Areas of Innovation Activity at the National Level in 2024]. Kyiv, 65 p. Retrieved from: <https://mon.gov.ua/static-objects/mon/sites/1/nauka/2025/07/28/analit-dovidka-realiz-serednostrok-prioritet-napr-innovats-diial-zahalnodерж-rezultaty-2024-08-07-2025.pdf> [in Ukr.].

A. B. OSADCHA, Senior Researcher

ANALYSIS OF THE IMPLEMENTATION STATUS OF PRIORITY AREAS OF SCIENTIFIC AND INNOVATION ACTIVITY IN THE ENERGY SECTOR

Abstract. *The energy sector plays a critical role in ensuring the economic security and sustainable development of the state. In the context of integration into the European energy space, infrastructure modernization, and increasing energy efficiency, the role of research and development (R&D) in the energy sector is becoming increasingly important.*

The article presents the results of the author's study of the implementation of priority areas of scientific and innovation activity in the energy sector approved by the Resolutions of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated April 30, 2024 No. 476 and December 28, 2016 No. 1056 (as amended) for the period until December 31 of the year following the termination or cancellation of martial law in Ukraine.

A comprehensive analysis was carried out of the state of funding and performance of R&D within the priority area of science and technology development "Energy and Energy Efficiency" was carried out in the context of priority thematic areas of scientific research and scientific-technical developments, as well as within the strategic priority area "Development of new energy transportation technologies, implementation of energy-efficient and resource-saving technologies, and development of alternative energy sources" in the context of medium-term priority areas at the national level.

In addition, a bibliometric analysis of publications on energy and energy efficiency indexed in the international scientometric database Web of Science was conducted, which confirmed the stable international presence of Ukrainian researchers despite the impact of martial law. The study revealed a concentration of scientific activity in leading research and educational centers and the dominance of interdisciplinary studies focused on the development of renewable energy sources, digitalization, improved energy efficiency, and decarbonization of the energy sector.

Based on the results of the analysis, key trends in the development of the energy and energy efficiency sector were identified.

Keywords: energy, energy efficiency, priority thematic areas, medium-term priority areas, research (scientific and technical) works, scientific (scientific and technical) output.

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРА

Осадча Анастасія Борисівна — с. н. с., ДНУ “Український інститут науково-технічної експертизи та інформації”, вул. Антоновича, 180, м. Київ, Україна, 03150; +38 (044) 521-00-29; osadcha@ukrintei.ua; ORCID: 0000-0001-5151-2901

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Osadcha A. B. — Senior Researcher of State Scientific Institution “Ukrainian Institute of Scientific and Technical Expertise and Information”, 180, Antonovycha Str., Kyiv, Ukraine, 03150; +38 (044) 521-00-29; osadcha@ukrintei.ua; ORCID: 0000-0001-5151-2901

Надійшла до редакції 04.03.2026

Прийнята до друку 13.03.2026



<https://doi.org/10.35668/2520-6524-2026-1-03>

UDC 330.341.1:004(479.24)

SALIMLI HUSEYN ERKEN oqlu, Postgraduate Student

DIGITALIZATION AND ECONOMIC PERFORMANCE IN AZERBAIJAN'S NEW ECONOMY

Abstract. *The article examines how digitalization affects economic performance in Azerbaijan within the framework of the new generation economy. Although digital transformation is increasingly treated as a decisive source of productivity growth, competitiveness, and structural modernization, its mechanisms remain insufficiently quantified in developing economies. The objective of the study is to identify and empirically measure the channels through which digitalization influences firm-level economic outcomes in Azerbaijan. The empirical base combines a structured survey of 450 enterprises, including 200 firms from the general sample and 250 small and medium-sized enterprises, with a composite indicator system labelled AZ-NGE-DI. The study applies structural equation modelling in two stages: first, the measurement model is validated for latent constructs describing digital infrastructure, human capital, policy and regulation, the level of digitalization, and economic outcomes; second, the structural model is estimated using maximum likelihood procedures in AMOS v.24. The results show that the level of digitalization has a strong positive and statistically significant effect on economic outcomes ($\gamma \approx 0,50$; $p < 0,001$). Digital infrastructure ($\beta \approx 0,30$) and human capital ($\beta \approx 0,25$) are identified as the strongest determinants of digitalization, while the direct effects of infrastructure, skills and policy variables on final economic outcomes are weak and statistically insignificant. This confirms the mediating role of digital transformation: infrastructure and competencies improve firm performance primarily through a higher level of digital adoption. The AZ-NGE-DI assessment additionally shows that Azerbaijan has reached a medium level of digital development, with relatively stronger readiness indicators than maturity and results indicators. The study contributes to the literature by providing one of the first SEM-based empirical assessments of the economic effects of digitalization in Azerbaijan. Its practical value lies in the policy implications: the findings support prioritizing broadband and platform infrastructure, advanced digital skills, SME support mechanisms, and a more coherent innovation ecosystem in order to narrow the gap between digital readiness and measurable economic returns.*

Keywords: new generation economy, digitalization, structural equation modelling, economic performance, Azerbaijan, SEM.

INTRODUCTION

In the twenty-first century, the rapid diffusion of digital technologies has become one of the central forces transforming economic systems. According to widely cited international assessments, the digital economy already accounts for a substantial share of global output and continues to expand as data, platforms, cloud services and digital public infrastructure reshape production, exchange and governance [14; 16]. In this environment, digitalization should be interpreted not only as a technological trend, but also as an economic mechanism that affects productivity, cost structures, innovation and long-term competitiveness.

Azerbaijan has also intensified its participation in global digital transformation processes. The expansion of e-government services, digital public platforms and communication infrastructure has improved the country's institutional and technical readiness. The United Nations E-Government Survey 2024 places Azerbaijan in the very high EGD I group, which indicates meaningful progress in digital public administration and infrastructure development [13]. At the same time, the existence of a gap between digital capacity and realized economic outcomes suggests that infrastructure alone is not enough. Human capital shortages, uneven sectoral adoption and institutional bottlenecks continue to limit the full return from digital investment.

Against this background, the economic effects of digitalization in Azerbaijan require a more rigorous empirical assessment. This is particularly important for an economy seeking to strengthen non-oil growth drivers, improve business productivity and accelerate innovation-based diversification.

STATEMENT OF THE PROBLEM AND RESEARCH OBJECTIVE

The central research problem addressed in this article is the insufficient quantitative understanding of how digitalization affects economic outcomes in developing economies and, more specifically, in Azerbaijan. Existing international studies demonstrate that digital technologies can increase productivity and business performance, but the transmission channels are often context-specific and depend on infrastructure quality, organizational change, skills and the policy environment [5; 10].

The research objective is therefore to identify and empirically estimate the mechanisms through which digitalization influences economic performance in Azerbaijan by applying structural equation modelling and by complementing the econometric results with the AZ-NGE-DI composite index. The study tests whether digital infrastructure, human capital and policy-regulatory conditions

influence economic outcomes mainly directly or primarily through their impact on the overall level of digitalization.

The scientific novelty of the article lies in the fact that it offers one of the first SEM-based empirical measurements of the economic effects of digitalization in Azerbaijan using survey evidence from 450 enterprises. This makes it possible to move beyond descriptive discussion and to assess, in a structured way, the mediating role of digital transformation in business performance.

ANALYSIS OF USED PUBLICATIONS

The relationship between digitalization and economic growth has long attracted the attention of economists. Early debates were strongly influenced by the so-called productivity paradox, according to which large investments in information technology were not immediately visible in aggregate productivity indicators [12]. Subsequent empirical work, however, demonstrated that once measurement improved and organizational adaptation was taken into account, information technology investment was associated with substantial gains in productivity and firm performance [4; 5].

Comparative international studies also confirm that the contribution of information and communication technologies to economic growth is not limited to advanced economies. Niebel shows that ICT investment contributes positively to growth in developed, emerging and developing countries, although the scale of the effect may differ because of institutional and structural factors [10]. Research on African economies likewise indicates that greater ICT penetration is associated with higher income levels and broader development gains [7].

At the firm level, the economic effect of digitalization is usually transmitted through several channels. First, automation and process optimization allow firms to produce more output with the same or fewer resources. Second, digital tools accelerate innovation, facilitate new business models and reduce transaction costs. Third, digital adoption can strengthen market intelligence and customer interaction. Recent panel evidence also suggests that digitalization positively affects entrepreneurial activity and sustainable competitiveness [6]. OECD-based analyses further indicate that firms adopting digital tools earlier tend to achieve higher productivity over time, but these gains usually depend on complementary investments in skills, management practices and organizational redesign [8; 11].

In the context of Azerbaijan, recent studies have addressed the digital economy, digital transformation and e-government development from

theoretical, policy and sectoral perspectives [1–3; 9]. These contributions are important because they document the country's progress and identify institutional priorities. However, they rely mainly on descriptive statistics and conceptual interpretation. A comprehensive empirical model that tests the latent relationships between digitalization drivers and economic outcomes has remained underdeveloped. This article seeks to fill that gap.

PRESENTATION OF THE MAIN MATERIAL

The methodological design of the study consists of three integrated stages: development of the conceptual framework, collection of primary survey data, and estimation of a structural equation model. This approach makes it possible to connect theoretical constructs with observable indicators and to test both direct and indirect effects within one analytical system.

Conceptual model

The conceptual model reflects the main determinants of digital transformation identified in the literature and adapts them to the Azerbaijani context. Three latent exogenous constructs are specified: digital infrastructure, human capital and digital skills, and state digital policy with the regulatory environment. These constructs are assumed to influence the central mediating construct, namely the level of digitalization. The final endogenous construct is economic outcomes, which captures productivity, profitability, innovation and competitiveness.

The key hypothesis is that digital infrastructure, human capital and policy factors improve economic outcomes primarily indirectly through the level of digitalization. The model also allows the direct effects of these factors on economic outcomes to be tested, which makes it possible to identify whether the transmission mechanism is mainly mediated or mixed.

Data collection and survey design

Primary data were collected through a specially designed questionnaire aimed at measuring the state of digital transformation and its perceived results across Azerbaijani enterprises. Data collection took place in the first half of 2024 using two channels: an online questionnaire distributed by e-mail and structured telephone interviews.

A purposive sampling strategy was used in order to cover the major sectors of the economy, including manufacturing, services, trade and finance. In total, 200 valid responses were collected from the general enterprise sample. In addition, a separate survey of 250 small and medium-sized enterprises was conducted. The full sample therefore consists of 450 observations. Approximately 25 % of respondents represented large

enterprises, 50 % medium-sized enterprises and 25 % small enterprises. Around 70 % of the surveyed firms were located in the Baku-Absheron economic region and 30 % in other regions of the country.

To test the internal consistency of the measurement instrument, Cronbach's alpha and composite reliability statistics were used. For all latent variables, composite reliability exceeded 0,70 and Cronbach's alpha was approximately 0,80, confirming satisfactory internal consistency of the questionnaire.

Application of the SEM model

Based on the collected data, a structural equation model was estimated in two stages. At the first stage, the measurement model was assessed in order to test the relationship between latent constructs and their indicators. At the second stage, the structural model was estimated to test the hypothesized links among the constructs. The SEM analysis was performed in AMOS v.24 using the maximum likelihood method.

Five latent variables were included in the model: digital infrastructure, human capital, policy/regulation, level of digitalization and economic outcomes. The indicators for each construct were derived from the survey instrument. This setup made it possible to jointly estimate the adequacy of the measurement system and the structural effects among constructs.

Measurement model results

The measurement model demonstrated acceptable statistical quality. Most factor loadings exceeded 0,60, while CFI and TLI were above 0,90 and RMSEA was below 0,08. These indicators confirm that the measurement model is both reliable and adequately fitted. Convergent validity was supported by average variance extracted values above 0,50 for each construct, and discriminant validity was checked using the Fornell-Larcker criterion.

Table 1 presents the main indicators of the measurement model. The strongest loadings were observed for the digitalization level construct, which suggests that the selected indicators capture digital adoption in a relatively coherent way.

Structural model results

The structural model results indicate that digital infrastructure has the strongest effect on the level of digitalization ($\beta = 0,30$; $p < 0,001$). This means that high-speed internet access, stable networks, digital tools and technical support significantly raise the probability and intensity of digital transformation at the firm level. Human capital also has a positive and statistically significant effect on digitalization ($\beta = 0,25$; $p = 0,005$), confirming the importance of employee skills, training intensity and training quality.

The effect of policy and regulation on digitalization is smaller but still statistically significant ($\beta = 0,18$; $p = 0,010$). The most important relationship in the model is the effect of digitalization on economic outcomes ($\gamma = 0,50$; $p < 0,001$). This confirms the core hypothesis of the study: as the level of digital transformation increases, enterprise performance improves in a statistically meaningful way. By contrast, the direct effects of infrastructure, human capital and policy variables on final economic outcomes are weak

and statistically insignificant. The results therefore support a mediated effect structure.

The explanatory power of the model is also relatively high for social science research. The coefficient of determination is approximately 0,55 for the level of digitalization and 0,65 for economic outcomes, which indicates good predictive capacity of the proposed model (**Table 2**).

AZ-NGE-DI index and benchmarking

In the second part of the empirical analysis, the country’s digital development was assessed

Table 1

Indicators of the measurement model

Latent variable	Indicators	Factor loadings	AVE (>0,5)	Composite reliability (CR > 0,7)
Digital infrastructure	Internet speed, digital tools, network stability, technical support	0,72–0,84	0,58	0,81
Human capital	IT knowledge level, number of trainings, training quality	0,69–0,81	0,61	0,84
Policy and regulation	Support level, legal compliance, regulatory stability	0,66–0,78	0,56	0,80
Level of digitalization	Digitalization index, share of digital processes, online operations	0,74–0,88	0,63	0,86
Economic outcomes	Productivity, profitability, number of innovations, competitiveness	0,70–0,85	0,60	0,83

Source: compiled by the author based on AMOS v.24 outputs and survey data, 2024.

Table 2

Coefficients and significance of the structural equation model

Path	Standardized coefficient	Standard error	t-value	p-value	Result
Digital infrastructure -> Digitalization	0,30	0,08	3,75	0,000	Significant
Human capital -> Digitalization	0,25	0,09	2,78	0,005	Significant
Policy environment -> Digitalization	0,18	0,07	2,57	0,010	Significant
Digitalization -> Economic outcomes	0,50	0,11	4,55	0,000	Significant
Digital infrastructure -> Economic outcomes	0,10	0,09	1,11	0,267	Not significant
Human capital -> Economic outcomes	0,08	0,10	0,80	0,424	Not significant
Policy environment -> Economic outcomes	0,05	0,08	0,63	0,529	Not significant

Source: compiled by the author based on AMOS v.24 outputs and survey data, 2024.

Table 3

Assessment of the main AZ-NGE-DI blocks in 2024

Block	Number of indicators	Average normalized score (0-1)	Strongest indicator	Weakest indicator
Readiness	12	0,61	Internet use (0,89)	Advanced digital skills (0,40)
Maturity	10	0,52	Cloud services (0,60)	Production automation (0,35)
Result	8	0,48	Productivity growth (0,55)	High-technology exports (0,25)
Overall index (AZ-NGE-DI)	30	0,54	–	–

Source: compiled by the author based on the survey and official statistical data, 2024.

using the AZ-NGE-DI composite index. The overall index value equals 0,54, which corresponds to a medium level of digital development. At the same time, the block structure of the index reveals a clear imbalance. The readiness block scores 0,61, the maturity block 0,52 and the results block 0,48. This pattern suggests that the first stage of digital development – readiness in terms of access and basic conditions – has progressed further than the stage in which digital capabilities are converted into broad and measurable economic returns.

The strongest indicator in the readiness block is internet use, while advanced digital skills remain the weakest element. Within the maturity block, cloud service adoption performs relatively better than production automation. In the results block, productivity growth exceeds high-technology export performance. Taken together, these results imply that Azerbaijan's digital economy has developed a measurable foundation, but still lacks depth in advanced skills, industrial digitalization and innovation commercialization (**Table 3**).

Discussion

The empirical findings are broadly consistent with the international literature, but they also reveal a specific pattern characteristic of Azerbaijan. The study suggests that digitalization should not be understood as a purely technological process. Its economic effect depends on complementary assets, especially human capital. Infrastructure matters because it enables digital adoption, but infrastructure without skills and organizational adaptation does not automatically generate productivity gains.

The sectoral dimension is also important. Survey responses indicate that digitalization is stronger in finance, telecommunications and information technology, whereas sectors such as construction and transport remain less transformed. This means

that the emergence of a new generation economy is associated not only with aggregate growth, but also with a reconfiguration of the economic structure. Public digitalization initiatives, particularly in e-government, may additionally create indirect incentives for private firms to digitize internal processes and external interactions.

CONCLUSIONS

The article empirically assessed the economic effects of digitalization in Azerbaijan using structural equation modelling and the AZ-NGE-DI composite index. The results demonstrate a strong positive relationship between the level of digitalization and economic outcomes. Digital infrastructure and human capital are the main determinants of digitalization, while their direct effects on economic results are weak. This indicates that digital transformation functions as the principal transmission channel through which infrastructure, skills and policy conditions influence business performance.

The findings allow several policy conclusions to be drawn. First, investments in broadband infrastructure, stable digital platforms and regionally balanced connectivity should remain a priority. Second, digital skills development must be strengthened at the school, university and enterprise levels, with special attention to advanced skills rather than only basic access. Third, small and medium-sized enterprises require more targeted support instruments to finance and manage digital transformation. Fourth, the innovation ecosystem should better connect digital adoption with commercialization, technology upgrading and productivity growth.

The study has several limitations. It relies mainly on cross-sectional data, which prevents long-term causal analysis. Future research may therefore use panel data to identify dynamic

effects over time and to compare sectoral patterns more deeply. Even with these limitations, the article provides a grounded analytical basis for understanding how digitalization can contribute to Azerbaijan's transition toward a more productive and innovation-oriented economy.

REFERENCES

1. Abdullayev, K., Badalova, S., Mustafayev, A., Zeynalov, M., & Babayeva, A. (2024). Assessment of the current state and prospects for the development of the digital economy of the Republic of Azerbaijan. *Theoretical and Practical Research in Economic Fields*, 15 (2), 217-231.
2. Abdullayev, K., Allahyarov, R., Teymurova, G., Zeynalov, M., & Fataliyeva, G. (2023). The role of digital transformation in building a competitive economy: A case study of Azerbaijan. *Economic Affairs*, 68 (Special Issue), 705-710.
3. Babayev, E. A. (2018). Electronic government as an element of the digital economy: Experience of the Republic of Azerbaijan. *Administrative Consulting*, 8, 137-147.
4. Bloom, N., Sadun, R., & Van Reenen, J. (2012). Americans do IT better: US multinationals and the productivity miracle. *American Economic Review*, 102 (1), 167-201.
5. Brynjolfsson, E., & Hitt, L. M. (2000). Beyond computation: Information technology, organizational transformation and business performance. *Journal of Economic Perspectives*, 14 (4), 23-48.
6. Dabbous, A., Barakat, K. A., & Kraus, S. (2023). The impact of digitalization on entrepreneurial activity and sustainable competitiveness: A panel data analysis. *Technology in Society*, 73, 102224.
7. David, O. O. O., & Grobler, W. (2020). Information and communication technology penetration level as an impetus for economic growth and development in Africa. *Economic Research-Ekonomiska Istraživanja*, 33 (1), 1394-1418.
8. Dedrick, J., Gurbaxani, V., & Kraemer, K. L. (2003). Information technology and economic performance: A critical review of the empirical evidence. *ACM Computing Surveys*, 35 (1), 1-28.
9. Isayeva, X. I. (2023). Development of financial accounting methods for the digital economy in Azerbaijan. *Scientific Bulletin (Social and Technical Sciences Series)*, 1, 216-222.
10. Niebel, T. (2018). ICT and economic growth: Comparing developing, emerging and developed countries. *World Development*, 104, 197-211.
11. OECD. (2022). Promoting enterprise digitalisation in Azerbaijan. Retrieved from: <https://surl.it/kswrny>.
12. Solow, R. M. (1987, July 12). We'd better watch out. The New York, Times Book Review.
13. United Nations. (2024). E-Government Survey 2024: Accelerating digital transformation for sustainable development. United Nations, 205 p. Retrieved from: <https://surl.li/iftbtx>
14. UNCTAD. (2019). Digital Economy Report 2019: Value creation and capture. *United Nations Publications*. Retrieved from: <https://unctad.org/publication/digital-economy-report-2019>.
15. Verhoef, P. C., Broekhuizen, T., Bart, Y., Bhattacharya, A., Dong, J. Q., Fabian, N., & Haenlein, M. (2021). Digital transformation: A multidisciplinary reflection and research agenda. *Journal of Business Research*, 122 (4), 889-901. DOI: 10.1016/j.jbusres.2019.09.022.
16. World Bank. (2016). World Development Report 2016: Digital dividends. *World Bank*. Retrieved from: <https://www.worldbank.org/en/publication/wdr2016>.

Гусейн Еркен огли САЛІМЛІ, аспірант

ЕКОНОМІЧНІ ЕФЕКТИ ЦИФРОВІЗАЦІЇ В ЕКОНОМІЦІ НОВОГО ПОКОЛІННЯ АЗЕРБАЙДЖАНУ

Резюме. У статті досліджено вплив цифровізації на економічну результативність Азербайджану в контексті економіки нового покоління. Попри те, що цифрова трансформація дедалі частіше розглядається як ключове джерело зростання продуктивності, конкурентоспроможності та структурної модернізації, механізми її впливу в країнах, що розвиваються, залишаються недостатньо вимірними кількісно. Метою дослідження є виявлення та емпіричне вимірювання каналів, через які цифровізація впливає на економічні результати підприємств в Азербайджані. Емпіричну базу становлять дані структурованого опитування 450 підприємств, зокрема 200 підприємств із загальної вибірки та 250 малих і середніх підприємств, а також система композитних індикаторів AZ-NGE-DI. У статті застосовано моделювання структурними рівняннями у два етапи. Спочатку перевірено вимірну модель для латентних конструкцій, що описують цифрову інфраструктуру, людський капітал, політику, регуляторне середовище, рівень цифровізації, а також економічні результати. Потім структурну модель оцінено методом максимальної правдоподібності в AMOS v.24. Результати засвідчують, що рівень цифровізації має сильний позитивний і статистично значущий вплив на економічні результати ($\gamma \approx 0,50$; $p < 0,001$). Найсильнішими детермінантами цифровізації є цифрова інфраструктура ($\beta \approx 0,30$) та людський капітал ($\beta \approx 0,25$), тоді як прями впливи інфраструктури, навичок і політичних чинників на кінцеві економічні результати є слабкими та статистично незначущими. Це підтверджує опосередковану роль цифрової трансформації: інфраструктура та компетенції поліпшують результати підприємств насамперед через вищий рівень упровадження цифрових технологій. Додаткова оцінка AZ-NGE-DI підтверджує, що Азербайджан досяг середнього рівня цифрового розвитку, причому показники готовності перевищують показники зрілості та результативності. Наукова новизна статті полягає в проведенні одного з перших для Азербайджану емпіричних вимірювань економічних ефектів цифровізації на основі SEM, а практична цінність — у формулюванні рекомендацій щодо пріоритетності інвестицій у розвиток широкосмугової інфраструктури, цифрових навичок, підтримку малих та середніх підприємств і вдосконалення інноваційної екосистеми для скорочення розриву між цифровою готовністю та реальними економічними результатами.

Ключові слова: економіка нового покоління, цифровізація, моделювання структурними рівняннями, економічна результативність, Азербайджан, SEM.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Salimli Huseyn Erken oqlu — Postgraduate Student, Azerbaijan Technical University, 25, H. Javid Ave., Baku, Azerbaijan, AZ 1073; +994 (050) 459-65-05; doqru@yandex.ru; ORCID: 0009-0001-1132-8461

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРА

Салімлі Гусейн Еркен огли — аспірант, Азербайджанський технічний університет, просп. Г. Джавіда, 25, м. Баку, Азербайджан, AZ 1073; +994 (050) 459-65-05; doqru@yandex.ru; ORCID: 0009-0001-1132-8461

Надійшла до редакції 02.03.2026

Прийнята до друку 12.03.2026



**ШАНОВНІ ПРЕДСТАВНИКИ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ТА НАУКОВИХ УСТАНОВ, НАУКОВЦІ, ВИНАХІДНИКИ!**

В УкрІНТЕІ впроваджено послугу “Комплексне інформаційне обслуговування”. Це актуальна і систематизована інформація з питань трансферу технологій, науково-технічного та інноваційного розвитку, що надсилається в онлайн-режимі і призначена для здійснення наукової та інноваційної діяльності. Видання надсилаються протягом року згідно з вказаною на сайті Інституту періодичністю. До вашої уваги інформаційний пакет “Комплексний” (8 видань):

- фаховий журнал “Наука, технології, інновації”;
- інформаційний бюлетень “Дослідження, технології та інновації у Європейському Союзі”;
- дайджест новин “Наука, технології, інновації”;
- дайджест трансферу технологій;
- “Збірник рефератів дисертацій, НДР та ДКР”;
- “Бюлетень реєстрації НДР та ДКР”;
- бюлетень “План проведення наукових, науково-технічних заходів в Україні”;
- “Закони та підзаконні акти, директивні документи у сфері вищої освіти, науки, науково-технічної інформації, науково-технологічного та інноваційного розвитку України”.

КОНТАКТИ:

телефон (044) 521-00-39,

e-mail: uintei.ua@gmail.com, uintei.info@gmail.com

Детальніше на сайті УкрІНТЕІ: www.uintei.kiev.ua

Л. А. МУСІНА, канд. екон. наук, пров. н. с.

Т. К. КВАША, заввідділу

ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ СФЕРИ НТІ В УКРАЇНІ ТА ЇЇ ВПЛИВУ НА ДОСЯГНЕННЯ ЦСР

Резюме. У статті здійснено аналіз проблем і напрямів цифрової трансформації сфери науки, технологій та інновацій в Україні та в ЄС, а також оцінено їхній вплив на економіку та суспільство. Зазначено, що цифрова трансформація сфери науки, технологій та інновацій на національному рівні спрямована щонайменше на чотири напрями змін у: державному управлінні; модернізації дослідницької та інноваційної інфраструктури; підходах до державно-приватного партнерства; оцінюванні результативності управління на основі доказових даних. Розглянуто сильні та слабкі сторони України в упровадженні засад цифрової економіки. Показано, що стратегія GovTech через правовий режим “Дія.City” забезпечує підвищення ефективності органів державної влади та місцевого самоврядування, виконання національних Цілей сталого розвитку 16 та 17, а також розвиток партнерських відносин між владою та бізнесом, що заохочує підприємницьку діяльність і сприяє підвищенню конкурентоспроможності економіки в умовах посилення ринкової конкуренції. Цифрова трансформація у сфері науки та технологій в Україні здійснюється в напрямі інтеграції до Європейського дослідницького простору шляхом розроблення цифрової інфраструктури (e-інфраструктури) та виконання дорожніх карт інтеграції до Європейського дослідницького простору, а в інноваційній сфері — через створення сприятливих правових і фінансових умов для ведення малого і середнього інноваційного бізнесу та розвиток відповідної цифрової інфраструктури. Здійснено аналіз результативності чинної інноваційної інфраструктури та останніх стратегічних документів у сфері цифрового розвитку інноваційної діяльності, а також цифрової трансформації малого і середнього підприємництва в Україні в контексті впливу їхніх заходів на досягнення національних завдань Цілей сталого розвитку, зокрема 8, 9, 12.

Ключові слова: НТІ, цифрова трансформація, дослідницька e-інфраструктура, інноваційна інфраструктура, державно-приватне партнерство, ЦСР.

ВСТУП

Ребекка Грінспен, Генеральний секретар Конференції ООН з торгівлі та розвитку (United Nations Conference on Trade and Development, UNCTAD), на 8-й сесії Міждержавної групи експертів з електронної комерції та цифрової економіки у травні 2025 р. заявила [1]: “Ми живемо в часи швидкого цифрового прискорення. Близько 5,5 млрд людей зараз користуються інтернетом, і використовується більше цифрових пристроїв, аніж будь-коли раніше. Потони даних лежать в основі світової торгівлі, цифрові платформи впливають майже на все, від охорони здоров’я до освіти та способів ведення комерції, причому міжнародна торгівля цифровими послугами зросла майже на 10 % минулого року... Тим часом штучний інтелект розвивається експоненціально і, як очікується, зросте у 25 разів до 2033 р., перетворившись на ринок обсягом 5 трлн дол. США... Але ми стикаємося з фундаментальною проблемою. Цифровий розрив — колись проста прогалина у фізичному доступі — перетворився на складну прірву даних, навичок і можливостей. Пере-

ходячи через цифрову революцію, ми ризикуємо бути приголомшеними її масштабами та швидкістю — трильйонами ринкової вартості, мільярдами підключених пристроїв, тераваттами споживаної електроенергії. Але за цими цифрами стоять людські життя, громади та екосистеми. ...Це не абстрактні ризики. Вони реальні, вимірні та щоразу більші. А відповідь полягає не в уповільненні цифровізації, а у формуванні її напрямів. Для цього нам потрібна нова політика, нові партнерства та нове глобальне зобов’язання інтегрувати екологічну стійкість у цифрові стратегії”.

“Глобальний цифровий договір”, прийнятий країнами — членами ООН у вересні 2024 р. на Саміті майбутнього як Додаток до “Пакту на майбутнє” [2] наголошує, що “співпраця країн має бути гнучкою та адаптованою до цифрового ландшафту, що швидко змінюється”. Договір містить такі зобов’язання до 2030 р.: а) сформувати відкрите, чесне, інклюзивне та недискримінаційне цифрове середовище для всіх, у межах якого мікро-, малим і середнім підприємствам буде забезпечена можливість отримати

доступ до цифрової економіки та конкурувати в ній (Ціль сталого розвитку 9 (ЦСР)).

Натомість додаток II до Глобального цифрового договору передбачає такі зобов'язання: п. 19 — використовувати переваги наявних, нових і новітніх технологій та домагатися зниження пов'язаних з ними ризиків за допомогою ефективного, інклюзивного та справедливого управління на всіх рівнях, активізувати зусилля з нарощування потенціалу в галузі науки, технологій та інновацій (НТІ) та співпраці, а також сприяти передачі технологій на взаємно узгоджених умовах; п. 24 — задіяти можливості науки, даних, статистики та стратегічного прогнозування для забезпечення перспективного мислення та планування, розроблення та реалізації сталих видів практики та інституційних реформ, домагаючись при цьому, щоб управління стало більш превентивним, адаптивним і здатним враховувати майбутні можливості, ризику та виклики.

Резолюція Генеральної Асамблеї ООН

про використання інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) для розвитку [3] закликає: "...спрямувати вплив швидких технологічних змін на досягнення ЦСР, ...розробляти ефективні стратегії у сфері НТІ, які могли б сприяти зміцненню конкурентоспроможності, залученню інвестицій та швидкому зниженню вартості ІКТ, зокрема розробляти дорожні карти для впровадження досягнень НТІ в інтересах ЦСР, а також спрямувати зусилля на подолання зростаючого цифрового розриву між країнами та всередині країн шляхом створення більш сприятливих режимів регулювання на всіх рівнях, розроблення нормативно-правової бази, що сприяє розширенню інноваційної діяльності, розвитку державно-приватних партнерств".

Відтак сфера НТІ в будь-якій країні має бути активним учасником трансформацій, які супроводжують появу нової реальності — цифрової економіки та цифрового суспільства.

Огляд 174 рецензованих статей щодо уточнення змісту цифрової трансформації [4] пропонує таке її визначення: цифрова трансформація — це "еволюційний процес, що використовує цифрові можливості та технології, щоб дати змогу бізнес-моделям, операційним процесам і клієнтському досвіду створювати цінність". Міжнародна наукова рада [5] розглядає цифрову трансформацію як явище, що охоплює спектр змін: від невеликих, таких як створення нових продуктів і послуг, до повної реструктуризації операцій, культури та продуктів компанії з метою використання переваг цифрових технологій. На нашу думку, цифрова трансформація передбачає здійснення змін щонаймен-

ше в управлінні організаціями, інфраструктурі, методах державно-приватного партнерства, підходах до оцінки результативності на основі використання баз доказових даних.

Повномасштабна війна РФ проти України стала тригером геополітичної турбулентності, милітаризації технологій та розгортання торгових воєн у світі. В умовах воєнної ескалації спроможність інноваційних екосистем впливати на конкурентні позиції національних економік та їх технологічне лідерство стає одним із критеріїв успіху країн у глобальному масштабі. В Україні війна надала імпульс відновленню оборонно-промислового комплексу (ОПК), що базується на розвитку цифрових технологій та інновацій майбутнього. Український ОПК має значний потенціал для розвитку України як одного з глобальних лідерів у сфері інноваційних оборонних технологій. Однак його ефективна реалізація вимагає здійснення цифрових трансформацій у сфері НТІ та в промисловому виробництві, а також залучення значних інвестицій.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Післявоєнне відновлення зруйнованої інфраструктури, природного середовища та продуктивності промислового та аграрного секторів вимагатиме цифрових рішень, враховуючи суттєве скорочення протягом воєнного часу чисельності громадян, які працюють в Україні. Європейський і світовий досвід використання цифрових технологій та інновацій малим і середнім бізнесом свідчить про істотні можливості підвищення його конкурентоспроможності та, насамкінець, досягнення ЦСР 9 (інновації та інфраструктура). Цифрові рішення в системі надання державних послуг населенню та державних закупівель також суттєво впливають на ефективність використання державних коштів і досягнення ЦСР. У цьому сенсі для України актуальним є вивчення досвіду цифрової трансформації сфери досліджень та інновацій (ДІІ) у країнах ЄС. Результати дослідження будуть враховані під час роботи над Дорожньою картою використання НТІ для досягнення ЦСР.

Метою дослідження є аналіз проблем і перспектив цифрової трансформації сфери науки, технологій та інновацій в Україні та в країнах — членах ЄС, оцінювання їх впливу на економіку та суспільство, а також надання пропозицій щодо інструментів здійснення інноваційних трансформацій у напрямі сталого розвитку в Україні.

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАНИХ ПУБЛІКАЦІЙ

Перебіг впровадження засад цифрової економіки знайшов ґрунтовне відображення в доповіді, присвяченій двадцятиріччю Всесвітнього

саміту з питань інформаційного суспільства (WSIS) 2025 року [6]. Теоретичним питанням розвитку та запровадження засад цифрової економіки присвячено роботи експертів Департаменту економічних і соціальних питань (ДЕСП) ООН, відображені в: Резолюції Генеральної Асамблеї ООН 2024 р. щодо використання ІКТ для розвитку [3]; Глобальному цифровому договорі, прийнятому країнами — членами ООН у вересні 2024 р. на Саміті майбутнього [2]; Звіті UNCTAD про цифрову економіку 2024 року [7].

Питання впливу цифрових технологій на екологію знайшли відображення у виступі Генерального директора UNCTAD Ребекки Грінспен до Звіту UNCTAD [6] та у дослідженні Університету Luiss (Luiss Institute for European Analysis and Policy) [8]. Поняття цифрової трансформації проаналізовано в огляді рецензованих статей [4] на цю тему, а щодо наукових організацій — у публікаціях Міжнародної наукової ради [5].

Практичні питання розбудови засад цифрової економіки в Україні розглядаються у працях [9–13]. Зокрема засади розвитку дослідницьких е-інфраструктур в Україні та дорожніх карт їх інтеграції до ЄДП розглянуто в працях [9; 10], а стимулювання цифрового розвитку бізнесу — у Стратегії відновлення, сталого розвитку та цифрової трансформації малого і середнього підприємництва на період до 2027 р., схваленій розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 серпня 2024 р. № 821-р [11].

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

В Україні перехід до засад цифрової економіки розпочато у 2018 р. із затвердженням урядової Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018–2020 рр. та плану заходів щодо її реалізації [12]. Концепції передував ґрунтовний документ громадської організації HighTech Office від грудня 2016 р. під назвою “Цифровий порядок денний — 2020. Концептуальні засади”. Зазначалося, що “швидкі та глибинні наслідки від переходу на “цифру” будуть можливими лише тоді, коли “цифрова” трансформація стане основою життєдіяльності українського суспільства, бізнесу та державних установ, стане звичним і повсякденним явищем, стане нашим ДНК, стане основою добробуту України”. Зміни складу Уряду загальмували цей процес, а план заходів щодо реалізації згаданої урядової Концепції не було виконано.

Реальний перехід до цифрової економіки розпочато зі створенням Міністерства цифрової трансформації (Мінцифри) України, метою якого є переведення всіх державних послуг в електронну форму, створення інтегрованих сервісів як для громадян, так і для самої держави. Закон

України “Про особливості надання публічних (електронних публічних) послуг” від 15 липня 2021 р. № 1689-IX [13] заклав правове підґрунтя цифрової трансформації державних сервісів і визначив принципи надання публічних послуг в електронній формі, зокрема й в автоматичному режимі без участі посадових осіб. Результатом стало запровадження на рівні країни та регіональних адміністрацій стратегії **GovTech** (урядові технології).

Звіт Всесвітнього економічного форуму “The Global Public Impact of GovTech 2025” інформує, що GovTech (урядові технології) є наступним етапом розвитку державного управління, де інновації зустрічаються з підзвітністю [14]. Хоча уряди послідовно впроваджують технології для модернізації операцій, масштаб, швидкість та обсяг того, що можливо в наступному десятилітті, є безпрецедентними. Багато технологій, доступних зараз для державного сектору, надають можливість створювати комплексні системи, що оптимізують функції уряду та взаємодію як із громадянами, так і з бізнесом. Оскільки штучний інтелект (ШІ), аналітика даних і цифрові платформи стають підґрунтям державного управління, потенціал для переосмислення роботи урядів є величезним. Очікується, що ринок GovTech зросте з 606 млрд дол. США у 2024 р. до 1,4 трлн дол. США до 2034 р., створюючи можливість у розмірі 9,8 трлн дол. США для додавання суспільної цінності в 2034 році. Ця можливість буде реалізована завдяки підвищенню: *ефективності* (впорядкування процесів, зниження витрат та покращення якості послуг); *прозорості* (посилення підзвітності процесів, зменшення корупції та зміцнення довіри громадськості); *сталості розвитку* (оптимізація ресурсів, скорочення відходів та підтримка екологічної сталості).

Україну представлено в цьому Звіті як одну з країн-лідерів у запровадженні GovTech. Зокрема, повідомляється, що Мінцифри України разом із головними спеціалістами з цифрових технологій (ГСЦТ), створеними в 16 міністерствах, 26 центральних урядових установах і 19 регіональних військових адміністраціях, відіграло важливу роль у розробленні та впровадженні цифрових рішень з урахуванням місцевих потреб. Центральне місце в цих зусиллях займає бачення — **“Держава в смартфоні”**, стратегія, що спрямована на перетворення України на “найзручнішу цифрову країну в світі” [14].

З прийняттям Закону України “Про стимулювання розвитку цифрової економіки” у 2021 р. [15] та низки інших нормативних актів було запроваджено правовий режим “Дія.City” з метою

створення сприятливих правових і фінансових умов для ведення інноваційного бізнесу, розбудови цифрової інфраструктури, залучення інвестицій та талановитих фахівців.

Згідно з результатами аналітичного огляду цифрової трансформації України у 2019–2024 рр., здійсненого компаніями GGTC Київ та “Вокс Україна”, застосунок “Дія” налічував понад 21,7 млн користувачів у 2024 р., для яких доступно 66 послуг, а через вебпортал — понад 130 послуг [16]. У “Дії” забезпечено доступ до комплексного сервісу “е-Підприємець”, що об’єднує послуги щодо започаткування та ведення підприємницької діяльності).

Цей інноваційний підхід є критично важливим для стійкості України, даючи змогу уряду швидко розвивати такі державні послуги, як платформа електронної допомоги та додаток повітряної тривоги під час кризи. Робота застосунку “Дія” забезпечує виконання національних ЦСР 16 та 17 у частині підвищення ефективності органів державної влади та місцевого самоврядування, а також розвитку партнерських відносин між владою та бізнесом.

Робота стратегії GovTech та функціонування сервісів “Вулик” та “Трембіта” дає змогу розвивати цей підхід для підвищення результативності інноваційної діяльності за трьома напрямками: розбудова сучасної інноваційної інфраструктури, запровадження стимулювальної політики на засадах державно-приватного партнерства, оцінювання результатів і впливу.

Робоча група з розроблення Економічної стратегії України до 2030 року представила у лютому 2021 р. Аудит розвитку цифрової економіки та ІКТ України, у якому визначено такі слабкі місця України [17]:

- офіційна статистика не обчислює обсягу цифрової економіки, що унеможлиблює відстеження прогресу;
- загальна оцінка цифрової грамотності всього населення є низькою;
- проблемою залишається низький рівень цифрових навичок у державних службовців, медиків і вчителів;
- Україна має один із найнижчих рівнів доступу до державних послуг онлайн у Європі;
- український ринок е-комерції значно поступається за обсягами іншим країнам Європи (у 19 разів менший, ніж у Польщі, та майже в 150 разів менший, ніж у Німеччині);
- недостатні стимули для цифрових трансформацій у секторах економіки: наслідком низькотехнологічного рівня виробництва стала найнижча в Європі продуктивність праці, яка втричі менша за показники Польщі та Угорщини.

Тому Україна, базуючись на світовому досвіді та власних цілях і обмеженнях, має відшукати свій шлях та стратегію переходу до цифрової економіки.

Трансформації в напрямі цифрового розвитку науки і технологій в Україні здійснюються головним чином шляхом інтеграції до ЄДП, оскільки це є одним із ключових стратегічних напрямів реалізації Угоди про асоціацію між Україною та ЄС, зокрема ст. 375. Інтеграція України до ЄДП передбачає поступову гармонізацію національної науково-інноваційної системи з європейськими політиками та практиками шляхом розроблення дорожніх карт інтеграції, які було розроблено в 2018 та 2021 рр., а також нової Дорожньої карти на 2025–2027 рр. (Наказ Міністерства освіти і науки України № 1067 від 30 грудня 2025 р.).

У ЄДП цифрові інфраструктури (“е-інфраструктури”) — це комплекс технологій, продуктів і процесів, що забезпечують обчислювальні, телекомунікаційні та мережеві можливості на цифровій основі [18]. Вони постають як критично важливий інструмент для розвитку відкритої науки, міждисциплінарної співпраці та підвищення якості наукових результатів.

У жовтні 2022 р. було затверджено *Національний план щодо відкритої науки* [19], який визначає Дорожню карту розвитку цифрової інфраструктури до 2030 р., зокрема унормування механізмів реєстрації та обліку науково-дослідних робіт і дисертацій за допомогою електронної системи з віддаленим доступом, надання закладам вищої освіти (ЗВО) і науковим установам (НУ) доступу до міжнародних електронних баз даних наукової інформації, а також розроблення механізму моніторингу ефективності впровадження принципів відкритого доступу в Національній науково-інформаційній системі URIS.

У публікації [9] узагальнено основні типи е-інфраструктур для підтримки наукової діяльності в Україні (**табл. 1**).

Експерти наголошують, що вплив е-інфраструктур на наукову спільноту потребує дослідження змін в організації та комунікації науковців, а також удосконалення цифрових технологій.

Положення про національну електронну науково-інформаційну систему (затверджене Постановою Кабінету Міністрів України від 27 вересня 2022 р. № 1067) та перелік 16 видів електронних ресурсів, зокрема реєстрів даних (**табл. 2**), мають забезпечувати автоматизацію процесів збору, формування та збереження даних про інформаційні ресурси системи освіти та науки, представлення на міжнародному рівні

Таблиця 1

Головні типи чинних національних е-інфраструктур в Україні

Назва е-інфраструктури	Абревіатура	Мета та завдання е-інфраструктури
Український Національний грид http://ung.bitp.kiev.ua/ua/	УНГ	Проведення великомасштабних розподілених обчислень, обмін даними між установами
Національний репозитарій академічних текстів https://nrat.ukrintei.ua/polityka-nrat	НРАТ	Накопичення, зберігання, аналіз і поліпшення доступу до академічних текстів, підтримка наукової доброчесності
Українська науково-освітня телекомунікаційна мережа http://uran.ua/~ukr/net-org.htm	УРАН	Забезпечення комунікації та мережевого зв'язку, зокрема з європейськими та світовими е-інфраструктурами через мережу GÉANT
Національна електронна науково-інформаційна система	URIS	Забезпечення відкритості та агрегація даних про вітчизняну науку

Джерело: [9].

Таблиця 2

Електронні інформаційні ресурси системи освіти і науки України

Інформаційні ресурси системи освіти та науки	Суб'єкти системи
Відомості, що містить:	
1) Єдина державна електронна база з питань освіти	ДП «Інфоресурс»
2) Національний репозитарій академічних текстів	УкрІНТЕІ
3) Відкритий український індекс наукового цитування OUCI	Державна науково-технічна бібліотека (ДНТБ) України
4) Державний реєстр НУ, яким надається підтримка держави	МОН України
5) Державний реєстр наукових об'єктів, що є національним надбанням	МОН України
6) Єдиний державний реєстр юридичних осіб, фізичних осіб – підприємців і громадських формувань	Мін'юст України
7) ORCID (Open Researcher and Contributor ID)	ORCID
8) DOI register (Digital Object Identifier)	Crossref
9) ROR (Research Organization Registry)	Координатор – California Digital Library
10) Система Державної атестації наукових установ	УкрІНТЕІ
11) Система Державної атестації ЗВО в частині наукової (науково-технічної) діяльності	МОН України
12) Система державної реєстрації та обліку відкритих науково-дослідних, дослідно-конструкторських робіт і дисертацій	УкрІНТЕІ
13) Державний реєстр винаходів України	Національний орган інтелектуальної власності (Укрпатент)
14) Державний реєстр свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір	- « -
15) Державний реєстр України корисних моделей	- « -
16) Електронна система реєстрації технологій	УкрІНТЕІ

Джерело: Положення про національну електронну науково-інформаційну систему України, затверджене Постановою Кабінету Міністрів України № 1067 від вересня 2022 року.

результатів наукової, науково-технічної та інноваційної діяльності українських учених. Серед цих видів ресурсів чотири джерела інформації формує Український інститут науково-технічної експертизи та інформації (УкрІНТЕІ).

Тема створення єдиного ринку досліджень та інновацій, а також єдиного ринку капіталу набула минулого року значного пріоритету в політиці ЄС завдяки критичному оцінюванню результатів європейської політики конкурентоспроможності колишнім Прем'єр-міністром Італії Маріо Драгі у 2024 році [20]. Результуючий цикл низького промислового динамізму, низького рівня інновацій та інвестицій в Європі Маріо Драгі назвав "пасткою середньої технології". З метою зміцнення ролі Європи як глобального лідера Єврокомісія переглянула політику у сфері ДіІ, промисловості та цифрового розвитку.

У січні 2025 р. Єврокомісія представила "Компас конкурентоспроможності" – нову дорожню карту для стимулювання економічного зростання ЄС [21], а у травні 2025 р. ухвалено Порядок денний Європейського дослідницького простору (ЄДП) на 2025–2027 рр. [22], зорієнтований на підвищення конкурентоспроможності Європи, цифрову трансформацію, безпеку знань та протидію глобальним викликам. У новому Порядку денному ЄДП зазначено, що ЄДП, узгоджений з Компасом конкурентоспроможності, орієнтований на запровадження "п'ятої свободи" — єдиного ринку досліджень, інновацій та технологій без кордонів у межах ЄС на всіх рівнях. Це допоможе державам-членам діяти ефективніше разом, узгоджуючи національні дослідницькі політики та програми, а також поліпшити дослідницьку інфраструктуру, що прискорюватиме зелений і цифровий перехід.

Ураховуючи уточнені акценти політики ЄС, МОН України своїм наказом № 1732 від 31 грудня 2025 р. затвердило оновлену Дорожню карту інтеграції України до ЄДП на період до 2027 р., яка містить конкретні завдання щодо цифрової трансформації української наукової системи за сімома структурними політиками ЄС. Виконання цих завдань забезпечить системність і послідовність подальших кроків гармонізації наукової екосистеми України з європейською.

Не менш важливою та терміновою проблемою для підвищення конкурентоспроможності української економіки є модернізація інноваційної інфраструктури, враховуючи фундаментальний зсув у промисловій політиці. Сьогодні більше компаній концентрується в провідних секторах XXI ст. (космічна та оборонна промисловість, апаратне і програмне забезпечення ІКТ, хімічна промисловість). Удосконалюються інноваційні екосистеми для підтримки суб'єктів-

учасників інноваційного ланцюга на всіх етапах руху інноваційного продукту — від генерації ідеї до її монетизації. Серед головних чинників впливу інноваційних екосистем на економіку експерти називають: доступ стартапів до венчурного капіталу, зменшення регуляторних бар'єрів для розширення молодих технологічних компаній, інтеграцію дослідників до інноваційних кластерів (мережі університетів, стартапів, компаній, венчурних капіталістів).

Доповідь Європейської комісії 2024 р. щодо оцінювання перспектив імплементації ЄДП в Україні визначила такі слабкі місця української екосистеми інновацій [23]: чинні системи управління та фінансування не відповідають потребам різних дослідницьких галузей, зокрема оборонних, комерційних, прикладних і фундаментальних досліджень; чинне бюджетне законодавство та процеси його впровадження в поєднанні з системою національних (галузевих) академії наук, є недостатніми для розв'язання проблем інноваційної системи. Пріоритети, якими керуються під час розподілу фінансування ДіІ, застаріли, оскільки встановлені понад 20 років тому.

Дійсно, державна інноваційна політика реалізується відповідно до положень застарілих нормативних документів, а саме: Закону України "Про інноваційну діяльність" від 4 липня 2002 р. № 40-IV (зі змінами) та Концепції реформування державної політики в інноваційній сфері 2015 року [24], а також законів про регулювання діяльності технологічних, наукових та індустріальних парків тощо.

Концепція національної інноваційної екосистеми виходить із необхідності розбудови системи тісних технологічних та управлінських зв'язків між інституціями всього інноваційного циклу, які мають забезпечувати генерацію інновацій не лише на стадіях наукових, проєктно-конструкторських і технологічних розробок, а й на фінальній стадії інноваційного ланцюга — комерціалізації створених нових наукових і технологічних знань (**табл. 3**). Це вимагає тісної співпраці держави з приватним сектором (державно-приватне партнерство), продуманої системи преференцій для всіх учасників національної інноваційної екосистеми та трансформації інноваційної інфраструктури як основи для підтримки національної інноваційної екосистеми.

Характерними особливостями інноваційних систем п'ятого покоління, які сформувалися в останнє десятиліття ХХ ст., є такі: ключова роль навчання; системна інтеграція, міждисциплінарна та еволюційна природа; поєднання продуктових, технологічних та організаційних інновацій; перехід від інженерних інновацій до

Таблиця 3

Особливості еволюції п'яти поколінь інноваційних систем

Покоління інноваційних систем (ІС)	Головні риси ІС
Перше, друге (1950–1970-ті рр.)	<i>Проста лінійна модель.</i> Технологічний поштовх, ринковий попит
Третє (1980-ті рр.)	<i>Послідовна модель.</i> Взаємодія та зворотні зв'язки між різними елементами
Четверте (1990–2000-ті рр.)	<i>Паралельна модель.</i> Інтеграція процесів у межах фірм, акцент на зв'язки та альянси з ключовими постачальниками та споживачами
П'яте (2000–2020-ті рр.)	<i>Системна інтеграція.</i> Дифузна природа — домінування мереж, коопераційних зв'язків між складовими системи та акторами, гнучка відповідь на попит споживача, безперервні інновації (завдяки цифровізації та інтернету), багато учасників

Джерело: Marina Ranga National and Regional Innovation Systems and Policies for Development / International Conference (Minsk, Republic of Belarus, 11–12 June 2009). URL: <http://unece.org/ceci.documents>.

інновацій на основі базових знань, тобто фундаментальних і близьких до них прикладних результатів; дифузна природа — домінування мереж, коопераційних зв'язків між складовими ІС та великою кількістю акторів.

Інноваційна інфраструктура є містком між результатами наукових розробок і ринком, між державою та бізнесом, що несе найбільше навантаження щодо доведення наукових розробок до реального користувача. Її головним завданням є сприяння суб'єктам підприємництва на початкових стадіях науково-технічних проєктів. У цьому контексті держава виконує роль координатора між складниками трикутника знань: наука — освіта — інновації. У країнах — інноваційних лідерах в основі інноваційної політики лежить відпрацьована модель: дослідницькі університети — бізнес-інкубатори — технопарки — інноваційний студентський бізнес — венчурні фонди — малі інноваційні підприємства — бізнес, що швидко зростає. У цифровій економіці співіснують згадана вище традиційна (аналогова) інноваційна інфраструктура та цифрова інфраструктура. Автори [25] пропонують розглядати цифрову інфраструктуру як “комплекс технологій, продуктів і процесів, що забезпечують обчислювальні, телекомунікаційні та мережеві можливості електронної взаємодії, обміну даними, сигналами тощо, та працюють на цифровій (а не на аналоговій) основі”.

Чинний Закон України “Про інноваційну діяльність” від 4 липня 2002 р. № 40-IV визначає інноваційну інфраструктуру узагальнено як сукупність підприємств, організацій, установ, їх об'єднань, асоціацій будь-якої форми власності,

що надають послуги із забезпечення інноваційної діяльності (фінансові, консалтингові, маркетингові, інформаційно-комунікаційні, юридичні, освітні тощо) [26]. Більш пізня Концепція реформування державної політики в інноваційній сфері 2015 р. уточнює, що інноваційна інфраструктура охоплює: виробничо-технологічний, фінансовий, інформаційно-аналітичний, консалтинговий складники, а також технополіси, технологічні та наукові парки, центри трансферу технологій, бізнес-інкубатори та інноваційні структури інших типів; мережі науково-технічної інформації, експертно-консалтингові та інжинірингові фірми, державних і приватних інвесторів. Однак десятирічна практика використання згаданих нормативних документів доводить фрагментарний і поверхневий характер інноваційної інфраструктури, її неузгодженість на галузевому рівні, а також складність оцінювання результатів інноваційної діяльності.

Насправді інноваційна інфраструктура в Україні складається з різних організацій як державного сектору, так і приватних та громадських організацій, які широко використовують у своїй діяльності інтернет, цифрові технології та послуги, платформи та бази даних (**рис. 1**). Вона передбачає технологічні, наукові та індустріальні парки, які традиційно покладаються на підтримку держави, а також і різні громадські спілки, асоціації, цифрові хаби, кластери, консорціуми, мережі стартапів і підприємств, які існують за рахунок членських внесків, продажу своїх інноваційних продуктів і послуг, а також грантової підтримки від різних фондів і програм дослідницької та інноваційної діяльності.



Рис. 1. Інноваційна екосистема України

Джерело: сформовано авторами з використанням підходу HIQSTEP PROJECT ICT INNOVATION AND START-UP ECOSYSTEMS STUDY REPORT January, 2018, 257 с. — URL: <https://eufordigital.eu/wp-content/uploads/2019/10/3.ICT-innovation-and-start-up-ecosystems.pdf>.

Сьогодні на сайті МОН України представлено перелік 8 технопарків, зареєстрованих за поданням Національної академії наук (НАН) України, зокрема технопарків університетів і наукових інститутів: Інституту монокристалів (2000 р.), Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона (2001 р.), Напівпровідників, Інституту технічної теплофізики, Укрінфотеху (2002 р.), Київської політехніки, Інституту інтелектуальних інформаційних технологій (2003 р.) тощо [27]. МОН України інформує, що загалом їх налічується 16. Однак динаміка їхнього розвитку останніми роками знизилася.

Доречно нагадати, що запуск технопарків відбувався в складний для України період становлення ринкових відносин після розпаду СРСР, коли протягом 1990-х рр. були порушені замкнені виробничі цикли, кількість науковців скоротилася втричі (з 650 тис. у 1990 р. до 170 тис. у 2000 р.), відбувався “відтік мізків”. Технологічний розвиток промисловості дедалі

більше залежав від зарубіжних інвестицій та інтелектуальної продукції інших країн. Упродовж періоду 1990–2000 рр. відбувалася рецесія, і лише в 2000 р. відновилося зростання ВВП до 5,9 %, завершився період безпрецедентного падіння економіки, коли за 10 років було втрачено дві третини обсягу ВВП [28]. Інвестиції вкладалися переважно у виробничу інфраструктуру (у підприємства третього технологічного укладу — 75 %), була небезпека занепаду високотехнологічного виробництва. Україна дедалі більше ставала експортером сировини та продуктів первинної переробки.

Іншим чинником вичерпання потенціалу технопарків є скорочення переліку комерціалізованих високотехнологічних розробок і висока конкуренція на зовнішніх ринках. Окрім того, цей інструмент не пристосований до умов динамічного розвитку ринкової економіки, де інноваційне мале та середнє підприємництво та стартапи швидше можуть знайти свого споживача,

своє місце в ланцюгу створення доданої вартості та власний ринок. З огляду на цей висновок, пропонується визнати Закон України “Про спеціальний режим інноваційної діяльності технологічних парків” таким, що втратив чинність.

Згідно з Законом України “Про наукові парки” від 25 червня 2009 р. № 1563 та більш пізнім Законом України “Про внесення змін до деяких законів України щодо активізації діяльності наукових парків” від 7 вересня 2021 р. № 1714-ІХ, **науковий парк** – це юридична особа, що створюється з ініціативи ЗВО та/або НУ шляхом об’єднання внесків засновників із метою організації, координації, контролю процесу розроблення та виконання проєктів. Метою створення є раціональне використання наукового потенціалу установи для комерціалізації результатів наукових досліджень та впровадження на ринках.

Однак своїх завдань цей Закон не виконав: наразі в МОН України зареєстровано 37 наукових парків, із яких лише 5 звітують про інноваційну діяльність. На сайті Міжнародної асоціації наукових парків та інноваційних зон (<https://www.iascr/ws>) українських наукових парків не знайти в переліку понад 400 наукових і дослідницьких парків різних країн.

Серія вебінарів “Наукові парки. Український контекст і законодавство”, проведена МОН України та YEP Accelerator для мережі стартап-шкіл, визначила такі недоліки чинного порядку функціонування наукових парків в Україні [29]:

- суттєвих переваг і пільг наукові парки досі не мають — це звичайні товариства чи спільні підприємства (СП), лише з назвою “науковий парк”, тобто вони є рівнозначними структурами стосовно чинного законодавства;
- щодо оренди майна університету, то для парків фактично немає жодної переваги перед СП (хоча Законом передбачено надавати приміщення в оренду на пільгових умовах — 1 грн орендної плати за 1 м²);
- щодо фінансування — наші наукові парки сплачують до бюджету від 5 до 10 млн грн податків на рік, а європейські наукові парки не сплачують ПДВ;
- водночас афіліація з університетом дає змогу паркам бути унікальними гравцями на ринку: вони виграють конкурси проєктів у конкуренції з університетом.

Мінцифри України разом із МОН України розпочали за проєктом **Science City** комплексну реформу інституту наукових парків, яка має створити умови для співпраці між науковими установами, університетами, бізнесом і державою [30]. Ця ініціатива допоможе подолати перешкоди, що гальмують інноваційну діяльність (се-

ред яких податкове навантаження, складні процедури закупівель, бюрократизовані операційні процедури), а також інтегрувати наукові парки в правовий режим “**Дія.City**” на гнучких умовах.

Ще одна складова інноваційної інфраструктури — це **індустріальні парки (ІП)**, яких в Реєстрі Мінекономіки України нараховується 110, але реально нормально функціонуючих компаній з управління парками небагато. Принципи створення ІП визначені в Законі України “Про індустріальні парки” 2013 р. (зі змінами), спрямованому на залучення інвестицій, створення нових робочих місць, розвиток виробничої та ринкової інфраструктури. Однак із моменту прийняття Закону в 2013 р. розвиток парків був повільним насамперед через виклики для інвестиційної діяльності на регіональному рівні.

Стратегія розвитку індустріальних парків на 2023–2030 рр., прийнята в лютому 2023 р. впроваджує інноваційні підходи до модернізації промислових підприємств, зокрема через інструменти підвищення ресурсоефективності та впровадження моделі “циркулярної економіки”. Перехід від лінійного підходу (“бери — використай — викидай”) до циркулярного підходу (“зменшення — повторне використання — переробка”) має забезпечити економію ресурсів і досягнення ЦСР 12 “Відповідальне споживання та виробництво”.

На державному рівні підтримку інноваційної діяльності здійснюють:

- Фонд розвитку інновацій (Український фонд стартапів) — <https://usf.com.ua/>;
- Державна інноваційна фінансово-кредитна установа — <https://sfii.gov.ua/>;
- Національний фонд досліджень України (НФДУ) — <https://nrfu.org.ua/>;
- Мережа центрів підтримки технологій та інновацій (Technology and innovation support centers, TISCs) — <https://tisc.ukrpatent.org/>.

Проведене нами дослідження показало, що з початку війни РФ проти України кількість інноваційних мереж, інноваційних і технологічних екосистем та їх учасників в Україні зросла, меншою мірою на базі провідних університетів, а більшою — завдяки активності громадських організацій, які безпосередньо співпрацюють з європейськими структурами і намагаються отримати грантову підтримку від програм РП9 “Горизонт Європа”, а також дотичних до неї програм, наприклад, COST, LIFE та Digital Europe. Найчастіше вони охоплюють цифрові технології виробництва продукції та ІКТ-послуги, оборонні технології, практичні рішення у напрямі зеленого переходу.

Перелік таких мереж і партнерств відображено на **рис. 1**, серед яких:

- програми підтримки студентських проєктів і стартапів на базі ЗВО та НУ, зокрема Консорціум Academ.City на базі Київського академічного університету, бізнес-інноваційний центр “ТехСтартапСкул” Львівської політехніки, стартап-школа Sikorsky Challenge на базі КПІ тощо;
- консорціум EEN-Ukraine у рамках Європейської мережі підприємств (Enterprise Europe Network, EEN) у складі представників бізнесу, держави та НУ;
- Techosystem — спілка учасників технологічної екосистеми для стартапів, скейлапів та інвесторів. Доступ до мережі компаній і партнерів через онлайн-спільноту з понад 100 членів;
- Інтернет-асоціація України — найбільше об’єднання в сфері електронних комунікацій, понад 220 членів з усіх регіонів України;
- Європейський цифровий інноваційний хаб Kyiv HiTech — об’єднання кластерів, наукових інституцій та інноваційних компаній для цифрових трансформацій.

Розвиток таких мереж в Україні певною мірою дає змогу зменшити розрив із країнами ЄС за ступенем інноваційності, але необхідною є більш дієва політика держави щодо створення відкритої інноваційної екосистеми.

Три урядові стратегії, спрямовані на цифрову трансформацію управління реалізацією проєктів, зокрема планування та оцінювання результативності, розпочали новий період у розвитку інноваційної системи України. Серед них варто виокремити такі:

- Стратегія цифрового розвитку інноваційної діяльності України на період до 2030 року та операційний план заходів до її реалізації на 2025–2027 рр. (розпорядження Кабінету Міністрів України від 31 грудня 2024 р. № 1351-р);
- Стратегія відновлення, сталого розвитку та цифрової трансформації малого і середнього підприємництва на період до 2027 р. та операційний план щодо її реалізації на 2024–2027 рр. (розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 серпня 2024 р. № 821-р);
- Стратегія здійснення цифрового розвитку, цифрових трансформацій і цифровізації системи управління державними фінансами на період до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України від 13 травня 2025 р. № 464-р).

ВИСНОВКИ

Цифрові технології не лише забезпечують комунікацію, обмін інформацією та фінансові

послуги, а й є підґрунтям широкого та постійно зростаючого набору видів діяльності, що формують цифрову економіку — багатоконпонентне явище, що охоплює майже всіх аспекти економічного та соціального життя. Аналіз досвіду європейських країн свідчить, що розвиток цифрової економіки збільшує кількість нових робочих місць, підвищує продуктивність праці в секторах економіки та внесок у зростання ВВП, але це вимагає зменшення цифрового розриву, трансформацій в організації процесів виробництва, обліку та статистики.

Україна інвестує в дослідження і розвиток лише 0,33 % від ВВП. Перешкоди на шляху інновацій до комерціалізації існують через відсутність стратегічного бачення перспектив розвитку, зосередженості державного сектору на структурних змінах та відповідних напрямках цифрових трансформацій.

Інноваційна інфраструктура має відіграти центральну роль у процесах післявоєнного відновлення, спонукаючи до взаємодії науковців, інноваторів, підприємців, студентський бізнес як на центральному, так і на місцевому рівнях. Щоб усі складники інфраструктури працювали на економіку та суспільство, необхідна цифровізація управління всією інноваційною екосистемою. Вона забезпечить оцінювання результативності планування та реалізації державної політики в цих сферах з позицій її впливу на інноваційність та конкурентоспроможність промисловості та економіки загалом.

Згаданою вище Стратегією цифрового розвитку інноваційної діяльності в Україні — 2030 та Операційним планом заходів до неї передбачено: розроблення єдиної платформи для збирання, аналізування та обміну даними у сфері науки та інноваційної діяльності для оцінювання результативності об’єктів інфраструктури та впливу сфери НТІ на конкурентні позиції країни; створення інтегрованих платформ, що акумулюють ресурси, кращі практики та методології оцінювання інноваційної діяльності.

Очікується, що реалізація Стратегії в напрямі цифрової трансформації економіки забезпечить розвиток інноваційного підприємництва з функціонуючими оцифрованими державними та соціальними сервісами.

Стратегією відновлення, сталого розвитку та цифрової трансформації малого і середнього підприємництва на період до 2027 р. також передбачено низку завдань за стратегічною ціллю “Сприяння інноваційному розвитку, цифровій трансформації та зеленому переходу”. Без цифрових інновацій у сфері управління цими процесами, а також доступу малих та середніх підприємств до засобів оброблення великих

даних результативність складників інноваційної інфраструктури буде низькою.

Стратегія цифрового розвитку системи управління державними фінансами на період до 2030 року, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 13 травня 2025 р. № 464-р, визначає кроки для впровадження сучасних ІКТ із метою підвищення прозорості та інтегрованості фінансових ресурсів розпорядників бюджетних коштів, що дасть змогу підвищити результативність системи НТІ та збільшити наукоємність економіки.

Реалізація завдань щодо цифровізації потоків інформації та ресурсів у згаданих стратегіях є підґрунтям для формування Дорожньої карти цифрового розвитку НТІ до 2030 року, що інтегруватиме інформаційні потоки від головних учасників, забезпечить аналіз та оцінювання ступеня досягнення національних ЦСР та можливість впливу на результат в інтерактивному режимі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Statement by Rebeca Grynspan, Secretary-General of UN Trade and Development (UNCTAD) — Inter-governmental Group of Experts on E-commerce and the Digital Economy, 8th session [Electronic resource] // eTrade for all. — 12 May, 2025. — Access mode: <https://etradeforall.org/news/statement-rebeca-grynspan-secretary-general-untrade-and-development-unctad-intergovernmental>.
- The Pact for the Future [Electronic resource] : Resolution adopted by the General Assembly on 22 September 2024 // United Nations. General Assembly, p. 6, 44, 45. — Access mode: <https://docs.un.org/en/A/RES/79/1>.
- Information and communications technologies for sustainable development [Electronic resource] : UN General Assembly resolution on ICT for Development // United Nations. General Assembly. — 23 December 2024. — п. 28. — Access mode: <https://docs.un.org/en/A/RES/79/194>.
- Egodawele M. A Systematic Review of Digital Transformation Literature (2013–2021) and the development of an overarching apriori model to guide future research [Electronic resource] / M. Egodawele, D. Sedera, V. Bui // arXiv. — Dec 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2212.03867.
- Strengthening digital maturity: a practical toolkit for science organizations [Electronic resource] // International Science Council. — September 2025. DOI: 10.24948/2025.13.
- Implementing World Summit on the Information Society Outcomes. A Twenty-Year Review // UNCTAD/TCS/DTL/INF/2025/2. — Access mode: <https://unctad.org/publication/implementing-world-summit-information-society-outcomes-twenty-year-review>.
- Digital Economy Report 2024 Shaping an environmentally sustainable and inclusive digital future // UNCTAD/DER/2024 — 228 p. — Access mode: https://unctad.org/system/files/official-document/der2024_en.pdf.
- Meliciani V. Digital technologies and new trends in globalization: opportunities and challenges for diversifying economies / V. Meliciani. — Luiss Institute for European Analysis and Policy. — 21 October 2024.
- Роль е-інфраструктур у підтримці наукової діяльності: виклики та перспективи / А. В. Яцишин, Г. Я. Мозолевич, Т. М. Яцишин, А. С. Сухих // Наука, технології, інновації. — 2023. — № 2(26). — С. 54–77. DOI: <http://doi.org/10.35668/2520-6524-2023-2-08>.
- Островська Б. Інтеграція України до Європейського дослідницького простору та її повоєнна відбудова / Б. Островська // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. — 2025. — Вип. 12. — № 48. — С. 322–334. — Серія: “Юридичні науки”. DOI: <https://doi.org/10.23939/law2025.48.322>.
- Про схвалення Стратегії відновлення, сталого розвитку та цифрової трансформації малого і середнього підприємництва на період до 2027 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024–2027 роках [Електронний ресурс] : розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 серп. 2024 р. № 821-р. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/821-2024-%D1%80#n14>.
- Про схвалення Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018–2020 рр. та плану заходів щодо її реалізації [Електронний ресурс] : розпорядження Кабінету Міністрів України від 17 січ. 2018 р. № 67-р. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/67-2018-%D1%80/ed20180117#Text>
- Про особливості надання публічних (електронних публічних) послуг [Електронний ресурс] : Закон України від 15 лип. 2021 р. № 1689. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1689-20/print>.
- Ukraine: resilience and innovation with a “state in a smartphone” vision Development [Electronic resource] // WEFORUM INSIGHT REPORT. The Global Public Impact of GovTech 2025: a \$9.8 Trillion Opportunity. — Berlin, 2025. — P. 21. — Access mode: https://reports.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Public_Impact_of_GovTech_2025.pdf.
- Про стимулювання розвитку цифрової економіки [Електронний ресурс]: Закон України від 15 лип. 2021 р. № 1667-ІХ. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1667-20#Text>.
- Виговська В. Державна цифрова трансформація: аналіз за 2019–2024 рр. [Електронний ресурс] / В. Виговська, В. Шолудько, М. Балицька // Vox Україна. — 25 черв. 2025. — Режим доступу: <https://voxukraine.org/derzhavna-tsyfrova-transformatsiya-analiz-za-2019-2024-roky>.
- Цифрова економіка та інформаційно-комп’ютерні технології. Публічна подія для пріоритизації заходів Економічної стратегії України 2030 [Електронний ресурс] // Кабінет Міністрів України. — Лют. 2021 р. — Access mode: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/uploads/public/602/581/51d/60258151d2896461958259.pdf>.
- ERA Policy Agenda 2025–2027 [Electronic resource] // European Commission. European Research Area Platform. — Access mode: <https://european-research-area.ec.europa.eu/era-policy-agenda-2025-2027>.
- Про затвердження національного плану щодо відкритої науки [Електронний ресурс]: розпорядження Кабінету Міністрів України від 8 жовт. 2022 р. № 892-р. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/892-2022-%D1%80/print>.
- The future of European competitiveness. Part A, A competitiveness strategy for Europe. September 2024. Summary // European Union. Publications

- Office of the European Union. — 2025. DOI: 10.2872/9356120.
21. Competitiveness compass. Our plan to reignite Europe economy [Electronic resource] // European Commission. — 2025. — Access mode: https://commission.europa.eu/topic/eu-competitiveness/competitiveness-compass_en.
 22. What is ERA? [Electronic resource] // European Commission. European Research Area (ERA). — Access mode: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/strategy/strategy-research-and-innovation/our-digital-future/european-research-area_en.
 23. ERA Country Report 2024 Ukraine, prepared by Tomas van den Broeke and Anastasiia Konstantynova, Technopolis, as part of the project 'Implementation of the ERA Monitoring Mechanism' for the European Commission, Directorate-General for Research and Innovation (RTD/2023/OP/0017) [Electronic resource]. — Access mode: https://enlargement.ec.europa.eu/ukraine-report-2024_en.
 24. Про схвалення Концепції реформування державної політики в інноваційній сфері [Електронний ресурс]: розпорядження Кабінету Міністрів України від 10 верес. 2012 р. № 691-р. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/691-2012-%D1%80#Text>.
 25. Краус К. М. Цифрова інфраструктура в умовах віртуалізації та нової якості управління економічними відносинами / К. М. Краус, Н. М. Краус, Г. М. Поченчук // Ефективна економіка. — 2021. — № 9. DOI: 10.32702/2307-2105-2021.9.82.
 26. Про інноваційну діяльність [Електронний ресурс]: Закон України від 04 лип. 2002 р. № 40-IV. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/40-15#Text>.
 27. Технологічні парки [Електронний ресурс] // МОН України. — Режим доступу: <https://mon.gov.ua/nauka/innovatsiyna-diyalnist-ta-transfer-tekhnologiy/tekhnologichni-parki>.
 28. Структурні зміни та економічний розвиток України [Електронний ресурс]: монографія / В. М. Геєць, Л. В. Шинкарук, Т. І. Артьомова та ін.; за ред. Л. В. Шинкарук; НАН України; Ін-т екон. та прогноз. — Київ, 2011. — С. 132–139.
 29. Наукові парки: український контекст і законодавство [Електронний ресурс] // Газета "Світ". — 8 липня 2025. — Режим доступу: <https://surl.li/xswmkb>.
 30. Як наукові парки рухатимуть інновації в Україні [Електронний ресурс]: новий законопроект Science City // Міністерство цифрової трансформації України. — 16 січ. 2025. — Режим доступу: <https://surl.li/yoqtrm>.
- REFERENCES**
1. (12 May, 2025). Statement by Rebeca Grynspan, Secretary-General of UN Trade and Development (UNCTAD) — Intergovernmental Group of Experts on E-commerce and the Digital Economy, 8th session. *eTrade for all*. Retrieved from: <https://etrade-forall.org/news/statement-rebeca-grynspan-secretary-general-un-trade-and-development-unctad-intergovernmental>.
 2. The Pact for the Future. Resolution adopted by the General Assembly on 22 September 2024. *United Nations. General Assembly*. Retrieved from: <https://docs.un.org/ru/0A/RES/79/1>.
 3. Information and communications technologies for sustainable development : UN General Assembly resolution on ICT for Development on 23 December 2024. *United Nations. General Assembly*. Retrieved from: <https://docs.un.org/ru/A/RES/79/194>.
 4. Egodawe, M., Sedera, D., & Bui, V. (Dec. 2022). A Systematic Review of Digital Transformation Literature (2013–2021) and the development of an overarching apriori model to guide future research. *arXiv*. DOI:10.48550/arXiv.2212.03867.
 5. (2025). Strengthening digital maturity: a practical toolkit for science organizations. *International Science Council*. DOI: 10.24948/2025.13
 6. (2025). Implementing World Summit on the Information Society Outcomes. A Twenty-Year Review. *UNCTAD/TCS/DTL/INF/2025/2*. Retrieved from: <https://unctad.org/publication/implementing-world-summit-information-society-outcomes-twenty-year-review>.
 7. (2024). Digital Economy Report 2024 Shaping an environmentally sustainable and inclusive digital future. *UNCTAD/DER/2024*. 228 p. Retrieved from: https://unctad.org/system/files/official-document/der2024_en.pdf.
 8. Meliciani, V. (2024). Digital technologies and new trends in globalization: opportunities and challenges for diversifying economies. *Luiss Institute for European Analysis and Policy*.
 9. Iatsyshyn, A. V., Mozolevych, H. Ia., Yatsyshyn, T. M., & Sukhikh, A. S. (2023). Rol e-infrastruktur u pidtrymtsi naukovoї diialnosti: vykyky ta perspektyvy [The role of e-infrastructures in supporting scientific activity: challenges and prospects]. *Nauka, tekhnolohii, innovatsii* [Science, technology, innovation], 2 (26), 54-77. DOI: <http://doi.org/10.35668/2520-6524-2023-2-08> [in Ukr.].
 10. Ostrovska, B. (2025). Intehratsiia Ukrainy do Yevropeiskoho doslidnyts-koho prostoru ta yii povoienna vidbudova [Ukraines integration into the European Research Area and its post-war reconstruction]. *Visnyk Natsional-noho universytetu "Lvivska politekhnika"*. Seriya: "Iurydychni nauky" [Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Series: "Legal Sciences"], 4 (48), 322-334. DOI: <https://doi.org/10.23939/law2025.48.322> [in Ukr.].
 11. (2024). Pro skhvalennia Stratehii vidnovlennia, staloho rozvytku ta tsyfrovoyi tran-sformatsii maloho i serednoho pidpryemnytstva na period do 2027 roku ta zatverdzhennia operatsiinoho planu zakhodiv z yii realizatsii u 2024-2027 rokakh: Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 30.08.2024 r. № 821-r. [On approval of the Strategy for the Recovery, Sustainable Development and Digital Transformation of Small and Medium-Sized Enterprises for the Period Until 2027 and approval of the Operational Plan of Measures for its Implementation in 2024-2027: Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 821-r of August 30, 2024]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/821-2024-%D1%80#n14> [in Ukr.].
 12. (2018). Pro skhvalennia Kontseptsii rozvytku tsyfrovoyi ekonomiky ta suspilstva Ukrainy na 2018-2020 rr. ta planu zakhodiv shchodo yii realizatsii: Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 17.01.2018 r. № 67-r. [On approval of the Concept for the Development of the Digital Economy and Society of Ukraine for 2018-2020 and the Action Plan for its Implementation: Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 67-r of January 17, 2018]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/67-2018-%D1%80/ed20180117#Text> [in Ukr.].
 13. (2021). Pro osoblyvosti nadannia publichnykh (elektronnykh publichnykh) posluh: Zakon Ukrainy vid 15.07.2021 r. № 1689 [On the features of the

- provision of public (electronic public) services: Law of Ukraine No. 1689 of July 15, 2021]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1689-20/print> [in Ukr.].
14. (2025). Ukraine: resilience and innovation with a “state in a smartphone” vision Development. *WE-FORUM INSIGHT REPORT. The Global Public Impact of GovTech 2025: a \$9.8 Trillion Opportunity*. Berlin, P. 21. Retrieved from: https://reports.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Public_Impact_of_GovTech_2025.pdf
 15. (2021). Pro stymuliuvannya rozvytku tsyfrovoy ekonomiky: Zakon Ukrainy vid 15.07.2021 r. № 1667-IX [On stimulating the development of the digital economy: Law of Ukraine No. 1667-IX of July 15, 2021]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1667-20#Text> [in Ukr.].
 16. Vyhovska, V., Sholudko, V., & Balytska, M. (2025). Derzhavna tsyfrova transformatsiia: analiz za 2019-2024 rr. [State digital transformation: analysis for 2019-2024]. *Voks Ukraina*. Retrieved from: <https://voxukraine.org/derzhavna-tyfrova-transformatsiya-analiz-za-2019-2024-roky> [in Ukr.].
 17. (2021). Tsyfrova ekonomika ta informatsiino-kompiuterni tekhnolohii. Publichna podiia dlia priorytizatsii zakhodiv Ekonomichnoi stratehii Ukrainy 2030 [Digital economy and information and computer technologies. Public event for prioritization of measures of the Economic Strategy of Ukraine 2030]. *Cabinet of Ministers of Ukraine*. Retrieved from: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/uploads/public/602/581/51d/60258151d2896461958259.pdf>.
 18. ERA Policy Agenda 2025-2027. *European Commission*. European Research Area Platform. Retrieved from: <https://european-research-area.ec.europa.eu/era-policy-agenda-2025-2027>
 19. (2022). Pro zatverdzhennia natsionalnoho planu shchodo vidkrytoi nauky: Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 8.10.2022 r. № 892-r [On the approval of the national plan for open science: Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 892-r of October 8, 2022]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/892-2022-%D1%80/print> [in Ukr.].
 20. (2025). The future of European competitiveness. Part A, A competitiveness strategy for Europe. September 2024. Summary. *European Union. Publications Office of the European Union*. DOI: 10.2872/9356120.
 21. (2025). Competitiveness compass. Our plan to reignite Europe economy. *European Commission*. Retrieved from: https://commission.europa.eu/topic/eu-competitiveness/competitiveness-compass_en.
 22. What is ERA? *European Commission. European Research Area (ERA)*. Retrieved from: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/strategy/strategy-research-and-innovation/our-digital-future/european-research-area_en.
 23. ERA Country Report 2024 Ukraine, prepared by Tomas van den Broeke and Anastasiia Konstantynova, Technopolis, as part of the project ‘Implementation of the ERA Monitoring Mechanism’ for the European Commission, Directorate-General for Research and Innovation (RTD/2023/OP/0017). Retrieved from: https://enlargement.ec.europa.eu/ukraine-report-2024_en.
 24. Pro skhvalennia Kontseptsii reformuvannya derzhavnoi polityky v innovatsiinii sferi: rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 10 veresnia 2012 r. № 691-r [On approval of the Concept of reforming state policy in the innovation sphere: Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 691-r of September 10, 2012]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/691-2012-%D1%80#Text> [in Ukr.].
 25. Kraus, K. M., Kraus, N. M., & Pochenchuk, H. M. (2021). Tsyfrova infrastruktura v umovakh virtualizatsii ta novoi yakosti upravlinnia ekonomichnymy vid-nosynamy [Digital infrastructure in the context of virtualization and a new quality of management of economic relations]. *Efektivna ekonomika* [Efficient economy]. 9, DOI: 10.32702/2307-2105-2021.9.82 [in Ukr.].
 26. (2022). Pro innovatsiinu diialnist: Zakon Ukrainy vid 04.07.2002 № 40-IV. [On innovation activity: Law of Ukraine No. 40-IV of July 4, 2002]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/40-15#Text> [in Ukr.].
 27. Tekhnologichni parky [Technology parks]. *MON Ukraina*. Retrieved from: <https://mon.gov.ua/nauka/innovatsiyna-diyalnist-ta-transfer-tekhnologiy/tekhnologichni-parki>
 28. Geets, V. M., Shynkaruk, L. V., & Artyomova, T. I. et al.; Shynkaruk, L.V. (Eds.) (2011). Structural changes and economic development of Ukraine [Structural changes and economic development of Ukraine]. Kyiv, P. 132-139. [in Ukr.].
 29. (2025). Naukovi parky: ukrainskyi kontekst i zakonodavstvo [Science parks: Ukrainian context and legislation]. *Hazeta “Svit”* [“Svit” newspaper]. Retrieved from: <https://surl.li/xcwmb> [in Ukr.].
 30. (2025). Yak naukovi parky rukhatymut innovatsii v Ukraini: novyi zakonoproiekt Science City [How science parks will drive innovation in Ukraine: the new Science City bill]. *Ministerstvo tsyfrovoy transformatsii Ukrainy*. Retrieved from: <https://surl.li/yqtrm> [in Ukr.].

I. A. MUSINA, PhD in Economics, Leading Researcher
 T. K. KVASHA, Head of the Department

PROBLEMS AND PROSPECTS OF DIGITAL TRANSFORMATION OF THE STI SECTOR IN UKRAINE AND ITS IMPACT ON ACHIEVING THE SDGs

Abstract. *The article analyzes the problems and directions of digital transformation of the sphere of science, technology and innovation (STI) in Ukraine and in the European Union (EU) and assesses their impact on the economy and society was assessed. It is concluded that the digital transformation of STI at the national level is aimed at at least four areas of change: in public administration, in the modernization of research and innovation infrastructure, in approaches to public-private partnership, and in the assessment of management effectiveness based on evidence-based data. The strengths and weaknesses of Ukraine in implementing the principles of the digital economy are examined. It is shown that the GovTech strategy through the Diia.City legal regime ensures increased efficiency of state authorities and local self-government bodies, implementation of national SDGs 16*

and 17, as well as the development of partnership relations between government and business, which encourages entrepreneurial activity and leads to increased competitiveness of the economy in conditions under market competition.

Digital transformation in the field of science and technology in Ukraine is carried out in the direction of integration into the European Research Area (ERA) by developing digital infrastructure (e-infrastructure) and implementing the Roadmaps for integration into the ERA, and in the innovation sector – through the creation of favorable legal and financial conditions for running small and medium-sized innovative businesses and the development of appropriate digital infrastructure for this. An analysis of the effectiveness of the current innovation infrastructure and the latest strategic documents in the field of digital development of innovation activities and the digital transformation of small and medium-sized businesses in Ukraine was carried out in the context of their impact on the achievement of national tasks of the Sustainable Development Goals, in particular SDGs 8, 9, and 12.

Keywords: STI, digital transformation, research e-infrastructure, innovation infrastructure, public-private partnerships, SDGs.

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

Мусіна Людмила Абдрахманівна — канд. екон. наук, пров. н. с. відділу технологічного прогнозування науково-технічної діяльності, ДНУ “Український інститут науково-технічної експертизи та інформації”, вул. Антоновича, 180, м. Київ, Україна, 03150; +38 (050) 351-08-84; musina@ukr.net, ORCID 0000-0002-7706-3451; ReseacherID: CAF-6964-2022

Кваша Тетяна Костянтинівна — заввідділу технологічного прогнозування науково-технічної діяльності, ДНУ “Український інститут науково-технічної експертизи та інформації”, вул. Антоновича, 180, м. Київ, Україна, 03150; +38 (066) 234-22-77; tkvasha13@gmail.com; ORCID: 0000-0002-1371-3531; ReseacherID: R-4526-2017

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Musina L. A. — PhD in Economics, Leading Researcher, Department of Technological Forecasting of Scientific and Technical Activities, State Scientific Institution “Ukrainian Institute of Scientific and Technical Expertise and Information”, 180, Antonovycha Str., Kyiv, 03150, Ukraine; +38 (050) 351-08-84; musina@ukr.net; ORCID 0000-0002-7706-3451; ReseacherID: CAF-6964-2022

Kvasha T. K. — Head of the Department of Technological Forecasting of Scientific and Technical Activities, State Scientific Institution “Ukrainian Institute of Scientific and Technical Expertise and Information”, 180, Antonovycha Str., Kyiv, 03150, Ukraine; +38 (066) 234-22-77; tkvasha13@gmail.com; ORCID: 0000-0002-1371-3531; ReseacherID: R-4526-2017

Надійшла до редакції 05.03.2026

Прийнята до друку 16.03.2026



Г. О. АНДРОЩУК, канд. екон. наук, доц.

В. С. ХВОСТЕНКО, канд. екон. наук, доц.

ПАТЕНТНИЙ ЛАНДШАФТ ТЕХНОЛОГІЙ VISUAL SLAM: СТРАТЕГІЧНІ НАСЛІДКИ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ

Резюме. У статті здійснено комплексне дослідження патентного ландшафту технологій Visual SLAM, що є ключовим інструментом просторової навігації та автономної орієнтації сучасних робототехнічних і безпілотних систем. Методологічне підґрунтя дослідження становить патентний ландшафтний аналіз із використанням міжнародної патентної аналітичної платформи Orbit Intelligence. Дослідження охоплює аналіз патентних сімейств за заявниками, юрисдикціями охорони, часовою динамікою, технологічними галузями та класифікаційними кодами IPC/CPC. Особливу увагу приділено ідентифікації ядра патентних претензій і концептуальних напрямів патентування. Результати дослідження показали, що патентування Visual SLAM має переважно алгоритмічний характер і характеризується домінуванням академічних і науково-дослідних установ серед заявників за відсутності вираженої монополізації з боку великих промислових корпорацій. Патентний ландшафт є фрагментованим, а ключові патентні претензії зосереджені в межах класів G06, G01S та G05D. Встановлено високий рівень концептуальної повторюваності патентних рішень, що ускладнює комерціалізацію технологій без спеціалізованого аналізу. Показано, що за умови коректного управління інтелектуальною власністю Visual SLAM створює вікно можливостей для інженерної інтеграції в безпілотні літальні апарати, автономні транспортні та робототехнічні системи. У контексті України результати дослідження можуть бути використані для формування національної стратегії розвитку автономних навігаційних технологій, оборонних R&D-програм і політики інтелектуальної власності у сфері технологій подвійного використання.

Ключові слова: інтелектуальна власність, технології Visual SLAM, патентний ландшафт, патентні сімейства, технології подвійного використання, автономні системи, безпілотні літальні апарати (БПЛА).

ВСТУП

Україна є лідером світового ринку безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Наші підприємства вже виготовляють у чотири рази більше БПЛА, аніж США. Перевірені в реальній війні вітчизняні дрони демонструють найвищу ефективність у порівнянні з іноземними аналогами. Дрони вже змінили правила війни, а тепер готуються змінити кон'юнктуру світового ринку військових технологій. Українські виробники стабільно випускають мільйони дронів щороку, а за наявності зовнішнього фінансування країна здатна наростити виробництво у 2026 р. у декілька разів [1]. Ключова відмінність України від інших гравців полягає в тому, що її технології проходять постійний цикл “польових мутацій”: бойовий досвід перетворює кожне покоління БПЛА на кращий продукт уже через тижні, а не роки. На глобальному ринку це стає вирішальним чинником: найбільш затребуваними є не лише теоретично інноваційні розробки, а технології, які довели працездатність у реальному бою. Саме такі системи здатна розробляти та постачати Україна.

Винахідницька активність у сфері БПЛА. Аналіз показує, що кількість патентів на БПЛА

різко зросла по всьому світу на тлі “нових перегонів озброєнь”, оскільки ця технологія дедалі частіше застосовується на полі бою. Згідно з даними ВОІВ, кількість патентів, поданих на технології, пов'язані з БПЛА, зросла на 16 % у період із 2022 до 2023 рр. (з 16 800 у 2022 р. до 19 700 у 2023 р.). До п'ятірки провідних країн, що розробляють цю технологію, входять Китай, Росія та США. За даними ВОІВ, з 2022 до 2024 р. Росія отримала 342 патенти. Україна за той же період отримала лише 4 патенти. До 82 % всіх світових патентів на дрони, поданих з 2015 р., було отримано від китайських компаній. У 2023 р. 87 % усіх заявок надійшли з Китаю [2, с. 115].

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Стрімкий розвиток автономних систем, робототехніки та БПЛА зумовлює зростання ролі технологій **Visual SLAM** (Simultaneous Localization and Mapping) як базового інструменту просторової орієнтації та побудови навколишнього середовища в режимі реального часу. Технології Visual SLAM (або одночасна локалізація та картографування) — це комплекс алгоритмів, які дають змогу пристроям, наприклад, роботам або дронам, **одночасно**

визначати своє місцезнаходження в просторі та будувати детальну карту невідомого середовища, використовуючи лише **візуальні дані (зображення з камер)** замість дорогих LiDAR-сенсорів. Вони є ключовими для автономної навігації, доповненої реальності та картографування, оскільки дають змогу “бачити” світ та орієнтуватися в ньому без GPS, обробляючи візуальні особливості (фічі) навколишнього світу [3]. На відміну від традиційних навігаційних підходів, що ґрунтуються на зовнішніх інфраструктурних джерелах (GNSS, маяки, карти), Visual SLAM забезпечує автономність системи за рахунок оброблення візуальних даних та їх інтеграції з іншими сенсорними потоками. Водночас паралельно з інтенсивним впровадженням технологій Visual SLAM у прикладні системи спостерігається активне патентування відповідних технічних рішень, що формує складний і фрагментований патентний ландшафт. Особливістю цього процесу є те, що значна частина патентних заявок спрямована не на конкретні інженерні реалізації, а на абстрактні алгоритмічні підходи, архітектурні схеми оброблення візуальної інформації та методи інтеграції локалізації й картографування в автономних системах. Унаслідок цього виникає структурний розрив між технічним розвитком Visual SLAM і правовими механізмами його охорони: інженерна реалізація часто відбувається швидше, ніж усвідомлення патентних обмежень, що породжує ризики економіко-правових конфліктів, блокування інновацій та ускладнення комерціалізації розробок.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Попри значну кількість наукових публікацій, присвячених алгоритмам Visual SLAM, питання структури патентного ландшафту цієї технології досліджені фрагментарно. У більшості праць акцент робиться на порівнянні алгоритмічної ефективності, точності локалізації чи обчислювальної складності, тоді як патентний вимір розвитку технології залишається поза межами системного аналізу.

Наукова проблема полягає у відсутності узагальненого розуміння того, як саме патентуються технології Visual SLAM, які технічні рішення формують ядро патентних претензій, які суб'єкти концентрують права інтелектуальної власності (ІВ) та яким чином це впливає на можливості інженерної інтеграції та подальшої комерціалізації автономних систем. Зокрема невирішеними залишаються такі питання: чи має патентний ландшафт Visual SLAM ознаки концентрації або, навпаки, фрагментованості;

на якому рівні (алгоритмічному, архітектурному, платформному) виникають головні патентні ризики; чи існують “вікна можливостей” для розроблення нових рішень без порушення чинних патентів; якою мірою патентування Visual SLAM впливає на свободу інженерної діяльності в автономних системах.

Наявні дослідження у сфері Visual SLAM переважно: не враховують структуру патентних сімейств; не аналізують розподіл патентів за заявниками, юрисдикціями та IPC/CPC-класами; розглядають патенти як окремі документи, а не як елементи єдиного ландшафту ІВ. У результаті відсутній інструментарій, який дав би змогу: оцінювати патентні ризики на етапі R&D; формувати patent-aware-стратегії розробки; використовувати патентні дані для стратегічного планування інновацій. Саме ця методологічна прогалина зумовлює необхідність проведення комплексного патентного ландшафтного аналізу технологій Visual SLAM.

Дослідження у сфері аналітики ІВ (Intellectual Property Analytics, IPA) — міждисциплінарної галузі, що поєднує методи математики, статистики, комп'ютерного програмування та дослідження операцій, — дають змогу перетворювати масиви даних про об'єкти ІВ на структуровані знання, виявляти взаємозв'язки, тенденції та закономірності прийняття управлінських і технологічних рішень, що потребує спеціальних міждисциплінарних компетенцій. Одним із ключових інструментів IPA є патентний ландшафт — інформаційно-аналітичне дослідження патентної документації, що відображає загальну патентну ситуацію в певному технологічному напрямі або щодо патентної активності суб'єктів інноваційної сфери з урахуванням часової динаміки та територіальної ознаки (підприємства, регіону, галузі, країни або глобального рівня). За оцінками фахівців, використання патентної інформації дає змогу скоротити час проведення НДДКР приблизно на 60 % та знизити їхню вартість до 40 %. Звіт про патентний ландшафт забезпечує “моментальний знімок” патентної ситуації у конкретній технології, компанії або регіоні, що створює підґрунтя для прийняття обґрунтованих рішень у сфері інноваційного розвитку та управління правами ІВ [4, с. 53]. У цьому контексті представлена стаття є логічним продовженням досліджень авторів [5; 13] у сфері аналітики ІВ та спрямована на застосування інструментів патентного ландшафту для аналізу технологій Visual SLAM як критичного елемента автономних систем і безпілотних платформ.

Метою статті є виявлення закономірностей формування та структури патентного ландшафту технологій Visual SLAM, а також обґрунтування

можливостей і обмежень їх інженерної інтеграції та стратегічного використання в автономних системах з урахуванням патентних ризиків, алгоритмічного характеру правової охорони та перспектив формування національної інноваційної політики у сфері безпілотних і подвійних технологій.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання:

- ідентифікувати структуру патентного ландшафту Visual SLAM шляхом аналізу розподілу патентних сімейств за заявниками, юрисдикціями та часовою динамікою;
- визначити ступінь концентрації прав інтелектуальної власності у сфері Visual SLAM і встановити наявність або відсутність домінуючих патентних гравців;
- проаналізувати технологічну сутність патентних рішень у сфері Visual SLAM на основі класифікацій IPC/CPC з метою виділення ядра патентних претензій;
- схарактеризувати алгоритмічний та архітектурний характер патентування Visual SLAM і визначити рівні, на яких формуються основні патентні ризики для розробників автономних систем;
- оцінити можливості інженерної інтеграції Visual SLAM у прикладні автономні платформи (зокрема БПЛА) з позицій свободи дій (freedom-to-operate);
- обґрунтувати практичне значення патентного ландшафту Visual SLAM для формування державної інноваційної та оборонно-технологічної політики України в умовах розвитку індустрії БПЛА і автономних систем.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Методологія та дані дослідження. У контексті статті важливим є обґрунтування методологічної коректності проведеного дослідження та пояснення джерел і підходів до аналізу патентного ландшафту у сфері технологій Visual SLAM. Формалізація методів збору й оброблення даних дає змогу забезпечити відтворюваність результатів і підтвердити їхню аналітичну та прикладну цінність. **Джерела даних дослідження.** Емпіричною основою дослідження є патентні дані, отримані з міжнародних патентно-аналітичних платформ, зокрема **Orbit Intelligence**. Зазначені ресурси забезпечують доступ до структурованих даних щодо патентних сімейств, заявників, юрисдикцій, класифікацій IPC/CPC і динаміки патентування, що є стандартною практикою для проведення патентних ландшафтних досліджень.

Використання даних на рівні патентних сімейств, а не окремих патентних документів,

дає змогу уникнути спотворень, пов'язаних із багаторазовим патентуванням одного й того самого технічного рішення в різних країнах.

Критерії формування вибірки. Формування вибірки патентних даних здійснювалося на засадах поєднання ключових слів і тематичних обмежень, що відповідають предмету дослідження. До пошукового запиту включалися такі ключові терміни та їх комбінації: Visual SLAM, visual odometry, simultaneous localization and mapping, visual localization, visual mapping, а також суміжні формулювання, пов'язані з автономною навігацією та комп'ютерним зором.

Часовий горизонт дослідження охоплює період активного розвитку технологій Visual SLAM, що дає змогу простежити як етапи становлення, так і сучасні тенденції винахідницької та патентної активності. До аналізу включалися чинні та опубліковані патентні сімейства без обмеження за стадією правової охорони, оскільки метою дослідження є виявлення структурних характеристик технологічного поля, а не оцінювання юридичної сили окремих патентів. Типи документів обмежувалися патентними сімействами, що містять технічні рішення, без урахування непатентної науково-технічної літератури, що аналізується опосередковано через цитування та класифікаційні ознаки.

Параметри аналізу патентного ландшафту. У межах дослідження патентний ландшафт аналізується за такими ключовими вимірами:

- *заявники* — для виявлення концентрації прав інтелектуальної власності та типів суб'єктів (університети, наукові установи, компанії);
- *юрисдикції патентування* — з метою визначення географічної структури технологічного розвитку та національних центрів патентної активності;
- *технологічні напрями* — для ідентифікації основних об'єктів патентування у сфері Visual SLAM (алгоритми локалізації, картографування, семантичне оброблення, оптимізація обчислень тощо);
- *класи IPC/CPC* — як інструмент формалізованого опису технічної сутності заявлених винаходів і виділення ядра патентних претензій.

Зазначені параметри дають змогу перейти від описового огляду до структурного аналізу технології як об'єкта ІВ.

Обмеження дослідження. Результати дослідження слід інтерпретувати з урахуванням низки обмежень. По-перше, технології Visual SLAM мають виражений **алгоритмічний характер**, що зумовлює розмитість меж між окремими класами рішень і складність їх

однозначної класифікації. По-друге, різні патентні відомства та аналітичні платформи можуть застосовувати відмінні підходи до стандартизації заявників і класифікацій IPC/CPC, що частково впливає на деталізацію результатів.

Водночас зазначені обмеження не знижують аналітичної цінності дослідження, оскільки його метою є виявлення **структурних закономірностей патентування**, а не юридична експертиза окремих патентних документів.

Таким чином, застосована методологія забезпечує надійну основу для подальшого аналізу патентного ландшафту Visual SLAM і дає змогу розглядати отримані результати як репрезентативні для формування наукових, інженерних і стратегічних висновків, що виходять за межі суто оглядового підходу.

ПАТЕНТНИЙ ЛАНДШАФТ

Ключові заявники та концентрація прав ІВ у сфері Visual SLAM. Аналіз структури заявників у патентному ландшафті технологій Visual SLAM дає змогу оцінити рівень концентрації прав ІВ, характер технологічного розвитку галузі та потенційні бар'єри для подальшої комерціалізації. Для цього було досліджено розподіл патентних сімейств за стандартизованими заявниками на основі даних платформи Orbit (Questel).

На **рис. 1** представлено абсолютний розподіл кількості патентних сімейств за ключовими заявниками. По вертикалі наведено перелік головних заявників, по горизонталі — кількість

патентних сімейств у відповідній технологічній вибірці.

Аналіз наведених даних свідчить про чітко виражене домінування університетів і науково-дослідних установ у патентуванні технологій Visual SLAM. Найбільшу кількість патентних сімейств демонструє Beijing University of Technology, що суттєво випереджає інших заявників. До групи провідних заявників також належать Southeast University, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Guangdong University of Technology, Zhejiang University of Technology, Wuhan University та низка інших технічних університетів Китаю.

Характерною рисою виявленого ландшафту є концентрація патентної активності в академічному секторі за відсутності великих комерційних корпорацій серед лідерів. Така структура свідчить про те, що технології Visual SLAM перебувають на стадії активного науково-дослідного розвитку, де ключову роль відіграють фундаментальні та прикладні дослідження, а не масштабна індустріальна експлуатація.

Для поглиблення аналізу концентрації прав ІВ на **рис. 2** подано частковий розподіл патентних сімейств за стандартизованими заявниками у відносних показниках.

Отримані результати демонструють відсутність домінуючого монополістичного гравця у сфері Visual SLAM. Найбільша частка патентного портфеля належить Beijing University of Technology (приблизно 6–7%), за якою з не-

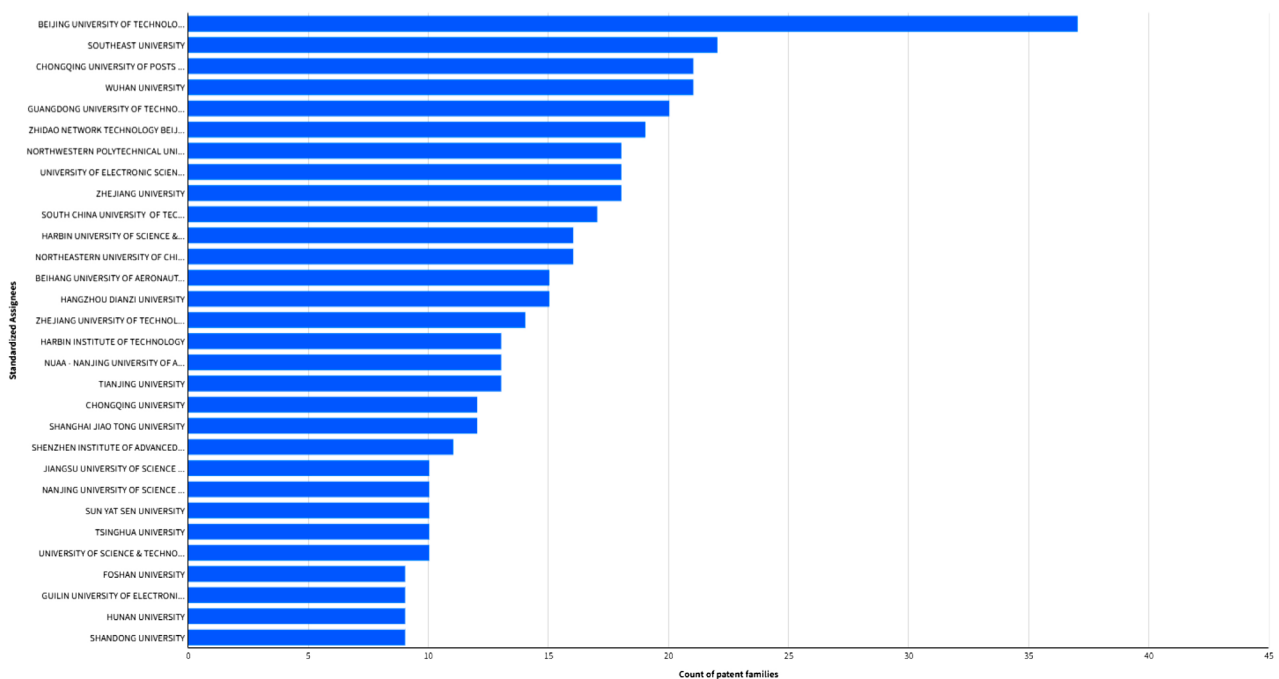


Рис. 1. Кількість патентних сімейств за стандартизованими заявниками у сфері Visual SLAM

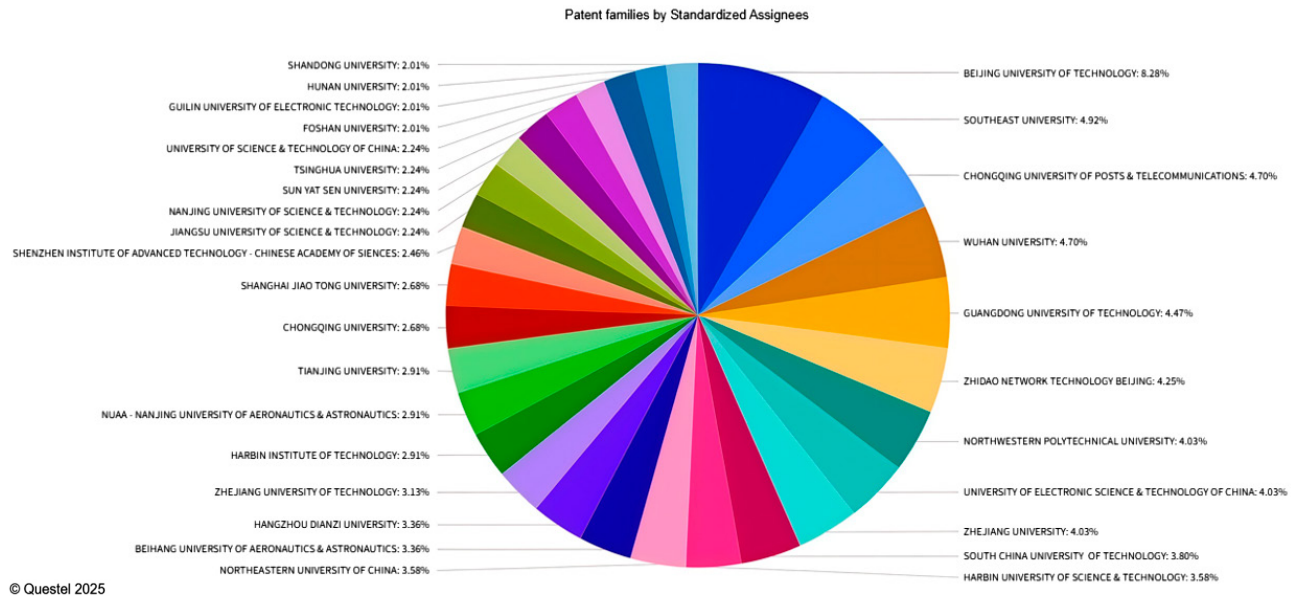


Рис. 2. Частковий розподіл патентних сімейств за стандартизованими заявниками

значним відривом слідує Southeast University, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Wuhan University, Guangdong University of Technology та інші технічні університети. Частки більшості заявників перебувають у межах 2–4 %, що вказує на високий рівень фрагментації патентного ландшафту.

Переважають університети і дослідницьких інститутів серед ключових заявників підтверджує алгоритмічний характер більшості патентних рішень у сфері Visual SLAM. Головну увагу зосереджено на вдосконаленні методів візуальної локалізації, картографування, семантичного оброблення зображень та підвищення стійкості SLAM-алгоритмів у складних і динамічних середовищах без жорсткої прив'язки до конкретного типу апаратної платформи.

Така структура патентного ландшафту формує двоїстий ефект для подальшого розвитку галузі. З одного боку, відсутність концентрації прав у декількох корпораціях знижує ризики патентних блокувань і створює можливості для нових розробників та інженерних команд. З іншого боку, висока кількість алгоритмічних патентів потребує ретельного аналізу патентної чистоти під час інтеграції відповідних рішень у прикладні системи, зокрема у БПЛА та робототехнічні комплекси.

Узагальнюючи результати аналізу ключових заявників і структури розподілу патентних сімейств, можна дійти висновку, що патентний ландшафт технологій Visual SLAM характеризується низьким рівнем концентрації прав ІВ і домінуванням академічного сектору. Це свідчить про перебування технології на стадії інтенсив-

ного науково-алгоритмічного формування, коли головна конкурентна перевага створюється не за рахунок масштабної комерційної експлуатації, а через накопичення та варіативність методів локалізації та картографування. Виявлена фрагментованість патентного портфеля означає відсутність структурної монополізації галузі, що, з одного боку, знижує ризики блокування інновацій, а з іншого — формує підвищені вимоги до системного аналізу патентної чистоти під час переходу від дослідницьких розробок до прикладної інженерної інтеграції, зокрема в автономні платформи та безпілотні системи.

Географічна структура патентного захисту та юрисдикційна орієнтація технологій Visual SLAM. Аналіз географічної структури патентного захисту дає змогу оцінити не лише просторовий розподіл інноваційної активності у сфері Visual SLAM, а й стратегічні пріоритети заявників щодо комерціалізації та правової охорони відповідних технологій. Розподіл патентних сімейств за юрисдикціями пріоритету відображає ступінь орієнтації розробок на локальні чи глобальні ринки, а також рівень технологічної зрілості галузі.

На рис. 3 наведено розподіл патентних сімейств у сфері Visual SLAM та суміжних технологій автономної навігації за основними юрисдикціями пріоритету. З поданих даних видно, що домінантне положення займає КНР, на яку припадає більшість патентних сімейств. Частка міжнародних заявок за процедурою PCT, а також заявок у регіональних і національних юрисдикціях США та Європейського патентного відомства є істотно меншою.

Переважаюча національної китайської юрисдикції свідчить про те, що патентування технологій Visual SLAM здійснюється переважно в межах внутрішніх науково-дослідних програм і зорієнтоване на локальне впровадження. Така структура характерна для галузей, що перебувають на стадії активного технологічного формування, коли патентна охорона використовується насамперед як інструмент фіксації результатів досліджень, а не як засіб довгострокового блокування міжнародних ринків.

Водночас відносно невисока частка міжнародних і регіональних патентних заявок свідчить про відсутність у більшості заявників сформованих стратегій глобальної правової експансії. Це дає змогу припустити, що значна частина рішень у сфері Visual SLAM має універсальний алгоритмічний характер і може бути адаптована для різних платформ без жорсткої прив'язки до конкретних ринків або регуляторних середовищ.

Отже, географічна структура патентного ландшафту Visual SLAM підтверджує науково-дослідну та алгоритмічну природу більшості розробок, а також вказує на потенційну відкритість ніші для подальшої інженерної інтеграції, зокрема у сфері автономних робототехнічних систем і БПЛА. Водночас така структура потребує врахування юрисдикційних ризиків і проведення поглибленого аналізу патентної чистоти під час виходу на міжнародні ринки.

Технологічні напрями та об'єкти патентування у Visual SLAM. Аналіз технологічних напрямів патентування у сфері Visual SLAM дає змогу встановити, які саме технічні домени та об'єкти ІВ формують ядро відповідного патентного ландшафту, а також оцінити ступінь міждисциплінарності заявлених рішень. Для цього було використано інструменти класифікації технологічних галузей платформи Orbit (Questel), що ґрунтуються на поєднанні IPC/CPC-кодів і семантичного аналізу описів винаходів.

На **рис. 4** показано, що головний масив патентних сімейств у сфері Visual SLAM зосереджений у галузі Computer technology, що істотно перевищує всі інші технологічні напрями за кількістю заявок. Це підтверджує, що більшість патентів мають алгоритмічний і програмно-математичний характер і стосуються оброблення візуальних даних, оптимізації обчислювальних процедур, побудови карт середовища та локалізації у просторі.

Суттєву, але вторинну роль відіграють галузі Measurement, Optics, Digital communication та Control, що відображає прикладний аспект Visual SLAM як компонента автономних навігаційних систем. Причому частка галузей, пов'язаних із механічними елементами, транспортом або цивільним будівництвом, є незначною, що вказує на відсутність жорсткої апаратної прив'язки більшості запатентованих рішень.

Таким чином, Visual SLAM у патентному вимірі постає насамперед як універсальна

Patent families by Protection country

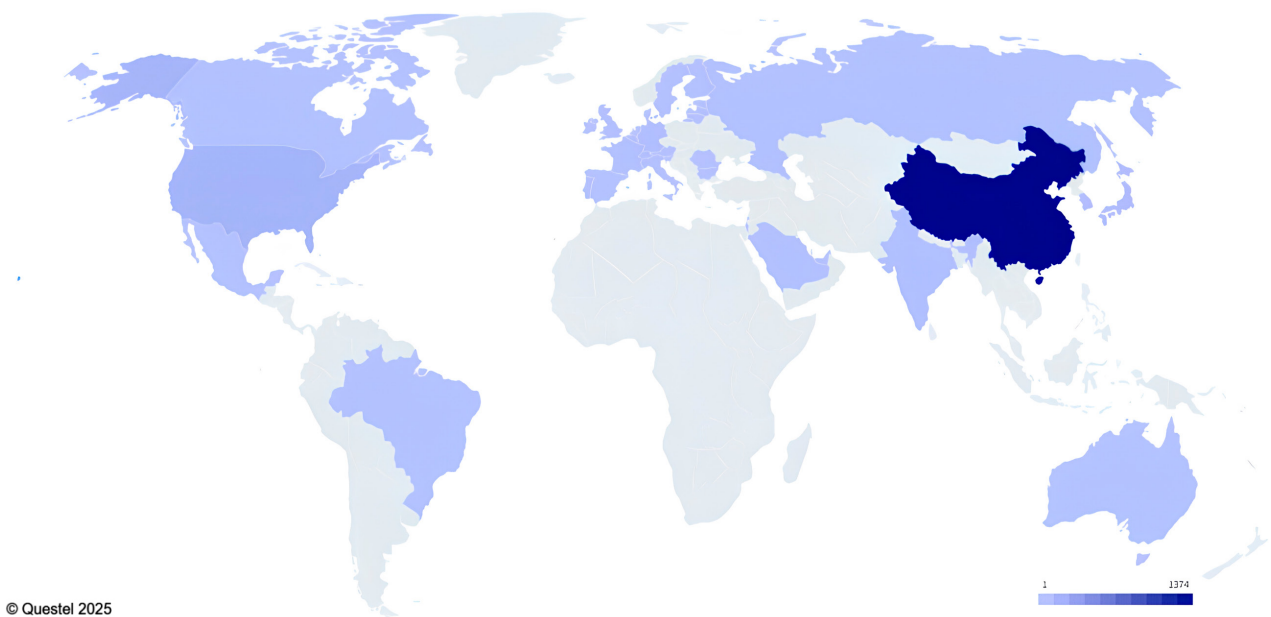


Рис. 3. Розподіл патентних сімейств у сфері Visual SLAM за юрисдикціями пріоритету

комп'ютерна технологія, придатна для інтеграції в різні типи автономних систем — від мобільної робототехніки до БПЛА.

Розподіл технологічних напрямів за заявниками. Більш детальне уявлення про ха-

рактер патентування надає матриця “заявник — технологічний домен”, наведена на **рис. 5**. Вона демонструє, що провідні заявники — переважно університети та науково-дослідні установи — концентрують свою патентну активність саме

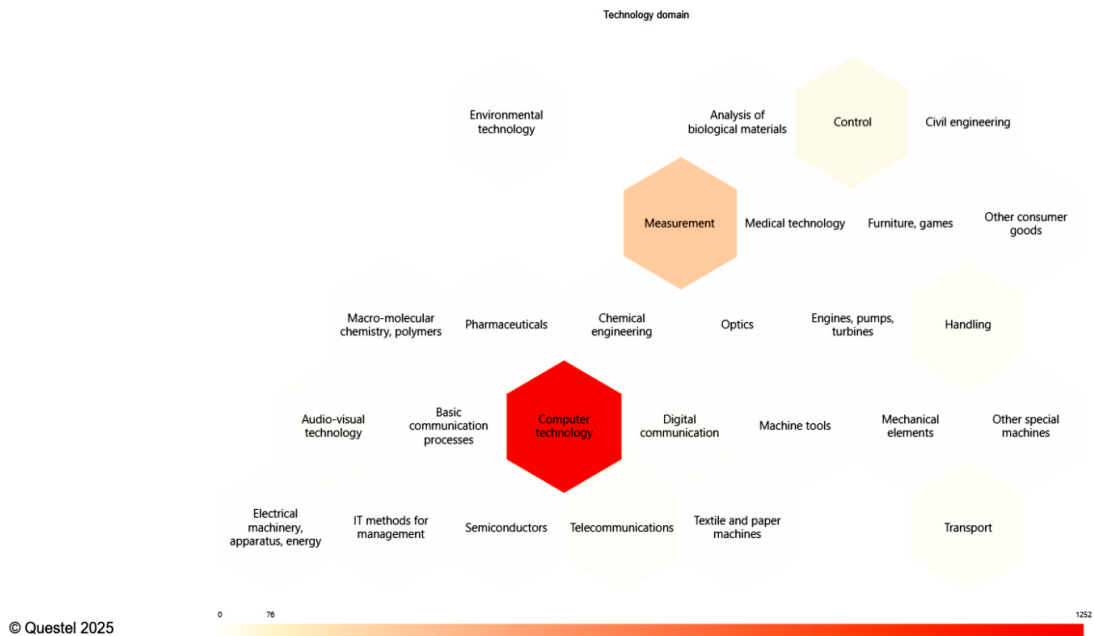


Рис. 4. Розподіл патентних сімейств у сфері Visual SLAM за технологічними галузями (Technology domain)

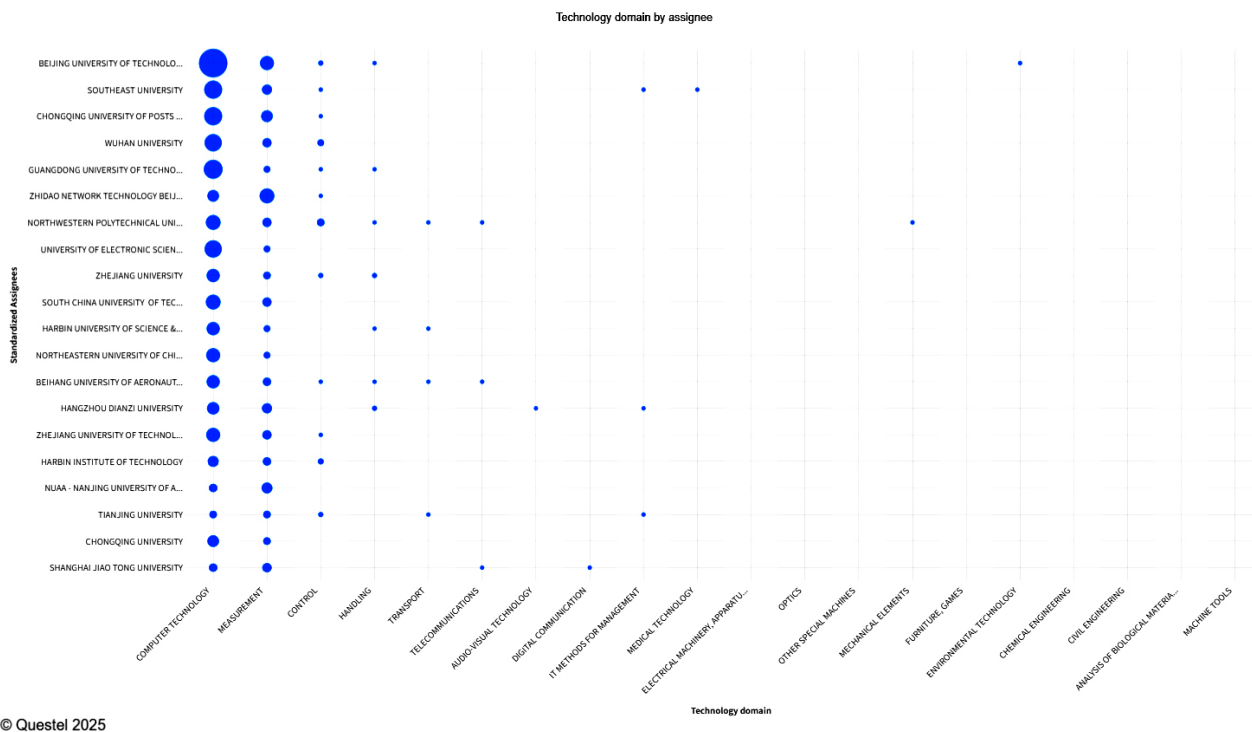


Рис. 5. Співвідношення технологічних галузей і заявників у патентному ландшафті Visual SLAM (Technology domain by assignee)

алгоритмів та управління пам'яттю; G06V — розпізнавання образів, аналіз візуальних сцен, виділення ознак; G01S — системи позиціонування, навігації та визначення координат; G05D — керування рухом і навігаційні алгоритми.

Переважання зазначених класів підтверджує, що патентні претензії у сфері Visual SLAM зосереджені не на фізичних пристроях, а на математичних, алгоритмічних і програмних рішеннях, які реалізують процеси локалізації та картографування. Це узгоджується з кластерною візуалізацією на **рис. 6**, де найбільші сегменти припадають саме на комп'ютерно-алгоритмічні домени.

Структура ядра патентних претензій. Змістовний аналіз патентних формул у межах домінуючих IPC/CPC-класів дає змогу виокремити декілька типових груп технічних ознак, що формують ядро патентних претензій у сфері Visual SLAM.

Методи оброблення візуальних даних. Патентні претензії охоплюють способи виділення, зіставлення та оптимізації візуальних ознак (feature extraction, feature matching), оброблення багатоканальних потоків, а також інтеграцію візуальних та інерціальних даних. Ці рішення становлять основу більшості алгоритмічних підходів до Visual SLAM.

Алгоритми локалізації та побудови карт. Патентуються способи одночасного оцінювання положення камери та оновлення карти середовища, методи оптимізації графів спостережень, фільтраційні та байєсівські підходи. Такі претензії формують центральний масив алгоритмічної охорони в межах класів G06T і G06F.

Підвищення стійкості та точності SLAM-систем. Значна частина патентних документів спрямована на забезпечення працездатності систем у складних умовах: наявність динамічних об'єктів, змін освітлення, часткових втрат візуальної інформації або сенсорних завад.

Семантична інтерпретація сцен. Окрему групу формують патенти, що поєднують Visual SLAM із семантичним аналізом зображень, класифікацією об'єктів та контекстною інтерпретацією простору. Це відображає тенденцію переходу від геометричної локалізації до когнітивних моделей сприйняття середовища.

Обчислювальна оптимізація. Патентні претензії також охоплюють зменшення обчислювальної складності, паралельного оброблення, адаптивне використання ресурсів і реалізацію SLAM у реальному часі, що є критичним для автономних систем з обмеженими апаратними можливостями.

Узагальнення результатів аналізу IPC/CPC. Таким чином, аналіз IPC/CPC-кластерів (**рис. 6**)

свідчить, що патентне ядро Visual SLAM має чітко виражений алгоритмічний і програмний характер, характеризується високим рівнем фрагментації та значним перекриттям технічних рішень у суміжних класах. Це створює складне правове середовище, у якому одна і та сама реалізація може потенційно підпадати під дію декількох патентних претензій, сформульованих у різних класифікаційних доменах.

Отримані результати підтверджують, що ключова проблема патентування Visual SLAM полягає не в дефіциті правової охорони, а в нечіткості меж патентоздатності алгоритмічних рішень, що має принципове значення для подальшої комерціалізації та інженерної інтеграції цих технологій в автономні платформи, зокрема у БПЛА.

Концептуальна структура патентних претензій у сфері Visual SLAM. Для поглибленого аналізу змісту патентних претензій у сфері Visual SLAM доцільно перейти від формальної класифікації IPC/CPC до концептуального аналізу, що відображає ключові технічні поняття, що використовуються заявниками у формулюваннях винаходів. Такий підхід дає змогу ідентифікувати не лише технологічні напрями, а й реальні об'єкти патентування, навколо яких формується правова охорона.

На **рис. 7** представлено теплову карту розподілу концептів за головними заявниками (Concepts by assignee), що відображає інтенсивність використання певних технічних понять у патентних портфелях провідних університетів і науково-дослідних установ.

Домінуючі концепти патентування. Аналіз теплової карти свідчить, що незалежно від конкретного заявника, ядро патентних претензій формується навколо обмеженого кола повторюваних концептів, зокрема:

- *Camera / image / visual data* — базові поняття, пов'язані з отриманням та обробленням візуальної інформації;
- *Feature extraction / feature matching* — виділення та зіставлення ознак як ключовий етап SLAM-алгоритмів;
- *Pose estimation / localization* — оцінювання положення камери або платформи в просторі;
- *Mapping / environment model* — побудова та оновлення карти середовища;
- *Optimization / graph / filtering* — алгоритмічні методи оптимізації та оброблення спостережень;
- *Sensor fusion / inertial data* — інтеграція візуальних та інерціальних джерел даних.

Інтенсивність забарвлення клітин на **рис. 7** демонструє, що зазначені концепти присутні практично в усіх великих патентних портфелях,

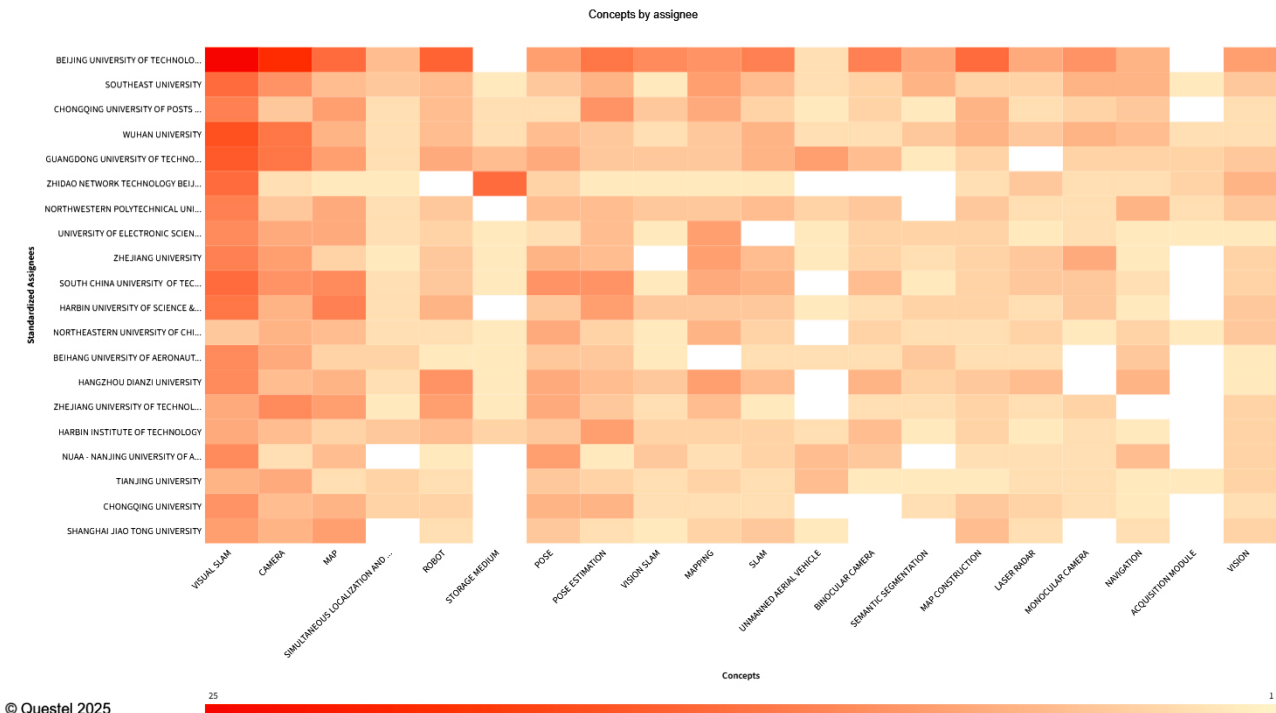


Рис. 7. Розподіл ключових концептів патентних претензій Visual SLAM за заявниками

що свідчить про високий ступінь концептуального перекриття між заявниками.

Концептуальна уніфікація патентних портфелів. Важливою особливістю є відсутність чіткої концептуальної спеціалізації окремих заявників. Навіть провідні університети з найбільшою кількістю патентних сімейств використовують практично однаковий набір базових концептів, що підтверджує алгоритмічну природу патентування у сфері Visual SLAM.

Така уніфікація означає, що більшість патентів не охоплюють унікальні фізичні чи апаратні рішення, а зосереджуються на варіаціях відомих алгоритмічних підходів — зміні порядку обчислень, способів оптимізації, комбінуванні джерел даних або підвищенні стійкості алгоритмів.

Формування ядра патентних претензій.

На основі концептуального аналізу можна виділити ядро патентних претензій Visual SLAM, що складається з таких груп:

- **алгоритмічні способи оброблення візуальних даних:** претензії охоплюють математичні та програмні процедури перетворення зображень у просторові представлення;
- **методи одночасної локалізації та картографування:** формулюються як способи, системи або комп'ютерні програми, що реалізують SLAM-процес;
- **оптимізаційні та фільтраційні підходи:** охорона поширюється на методи підвищення точності, швидкодії та стабільності;

- **інтеграція сенсорних потоків:** значна частина претензій стосується поєднання візуальних, інерціальних та інших даних.

Таким чином, концептуальна структура патентного ландшафту Visual SLAM характеризується **високим ступенем повторюваності технічних понять**, що суттєво ускладнює чітке розмежування правової охорони між окремими патентами.

Узагальнення результатів концептуального аналізу. Отримані результати дають змогу дійти висновку, що патентування Visual SLAM відбувається переважно шляхом **накладання правової охорони на алгоритмічні варіації базових концептів**, а не на принципово нові технічні рішення. Це формує щільне патентне середовище з високим ризиком перехресного перекриття претензій, що має критичне значення для інженерної реалізації та комерціалізації SLAM-рішень.

Зазначена особливість підтверджує наявність системної проблеми патентування Visual SLAM, пов'язаної з обмеженою відмежованістю алгоритмічних рішень, що вимагає особливо ретельного аналізу патентної чистоти під час впровадження таких технологій в автономні системи та безпілотні платформи.

Динаміка патентної активності та міжінституційна кооперація у сфері Visual SLAM. Важливим елементом аналізу патентного ландшафту є дослідження часової динаміки подання

патентних заявок і характеру взаємодії між ключовими заявниками. Такі показники дають змогу оцінити стадію розвитку технологій Visual SLAM, рівень зрілості науково-технічних рішень, а також інтенсивність трансферу знань між науковими центрами.

Динаміка патентування за роками. На **рис. 8** наведено розподіл патентних сімейств у сфері Visual SLAM за роками подання заявок із деталізацією за головними заявниками.

Аналіз часової структури патентування свідчить про поступове зростання винахідницької активності, починаючи з середини 2010-х рр., із найбільш інтенсивною фазою в період 2018–2023 років. Для більшості провідних університетів спостерігається стабільне накопичення патентних сімейств без різких пікових коливань.

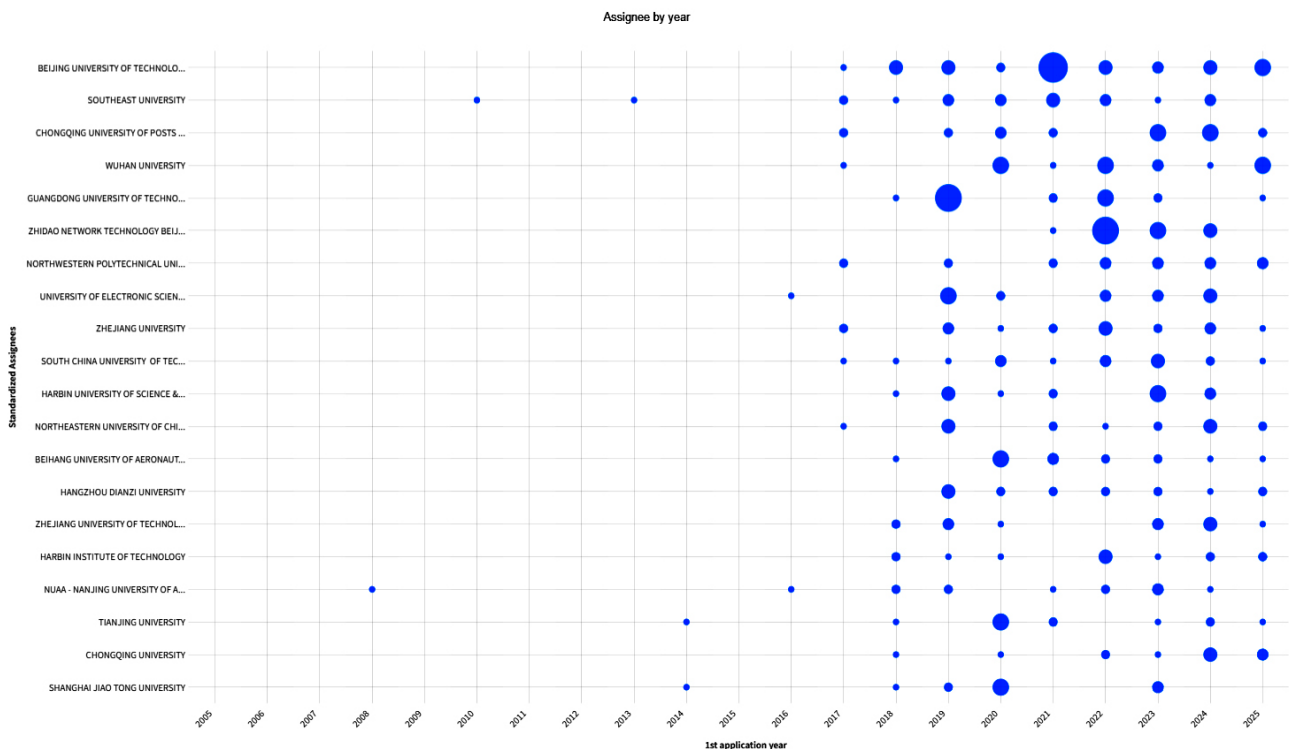
Така динаміка характерна для технологій, що перебувають на стадії інтенсивного науково-алгоритмічного розвитку, але ще не досягли етапу масової промислової стандартизації. Патентування винаходів у цьому випадку виконує функцію фіксації методів локалізації, картографування та оптимізації обчислень, а не агресивного ринкового захоплення.

Міжінституційна кооперація заявників. Структуру коопераційних зв'язків між заявниками відображено на **рис. 9**, де представле-

но мережу спільних патентних заявок у сфері Visual SLAM.

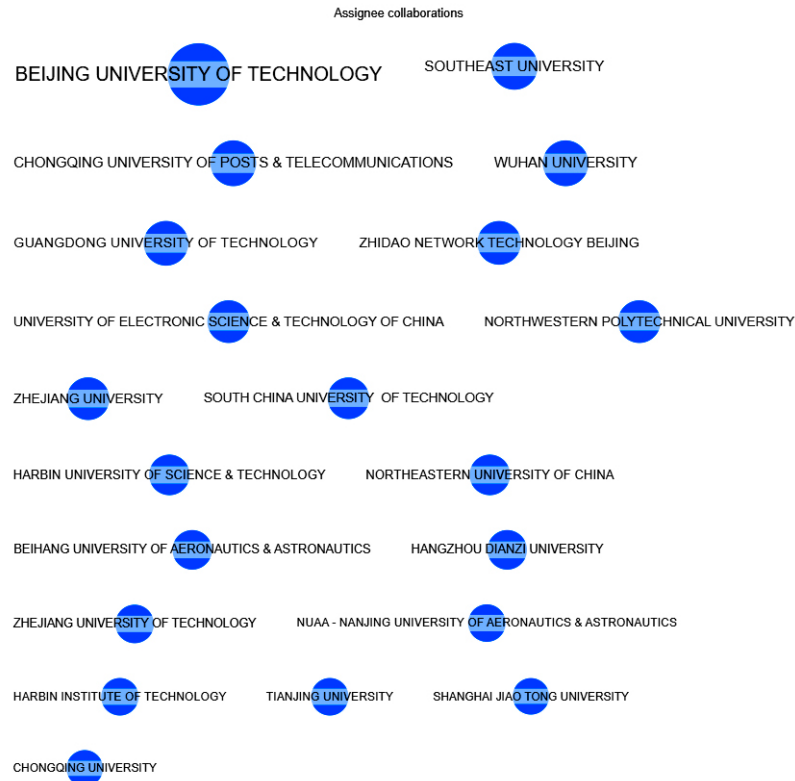
Граф кооперації демонструє, що ключові вузли мережі формуються навколо провідних технічних університетів, зокрема Beijing University of Technology, Southeast University, Wuhan University, South China University of Technology, Northwestern Polytechnical University та інших академічних установ. Кооперація має переважно міжуніверситетський і науководослідний характер, що свідчить про об'єднання компетенцій у галузях комп'ютерного зору, навігації та оброблення візуальних даних. Участь промислових корпорацій у спільному патентуванні винаходів є обмеженою, що підтверджує домінування дослідницької логіки розвитку технології над комерційною.

Аналіз часової динаміки та міжінституційної кооперації дає змогу дійти висновку, що патентний ландшафт Visual SLAM характеризується зростаючою, але ще не піковою патентною активністю, високим рівнем академічної взаємодії та відсутністю домінантних промислових гравців. Це підтверджує перебування технологій Visual SLAM у фазі технологічного становлення, де патентування використовується насамперед як інструмент закріплення алгоритмічних і методичних рішень, створюючи передумови для по-



© Questel 2025

Рис. 8. Динаміка подання патентних заявок за роками основними заявниками у сфері Visual SLAM



© Questel 2025

Рис. 9. Мережа коопераційних зв'язків між заявниками (спільні патентні сімейства) у сфері Visual SLAM

дальшої інженерної інтеграції та комерційного використання.

ВИСНОВКИ

Системне дослідження патентного ландшафту технологій Visual SLAM дало змогу не лише структурно описати сучасний стан патентування, а й сформулювати практично значущі висновки для розробників автономних систем, інженерів, патентних фахівців та інтеграторів технологій. Патентування у сфері Visual SLAM зосереджене переважно в академічному та науково-дослідному середовищі та має виразно алгоритмічний характер. Домінування університетів і дослідницьких інститутів серед провідних заявників, а також відсутність великих промислових чи оборонних корпорацій серед лідерів патентної активності свідчать, що більшість патентів спрямовані на захист загальних методів оброблення візуальних даних, локалізації та картографування, а не на завершені інженерні системи або платформи-орієнтовані рішення.

Це має безпосереднє прикладне значення: патентні ризики у сфері Visual SLAM концентруються насамперед на рівні алгоритмів, методів

і математичних моделей, тоді як інтеграція таких рішень у конкретні платформи (БпЛА, мобільні робототехнічні комплекси чи автономні транспортні системи) залишається відносно відкритою для інженерних реалізацій. Відповідно, практичне розроблення прикладних SLAM-систем є можливим за умови уникнення прямого відтворення алгоритмічних формулювань, що вже перебувають під патентною охороною, а також застосування альтернативних архітектурних або обчислювальних підходів.

Аналіз класифікацій IPC/CPC дав змогу чітко ідентифікувати ядро патентних претензій, сформоване в межах класів G06 (обчислювальна техніка, комп'ютерний зір), G01S (позиціонування та навігація) та G05D (керування рухом). Це надає можливість використовувати результати дослідження як інструмент попередньої патентної навігації під час проектування нових рішень у сфері автономної навігації та робототехніки, а також для оцінювання freedom-to-operate на ранніх етапах R&D. **Freedom to Operate (FTO, свобода діяльності)** — це правова та економічна можливість компанії або іншого суб'єкта господарювання здійснювати комерційне використання

продукту, процесу чи послуги (виробництво, застосування, пропонування до продажу, продаж або розповсюдження) без порушення чинних прав інтелектуальної власності третіх осіб, насамперед патентних прав. **Аналіз ФТО є критично важливим етапом перед виходом технології на ринок**, оскільки він дає змогу ідентифікувати потенційні патентні обмеження, оцінити ризики судових спорів і фінансових втрат, а також визначити можливі шляхи мінімізації правових ризиків (модифікація технічного рішення, ліцензування, обхід патентів). У високотехнологічних і динамічних галузях, зокрема у сфері автономних систем і безпілотних платформ, ФТО-аналіз набуває особливого значення через фрагментованість патентного ландшафту та високу концентрацію прав на базові технологічні рішення.

Додатково встановлено, що значна частина патентів характеризується високим рівнем концептуальної схожості та повторюваності технічних ознак. Це свідчить про формування щільного патентного середовища, у межах якого нові патентні заявки повинні орієнтуватися не на загальні принципи Visual SLAM, а на специфічні архітектурні, обчислювальні чи прикладні аспекти реалізації. Отримані результати можуть бути використані для підвищення якості патентних стратегій, зменшення ризиків відмови в патентуванні та оптимізації формул патентних претензій.

Проведене дослідження доводить, що ключова проблема патентування Visual SLAM полягає не в дефіциті правової охорони, а в домінуванні універсальних алгоритмічних патентів, які ускладнюють комерційне використання технології без спеціалізованого патентного аналізу. Водночас така структура ландшафту створює сприятливі умови для інженерної інтеграції Visual SLAM у прикладні автономні системи за умови коректного управління ІВ.

Використання результатів патентного ландшафту Visual SLAM для формування національної стратегії розвитку автономних систем в Україні. Повномасштабна війна істотно трансформувала роль БПЛА та автономних роботизованих систем у структурі оборонних технологій України. З допоміжного засобу спостереження дрони перетворилися на ключовий елемент тактичної, оперативної та стратегічної переваги, що зумовлює зростання вимог до їхньої автономності, стійкості та адаптивності в умовах радіоелектронної боротьби, деградації GNSS-сигналів і динамічних середовищ бойових дій. У цьому контексті технології Visual SLAM і суміжні методи візуально-інерціальної навігації набувають критичного значення для забезпе-

чення функціональної незалежності автономних платформ.

Проведений патентний ландшафтний аналіз дає змогу розглядати Visual SLAM не лише як технічну задачу алгоритмічної навігації, а як стратегічний об'єкт інноваційної та інтелектуально-правової політики. Отримані результати створюють підґрунтя для переходу від фрагментарних інженерних рішень до системного формування національної стратегії розвитку автономних навігаційних технологій з урахуванням патентних ризиків, потенціалу комерціалізації та довгострокового технологічного суверенітету.

Архітектурна специфіка Visual SLAM як чинник стратегічного планування. Аналіз структури патентного ландшафту показує, що ключове ядро патентних претензій у сфері Visual SLAM зосереджене не на апаратних платформах, а на алгоритмічних і програмних рішеннях, формалізованих у межах класів IPC/CPC G06T, G06V, G06F, G01S та G05D. Це означає, що ризики порушення прав ІВ виникають не на рівні фізичної конструкції безпілотного апарата, а на рівні реалізації методів локалізації, оброблення зображень, оптимізації графів спостережень, семантичної інтерпретації сцен та адаптивного керування рухом.

Для України це має принципове значення, оскільки дає змогу вибудовувати стратегію розвитку автономних систем не шляхом копіювання іноземних рішень, а через створення власних інженерних реалізацій, адаптованих до специфічних умов бойового застосування. Патентний ландшафт у цьому випадку виступає інструментом ідентифікації як зон підвищеного правового ризику, так і "вікон можливостей" для розроблення нових технічних підходів, що не перетинаються з домінуючими патентними формулами.

Значення фрагментованості патентного поля для України. Характерною рисою дослідженого ландшафту є відсутність монополістичної концентрації патентних прав у сфері Visual SLAM. Провідними заявниками виступають переважно університети та науково-дослідні установи, а не глобальні оборонні чи аерокосмічні корпорації. Така структура патентного поля свідчить про перебування технології на стадії активного науково-алгоритмічного формування, а не завершеної індустріалізації.

Для України це створює сприятливі умови входження в технологічну нішу без необхідності подолання жорстких патентних бар'єрів із боку транснаціональних гравців. Водночас фрагментованість портфеля потребує високої культури управління ІВ, оскільки ризики патентних

конфліктів виникають не через один домінуючий патент, а через сукупність вузьких алгоритмічних претензій, розподілених між багатьма заявниками.

Патентний ландшафт як інструмент державної інноваційної політики. Отримані результати можуть бути безпосередньо використані для формування державної політики у сфері розвитку автономних систем і БПЛА. Зокрема, патентний ландшафт дає змогу: визначити пріоритетні напрями досліджень і розробок із найменшим рівнем патентної насиченості та високою прикладною цінністю для оборонних і подвійних технологій; інтегрувати аналіз freedom-to-operate в державні програми фінансування автономної навігації; формувати вимоги до результатів R&D-проектів з урахуванням патентної охороноздатності або можливостей defensive publication; зменшувати залежність від закордонних навігаційних технологій шляхом цілеспрямованого розвитку власних алгоритмічних рішень. Особливо важливим є використання патентного ландшафту на етапі переходу від прототипів до серійного виробництва, коли ризику порушення прав ІВ можуть істотно обмежувати експортний потенціал українських розробок у післявоєнний період.

Роль патентного аналізу у післявоєнній комерціалізації технологій. Індустрія БПЛА, що стрімко розвинулася в умовах війни, неминує буде трансформуватися в цивільні технології та подвійного застосування: логістику, інфраструктурний моніторинг, агротехнології, безпілотний транспорт. У цьому контексті патентний ландшафт Visual SLAM стає критично важливим інструментом для вибору юрисдикцій патентування, формування експортних стратегій і залучення міжнародних партнерів.

Результати дослідження свідчать, що Україна має потенціал перейти від ролі користувача автономних навігаційних технологій до ролі їх розробника та постачальника. Для цього необхідно поєднати інженерну експертизу, здобуту в бойових умовах, із системним управлінням ІВ, зорієнтованим на глобальні ринки.

Узагальнення стратегічних імплікацій. Таким чином, проведений патентний ландшафтний аналіз Visual SLAM має не лише науково-аналітичне, а й виразне прикладне та стратегічне значення для України. Він формує підґрунтя для: розроблення національної стратегії розвитку автономних навігаційних технологій; зниження патентних ризиків у сфері військових і цивільних БПЛА; підвищення інноваційної спроможності українських розробників; забезпечення технологічного суверенітету в критично важливій галузі автономних систем.

У цьому контексті патентний ландшафт Visual SLAM варто розглядати не як оглядовий інструмент, а як елемент стратегічного управління інноваціями, здатний безпосередньо впливати на оборонну, інноваційну та експортну політику держави.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Саркіз О. Економіка дронів. Яке місце посідає український ОПК на світовому ринку безпілотних систем [Електронний ресурс] / О. Саркіз // Сайт Дзеркало тижня. — 19 листопада, 2025. — Режим доступу: <https://surl.li/olzbxr>.
2. Андрощук Г. О. Інтелектуальна власність в оборонній промисловості: стан, тенденції, проблеми та шляхи вирішення / Г. О. Андрощук // Часопис Київського університету права. — 2025. — № 2. — С. 113–122. DOI: <https://doi.org/10.36695/2219-5521.2.2025.17>.
3. Gao X. Introduction to Visual SLAM: From Theory to Practice / X. Gao, T. Zhang. — Cham : Springer, 2021. — 376 p.
4. Андрощук Г. О. Патентний ландшафт — стратегічний інструмент інноваційного розвитку (на прикладі 3D-друку) / Г. О. Андрощук // Наука та наукознавство. — 2017. — № 2. — С. 52–68. — DOI: <https://doi.org/10.15407/sofs2017.02.052>
5. Андрощук Г. О. Патентний ландшафт у системі економічного аналізу: методика проведення / Г. О. Андрощук // Інтелектуальна власність в Україні. — 2018. — № 11. — С. 20–24.
6. Андрощук Г. О. Патентний ландшафт як інструмент прогнозування світових технологічних трендів: сфера озброєння та військової техніки / Г. О. Андрощук, Т. К. Кваша // Наука, технології, інновації. — 2019. — № 4 (12). — С. 28–40. DOI: <https://doi.org/10.35668/2520-6524-2019-4-04>
7. Андрощук Г. О. Патентний ландшафт як інструмент прогнозування світових технологічних трендів: транспортна система, ракетно-космічна галузь, авіа- і суднобудування / Г. О. Андрощук, Т. К. Кваша, О. В. Коваленко // Наука, технології, інновації. — 2020. — № 3. — С. 10–24. DOI: <http://doi.org/10.35668/2520-6524-2020-3-02>.
8. Андрощук Г. О. Патентний ландшафт як інструмент аналітики інтелектуальної власності (на прикладі аналізу сфери військових технологій) [Електронний ресурс] / Г. О. Андрощук, Т. К. Кваша // Питання інтелектуальної власності. — 2021. — Вип. 18. — С. 94–105. — Режим доступу: http://www.ndiiv.org.ua/Files2/vydannia_2021/Zbornik_18.pdf#page=94.
9. Бутнік-Сіверський О. Б. Методологічні засади патентного ландшафту в системі інтелектуальної національної безпеки / О. Б. Бутнік-Сіверський, Г. О. Андрощук // Теорія і практика інтелектуальної власності. — 2021. — № 4. — С. 71–85. DOI: <https://doi.org/10.33731/42021.243178>.
10. Андрощук Г. О. Патентний ландшафт у галузі штучного інтелекту: аналіз звіту патентного відомства США [Електронний ресурс] / Г. О. Андрощук // Сучасні проблеми права та інноваційної економіки. — 2021. — № 3. — С. 5–12. — Режим доступу: https://ndipzir.org.ua/wp-content/uploads/2021/Conf_26.03.2021/Conf_26.03.21.pdf.
11. Андрощук Г. О. Глобальний ландшафт патентовласників 2021 року / Геннадій Андрощук // Інтелектуальна власність в Україні. — 2022. — № 1. — С. 4–9.

12. Андрощук Г. О. Глобальний ландшафт інтелектуальної власності і нематеріальні активи: зростання впливу / Г. О. Андрощук // Наука та наукознавство. — 2025. — № 3 (35). — С. 3–23. — DOI: <https://doi.org/10.15407/sofs2025.03.003>.
13. Андрощук Г. О. Винахідницька активність у Китаї: інноваційний ландшафт і динаміка законодавчих змін / Г. О. Андрощук // Наука, технології, інновації. — 2025. — № 2 (34). — С. 49–60. DOI: <https://doi.org/10.35668/2520-6524-2025-2-06>.

REFERENCES

1. Sarkits, O. (2025). *Ekonomika droniv. Yake mistse posidaie ukrainskyi OPK na svitovomu rynku bezpilotnykh system* [The Economy of Drones. What is the Place of the Ukrainian Defense Industry in the Global Unmanned Systems Market?]. *Sait Dzerkalo tyzhnia*. Retrieved from: <https://surl.li/olzbxr> [in Ukr].
2. Androshchuk, H. O. (2025). *Intelektualna vlasnist v oboronni promyslovosti: stan, tendentsii, problemy ta shliakhy vyrishennia* [Intellectual property in the defense industry: status, trends, problems and solutions]. *Chasopys Kyivskoho universytetu prava* [Law Review of Kyiv University of Law], 2, 113-122. DOI: <https://doi.org/10.36695/2219-5521.2.2025.17> [in Ukr].
3. Gao, X., & Zhang, T. (2021). *Introduction to Visual SLAM: From Theory to Practice*. Cham, 376 p.
4. Androshchuk, H. O. (2017). *Patentnyi landshaft — stratehichni instrument innovatsiinoho rozvytku (na prykladi 3D-druku)* [Patent landscape — a strategic tool for innovative development (using the example of 3D printing)]. *Nauka ta naukoznavstvo* [Science and scientific studies], 2, 52-68. DOI: <https://doi.org/10.15407/sofs2017.02.052> [in Ukr].
5. Androshchuk H. O. (2018). *Patentnyi landshaft u systemi ekonomichnoho analizu: metodyka provedennia* [Patent landscape in the system of economic analysis: methodology]. *Intelektualna vlasnist v Ukraini* [Intellectual property in Ukraine], 11, 20-24. [in Ukr].
6. Androshchuk, H. O., & Kvasha, T. K. (2019). *Patentnyi landshaft yak instrument prohnouzuvannia svitovykh tekhnolohichnykh trendiv: sfera ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki* [Patent landscape as a tool for forecasting global technological trends: the sphere of armaments and military equipment]. *Nauka, tekhnolohii, innovatsii* [Science, technology, innovation], 4 (12), 28-40. DOI: <https://doi.org/10.35668/2520-6524-2019-4-04> [in Ukr].
7. Androshchuk, H. O., Kvasha, T. K., & Kovalenko, O. V. (2020). *Patentnyi landshaft yak instrument prohnouzuvannia svitovykh tekhnolohichnykh trendiv: transportna systema, raketno-kosmichna haluz, avia- i sudnobuduvannia* [Patent landscape as a tool for forecasting global technological trends: transportation system, rocket and space industry, aircraft and shipbuilding]. *Nauka, tekhnolohii, innovatsii* [Science, technology, innovation], 3, 10-24. DOI: <http://doi.org/10.35668/2520-6524-2020-3-02> [in Ukr].
8. Androshchuk, H. O., & Kvasha, T. K. (2021). *Patentnyi landshaft yak instrument analityky intelektualnoi vlasnosti (na prykladi analizu sfery viiskovykh tekhnolohii)* [Patent landscape as a tool for intellectual property analytics (using the example of analyzing the military technology sector)]. *Pytannia intelektualnoi vlasnosti* [Intellectual property issues], 18, 94-105. Retrieved from: http://www.ndiiv.org.ua/Files2/vydannia_2021/Zbornik_18.pdf#page=94 [in Ukr].
9. Butnik-Siverskyi, O. B., & Androshchuk, H. O. (2021). *Metodolohichni zasady patentnoho landshaftu v systemi intelektualnoi natsionalnoi bezpeky* [Methodological principles of the patent landscape in the system of intellectual national security]. *Teoriia i praktyka intelektualnoi vlasnosti* [Theory and practice of intellectual property], 4, 71-85. DOI: <https://doi.org/10.33731/42021.243178> [in Ukr].
10. Androshchuk, H. O. (2021). *Patentnyi landshaft u haluzi shtuchnoho intelektu: analiz zvituvannia vidomstva SShA* [Patent Landscape in Artificial Intelligence: Analysis of the US Patent Office Report]. *Suchasni problemy prava ta innovatsiinoy ekonomiky* [Modern problems of law and innovation economics], 3, 5-12. Retrieved from: https://ndipzir.org.ua/wp-content/uploads/2021/Conf_26.03.2021/Conf_26.03.21.pdf [in Ukr].
11. Androshchuk, H. O. (2022). *Hlobalnyi landshaft patentovlasnykiv 2021 roku* [Global patent owner landscape 2021]. *Intelektualna vlasnist v Ukraini* [Intellectual property in Ukraine], 1, 4-9. [in Ukr].
12. Androshchuk, H. O. (2025). *Hlobalnyi landshaft intelektualnoi vlasnosti i nematerialni aktyvy: zrostannia vplyvu* [The Global Landscape of Intellectual Property and Intangible Assets: Growing Influence]. *Nauka ta naukoznavstvo* [Science and scientific studies], 3 (35), 3-23. DOI: <https://doi.org/10.15407/sofs2025.03.003> [in Ukr].
13. Androshchuk, H. O. (2025). *Vynakhidnytska aktyvnist u Kytai: innovatsiyni landshaft i dynamika zakonodavchykh zmin* [Inventive activity in China: the innovation landscape and the dynamics of legislative changes]. *Nauka, tekhnolohii, innovatsii* [Science, technology, innovation], 2 (34), 49-60. DOI: <https://doi.org/10.35668/2520-6524-2025-2-06> [in Ukr].

H. O. ANDROSHCHUK, PhD in Economics, Associate Professor

V. S. KHVOSTENKO, PhD in Economics, Associate Professor

PATENT LANDSCAPE OF VISUAL SLAM TECHNOLOGIES: STRATEGIC IMPLICATIONS FOR AUTONOMOUS SYSTEMS

Abstract. *The article presents a comprehensive study of the patent landscape of Visual SLAM technologies, which are a key tool for spatial navigation and autonomous orientation of modern robotic and unmanned aerial vehicles (UAVs). The methodological basis of the work is a patent landscape analysis using the international patent analytical platform Orbit Intelligence. The study covers the analysis of patent families by applicants, jurisdictions of protection, time dynamics, technological fields and IPC/CPC classification codes. Special attention is paid to the identification of the core of patent claims and conceptual areas of patenting. The results of the study showed that Visual SLAM patenting is predominantly algorithmic in nature and is characterized by the dominance of academic*

and research institutions among applicants and by the absence of pronounced monopolization by large industrial corporations. The patent landscape is fragmented, and key patent claims are concentrated within classes G06, G01S and G05D. A high level of conceptual repetition of patent solutions has been established, which complicates the commercialization of technologies without specialized analysis. It is shown that, with proper IP management, Visual SLAM creates a window of opportunity for engineering integration into UAVs, autonomous transport and robotic systems. In the context of Ukraine, the results of the study can be used to form a national strategy for the development of autonomous navigation technologies, defense R&D programs and IP policy in the field of dual-use technologies.

Keywords: intellectual property, Visual SLAM technologies, patent landscape, patent families, dual-use technologies, autonomous systems, unmanned aerial vehicles (UAVs).

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

Андрощук Геннадій Олександрович — канд. екон. наук, доц., голов. н. с., Науково-дослідний інститут інтелектуальної власності Національної академії правових наук України, вул. Казимира Малевича, 11, корп. 4, м. Київ, Україна, 03680; +38 (044) 200-08-76; genandro1@gmail.com; ORCID: 0000-0003-0781-9740

Хвостенко Владислав Сергійович — канд. екон. наук, доцент, патентний повірений, доцент кафедри кібербезпеки, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61000, +38 (068) 214-14-68; vladyslav.khvostenko@gmail.com; ORCID 0000-0002-6436-4159

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Androshchuk H. O. — PhD in Economics, Associate Professor, Chief Researcher, Scientific Research Institute of Intellectual Property of the National Academy of Legal Sciences of Ukraine, 11, K. Malevych Str., building 4, Kyiv, Ukraine, 03680; genandro1@gmail.com; +38 (044) 200-08-76; ORCID: 0000-0003-0781-9740

Khvostenko V. S. — PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Cybersecurity, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, 2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61000, Ukraine; +38 (068) 214-14-68; vladyslav.khvostenko@gmail.com; Patent Attorney; ORCID: 0000-0002-6436-4159

Надійшла до редакції 08.01.2026

Прийнята до друку 10.02.2026



ДО УВАГИ АВТОРІВ:

До друку приймаються статті українською та англійською мовами.

Відповідальність за достовірність поданих даних несуть автори матеріалів.

Редакція може не поділяти думки авторів, викладені у статтях.

У разі передруку матеріалів — посилання на журнал “Наука, технології, інновації” обов’язкове.

Адреса редакції: вул. Антоновича, 180, м. Київ, Україна, 03150.

Контакти редакції: тел.: +38 (044) 521-00-39.

e-mail: journal@uintei.kiev.ua

Умови для публікації викладено на сайті: <http://nti.ukrintei.ua>.

З питань придбання та розміщення реклами: тел. +38 (044) 521-00-39.

e-mail: uintei.ua@gmail.com або sale@uintei.kiev.ua

Y. V. IVOKHIN, D. Sc. in Physics and Mathematics, Professor

G. V. SHELYAKIN, Postgraduate Student

RECOMMENDER MODEL FOR DATA PREDICTION BASED ON FUZZY LOGIC AND THE COLLABORATIVE FILTERING METHOD

Abstract. *The article proposes a model for data in recommendation in recommender systems, which is based on the implementation of fuzzy logic in the collaborative filtering method to improve the quality of personalized recommendations. Particular attention is paid to the problems of data sparsity, uncertainty of user ratings, and the subjectivity of interpretation of criteria, which traditionally complicates the work of classical recommendation algorithms. The study substantiates the feasibility of using personalized triangular membership functions, which allow for the reflecting on the personal preferences and evaluation characteristics of each user. A formalized procedure for constructing and dynamically updating the parameters of such functions for all evaluation criteria is proposed.*

The Mamdani method was used to calculate the degree of similarity between users, which takes into account the fuzziness of ratings and allows logical conclusions to be drawn based on a system of rules. This approach makes it possible to determine the level (degree) of similarity between users, taking into account multidimensional criteria and their qualitative interpretation. In addition, the procedure for defuzzifying the obtained fuzzy similarity values and integrating them into the rating prediction process was demonstrated.

To evaluate the effectiveness of the developed model, a model experiment was conducted on an artificially generated dataset with a controlled structure and a given level of sparsity. Metrics based on mean square error (MSE), root mean square error (RMSE), and sum of squares error (SSE) were used to compare the proposed approach with the results of basic collaborative filtering. The results demonstrate the potential of the modified model to reduce prediction error in conditions of incomplete and fuzzy data, as well as to improve the adaptability of recommendations by taking into account individual evaluation models. The proposed approach can be used as a basis for building more robust, flexible, and interpretable next-generation recommendation systems.

Keywords: *fuzzy logic, Mamdani method, collaborative filtering, data sparsity, uncertainty, fuzzy numbers.*

INTRODUCTION

Recommendation generation in modern recommender systems is based on various approaches, each of which involves the analysis of large volumes of information. Traditional methods are typically focused on precise numerical values, which does not always reflect real-world conditions, where user ratings and item properties are often vague, partially defined, or incomplete. To make well-founded decisions under such conditions, it is advisable to apply approaches based on fuzzy logic.

The introduction of fuzzy logic into recommendation systems makes it possible to formally process uncertainty and inaccuracy in both the input data and the inference rules, to build logically consistent conclusions, and to organize and structure the relationships between factors and recommendations, taking into account the limitations and specifics of the available information. In particular, the use of fuzzy models makes it possible to assess the degree of similarity between users based on fuzzy criteria of their preferences or behavior patterns rather than on rigid ones.

PROBLEM STATEMENT

The traditional task of forming recommendation ratings in any problem area involves the presence of objects to be evaluated and subjects performing such evaluation. Let us consider the procedure for forming a predictive user rating for a given object based on its history of interactions with other objects, as well as historical ratings from other users. For this purpose, a collaborative filtering methodology modified through the incorporation of fuzzy logic methods is employed.

We will assume that each object to be evaluated is characterized by a set of parameters that can be grouped as follows:

1) ratings — numerical values within a predefined range (e.g., 1–5 or 0–1) assigned by users. The interpretation of these ratings is subjective: the same numerical value may have different meanings for different users;

2) criterion-related information — information about specific evaluation criteria of an item (such as the genre of a movie or book, or the type of product) that influence users' perception of the item;

3) individual user characteristics — personal differences in evaluation behavior and preferences, which may vary depending on the evaluation criterion.

Under these conditions, the task is to develop an approach that enables:

- a more accurate approximation of user ratings compared to classical collaborative filtering methods;
- the incorporation of individualized membership functions for different users and evaluation criteria, allowing the system to adapt to subjective preferences;
- the application of fuzzy logic algorithms and methods to assess the degree of similarity between users, which helps reduce data uncertainty and provides a more flexible representation of their preferences.

ANALYSIS OF RECENT RESEARCH

Systems based on fuzzy logical inference are widely used in control systems, knowledge representation, decision support, structural and parametric identification, pattern recognition, and optimization. Fuzzy logic has found broad application in consumer electronics, diagnostics, and various expert systems. In particular, fuzzy expert decision support systems are actively implemented in the military sector, medicine, and economics. They are used for business forecasting, risk assessment, and evaluating the profitability of investment projects. Fuzzy logic tools are also applied to the analysis of global political decisions and the modeling of crisis situations.

Thus, the problem of developing decision support systems using fuzzy logic has been analyzed in a number of scientific works [1–8]. Studies devoted to the development and improvement of recommender systems using fuzzy logic, depending on their application domain, are presented in [9–15]. The effectiveness of collaborative filtering methods modified by the use of fuzzy logic has been analyzed and demonstrated in [16–18].

Purpose. The purpose of this study is to develop and justify an approach aimed at improving the quality of personalized recommendations in collaborative filtering under conditions of data sparsity, as well as in the presence of uncertainty and subjectivity in user ratings, through the integrated application of fuzzy logic methods. In particular, the work focuses on the use of personalized membership functions and the application of fuzzy logic to take into account users' personal preferences and improve the accuracy of rating prediction.

RESULTS AND DISCUSSION

Fuzzy logic is a mathematical tool used to analyze and model situations involving uncertainty,

imprecision, or ambiguity, through a system of fuzzy rules and inferences. It is based on the theory of fuzzy sets and fuzzy relations proposed by Lotfi Zadeh in 1965, which allows working with intermediate values between “true” and “false” and introduces formalized measures of membership (correspondence) of available data to certain concepts or events. Let us formulate some concepts of fuzzy set theory.

Definition 1. A fuzzy set \tilde{A} of a universal set X is defined as a set of pairs $\tilde{A} = \{(\mu_{\tilde{A}}(x), x)\}$, where $\mu_{\tilde{A}}(x): X \rightarrow [0, 1]$ is a mapping of the set X onto the unit interval $[0, 1]$, called the membership function of the fuzzy set.

The value of the membership function $\mu_{\tilde{A}}(x)$ for an element $x \in X$ determines the degree of its membership in the fuzzy set. The interpretation of the membership degree $\mu_{\tilde{A}}(x)$ is a subjective measure of how well the element $x \in X$ corresponds to the concept whose meaning is formalized by the fuzzy set \tilde{A} .

The processing of fuzzy quantities is associated with the construction and application of binary relations. Most commonly, the concept of a fuzzy binary relation from a universal set X into a set Y is used. Thus, a fuzzy binary relation is understood as a fuzzy set \tilde{R} defined on the Cartesian product $X \times Y$ with a membership function $\mu_{\tilde{R}}: X \times Y \rightarrow [0, 1]$.

Let us consider the set of real numbers X as the universal set, that is, $X = R^1$.

Definition 2. A *fuzzy triangular number* \tilde{A} is defined as an ordered triple of numbers (a, b, c) , $a \leq b \leq c$ with a given membership function $\mu_{\tilde{A}}(x)$:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \frac{x-a}{b-a}, x \in [a, b]; \quad \mu_{\tilde{A}}(x) = \frac{c-x}{c-b}, x \in [b, c];$$

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = 0, x \notin [a, c]. \quad (1)$$

The use of fuzzy numbers and fuzzy relations in conditions of situational or informational uncertainty makes it possible to construct fuzzy inference schemes, within which logical conclusions are formed based on a system of fuzzy rules and operations on fuzzy values in order to obtain target (output) values. Moreover the combination of fuzzy logic tools with basic collaborative filtering methods contributes to the formation of more accurate and transparent personalized recommendations, especially in conditions of incomplete or fragmentary data with a high level of inaccuracy (uncertainty). This approach creates additional opportunities for improving the quality of recommendation systems and increase their effectiveness.

Taking into account the positive impact of fuzzy logic on the recommendation generation process, it is proposed to apply the Mamdani method [19] to compute the degree of similarity between users, which makes it possible to account for the

fuzziness of ratings and to ensure well-grounded rating prediction.

Suppose there is a set of users $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$, a set of items $I = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$, each of which can be rated by a value $r \in N$ (according to a certain numerical scale), and a set of criteria $K = \{k_1, k_2, \dots, k_s\}$. Each criterion describes properties of the items in the set I , for example, “acting performance”, “plot”, and so on.

The rating matrix R of size $m \times n$, is given, where each element r_{ui} represents the rating assigned by user u to item i . A three-dimensional matrix RK of size $m \times n \times k$ is also given, where each element r_{ui}^k describes the rating assigned by user u to criterion k when evaluating item i .

Let us describe the stages of constructing personalized triangular membership functions. We will define a set of linguistic terms $A = \{A_1, A_2, \dots, A_t\}$ used to describe subjective evaluations of elements r_{ui}^k given by users. Each of the terms corresponds to a certain range of quality levels, for example: A_1 — “very bad”, A_2 — “bad”, A_3 — “neutral”, A_4 — “good”, A_5 — “very good”, etc. Next, for each user u , item $i \in I$, and criterion $k \in K$ personalized membership functions of triangular shape are introduced based on the terms $w \in A$:

$$\mu_{A_{ku}}^{(w)}(r_{ui}^k) = \begin{cases} 0, r_{ui}^k \leq a_{ku}^{(w)}, \\ \frac{r_{ui}^k - a_{ku}^{(w)}}{b_{ku}^{(w)} - a_{ku}^{(w)}}, a_{ku}^{(w)} < r_{ui}^k < b_{ku}^{(w)}, \\ \frac{c_{ku}^{(w)} - r_{ui}^k}{c_{ku}^{(w)} - b_{ku}^{(w)}}, b_{ku}^{(w)} < r_{ui}^k < c_{ku}^{(w)}, \\ 0, r_{ui}^k \geq c_{ku}^{(w)} \\ 1, r_{ui}^k = b_{ku}^{(w)} \end{cases} \quad (2)$$

where R_{uk} is the set of user u 's ratings of objects from set I according to criterion $k, k \in K, a_{ku}^{(w)} = \min_{r \in R_{uk}} r$ is the lowest rating that user u gave to any of the objects according to criterion $k \in K, c_{ku}^{(w)} = \max_{r \in R_{uk}} r$ the highest rating given by user u to any of the objects according to criterion $k, k \in K$ and $b_{ku}^{(w)} = \text{median}(R_{uk})$ is the median rating of user u for all objects according to criterion $k \in K$.

As a result, we obtain sets of fuzzy triangular numbers in the form of triples $(a_{ku}^{(w)}, b_{ku}^{(w)}, c_{ku}^{(w)})$. The construction of the initial values $(a_{ku}^{(w)}, b_{ku}^{(w)}, c_{ku}^{(w)})$ for the membership functions is carried out according to the following sequence of steps:

1. Determine the number of evaluation criteria.
2. Set the upper and lower bounds of the rating scale for each criterion.
3. Identify the set of items evaluated by the corresponding user.

4. For each criterion and each user, find the minimum and maximum values of the ratings assigned by that user.
5. The obtained rating scale is divided into $c = t - 1$ overlapping intervals (where t is the number of linguistic terms), as shown in **Figure 1**.

After this, the parameters for representing fuzzy numbers are defined according to the following procedure:

$$\begin{aligned} \sigma &= \{r_1, r_2, \dots, r_c\}, \\ \underline{r} &= \min \sigma, \bar{r} = \max \sigma, \\ b_k &= \underline{r} + k * h, h = \frac{\bar{r} - \underline{r}}{c - 1} \\ a_k &= b_k - h, c_k = b_k + h, \\ a_0 &= \underline{r}, c_{n-1} = \bar{r}, k = \overline{1, c}. \end{aligned} \quad (3)$$

The need to introduce personalized fuzzy membership functions is explained by the fact that different users interpret the significance of item criteria differently, based on their own subjective perceptions. For example, when watching movies, the same film might be rated highly by one user due to the appeal of its genre, despite a mediocre plot or acting, whereas another user might give a low rating solely because the genre is not to their taste.

Since users' preferences change over time, it is proposed to update the corresponding triples $(a_{ku}^{(w)}, b_{ku}^{(w)}, c_{ku}^{(w)})$ each time a new rating from user u is received. This allows the system to dynamically adapt to the user's interests, thereby providing more accurate personalized recommendations.

The update of these triples is performed according to the following scheme:

$$\begin{aligned} a_{ku}^{(w) \text{ new}} &= \min(a_{ku}^{(w) \text{ old}}, r_{ui}) \\ c_{ku}^{(w) \text{ new}} &= \max(c_{ku}^{(w) \text{ old}}, r_{ui}) \\ b_{ku}^{(w) \text{ new}} &= \alpha r_{ui} + (1 - \alpha) b_{ku}^{(w) \text{ old}}, \alpha \in [0, 1]. \end{aligned} \quad (4)$$

The value $b_{ku}^{(w) \text{ new}}$ is calculated as a smoothed intermediate value, which helps to avoid abrupt changes in the membership function. Exponential smoothing is used for this purpose, providing gradual updating of the parameter and reducing its sensitivity to individual anomalous ratings assigned by users.

Next, the Mamdani method will be applied to compute fuzzy similarity between users and to identify those whose interests are most alike, even before including them in the recommendation generation process.

We define a set of output fuzzy terms $S = \{S_1, S_2, \dots, S_q\}$, to describe the level of similarity between users, where each term represents a similarity level. For example, for $(q = 5)$:

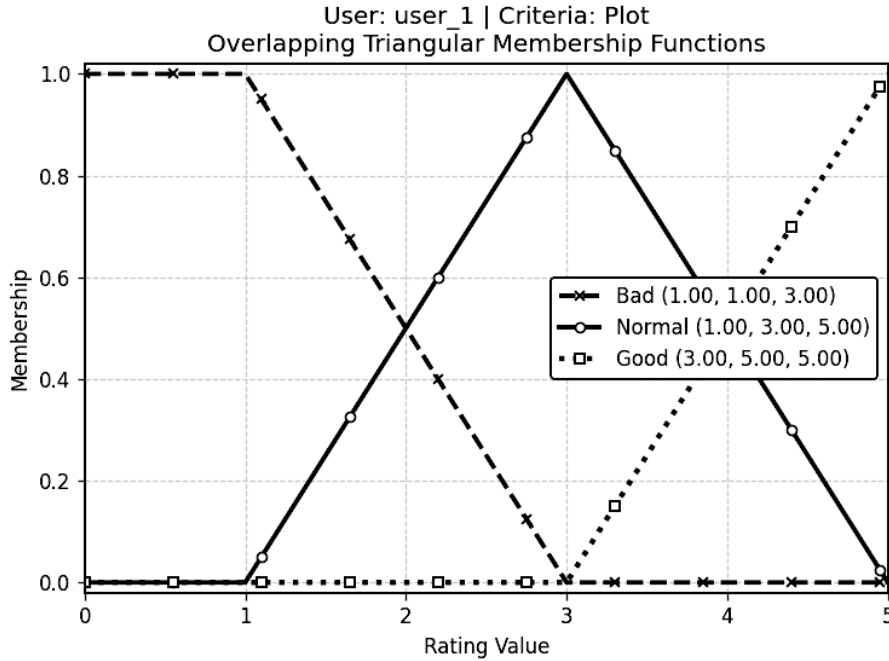


Fig. 1. Example of initial values $(a_{ku}^{(w)}, b_{ku}^{(w)}, c_{ku}^{(w)})$

- S_1 — “very low similarity”,
- S_2 — “low similarity”,
- S_3 — “medium similarity”,
- S_4 — “high similarity”,
- S_5 — “very high similarity”.

Considering the fuzzy nature of the terms \tilde{S}_p , triangular membership functions are defined for each of them, similarly to (2), which determine the corresponding fuzzy sets:

$$\mu_{\tilde{S}_p}(s_{uv}) = \begin{cases} 0, & s_{uv} \leq a_p, \\ \frac{s_{uv}-a_p}{b_p-a_p}, & a_p < s_{uv} < b_p, \\ \frac{c_p-s_{uv}}{c_p-b_p}, & b_p < s_{uv} < c_p, \\ 0, & s_{uv} \geq c_p \\ 1, & s_{uv} = b_p \end{cases} \quad (5)$$

Here the triple (a_p, b_p, c_p) represents the parameters of the membership function for each fuzzy assessment of the similarity level S_{uv} of users u and v based on the corresponding term S_p , $p, \bar{1} \bar{q}$, which are specified in advance. Since the Mamdani method is based on the use of a rule-based system to generate an inference, we introduce an appropriate set of production rules for calculating the degree of similarity between users:

IF $\mu_{\tilde{A}_{ku}}^{(w)}(r_{ui})$ IS FUZZY OF $A_w \wedge \mu_{\tilde{A}_{kv}}^{(l)}(r_{vi})$ IS FUZZY OF A_l THEN s_{uv} IS FUZZY OF S_p ,

where A_w, A_l are the linguistic terms of the ratings given by users u and v , S_p is the corresponding term of the users' similarity level, and **IS FUZZY OF**

is a conventional notation indicating the degree of membership of a fuzzy similarity assessment to the corresponding linguistic term. For example:

- if the rating of user u for object i under criterion k is “Very good” AND the rating of user v for object i under criterion k is “Good”, THEN their similarity is “High”;
- if the rating of user u for object i under criterion k is “Neutral” AND the rating of user v for object i under criterion k is “Poor”, THEN their similarity is “Medium”;
- if the rating of user u for object i under criterion k is “Very good” AND the rating of user v for object i under criterion k is “Poor”, THEN their similarity is “Low”.

Then, by applying the Mamdani method to compute the fuzzy similarity between users u and v based on the evaluation of commonly viewed objects $i \in I' \subset I$ for each criterion $k \in K$, we obtain:

$$\mu_{\tilde{S}_{uvi}}^p(s_{uvi}) = \max_{l=1, \bar{M}} \mu^l(y), \quad (6)$$

$$\mu^l(y) = \max_{w \in A, k \in K} \min(\mu_{\tilde{A}_{ku}}^{(w)}(r_{ui}^k), \mu_{\tilde{A}_{kv}}^{(w)}(r_{vi}^k)),$$

where $\mu_{\tilde{S}_{uvi}}^p(s_{uvi})$ denotes the degree of membership of the possible values s_{uvi} of the similarity between users u and v when evaluating object $i, i \in I'$, in the output fuzzy set \tilde{S}_{uvi}^p corresponding to the given term.

After fuzzy similarity values have been obtained for each pair of users u and v for each linguistic term, there arises a need to defuzzify them for further use in computing the predicted recom-

mendation rating. In this study, the centroid (center of gravity) method of fuzzy set defuzzification is employed [6].

$$s_{uvi} = \frac{\sum_{p=1}^q s_{uvi} \mu_{s_{uvi}}^p(s_{uvi})}{\sum_{p=1}^q \mu_{s_{uvi}}^p(s_{uvi})}. \tag{7}$$

Next, the Mamdani method is applied to all objects from I' that were jointly viewed and rated by users u and v , respectively. As a result, a set of similarity values is obtained, and for the final calculation of the similarity between two users it is necessary to compute the average value s_{uv}^* of the resulting set of values:

$$s_{uv}^* = \frac{\sum_{i \in I'} s_{uvi}^*}{|I'|}. \tag{8}$$

The calculated value provides an approximate measure of the level of similarity in how users v and u evaluate common objects. Then, a relationship can be defined for predicting the rating that user u may potentially assign to object i , which has not been previously viewed by the user, taking into account the ratings provided by other users:

$$\hat{r}_{ui} = \frac{\sum_{v \in N_u} s_{uv}^* r_{vi}}{\sum_{v \in N_u} s_{uv}^*}, \tag{9}$$

where N_u is the set of users most similar to user u according to the calculated values s_{uv}^* and R_{vi} is the rating assigned by user v to object i . After performing the calculations required to generate recommendations, all predicted ratings are ordered in descending order, and the top L values corresponding to the respective objects are selected (L — a parameter that can be varied).

Model Experiment

To validate the proposed approach, an artificial test dataset was created consisting of 7 users, 3 evaluation criteria, 2,100 user-object ratings, and 6,300 criterion-based ratings. The use of generated data made it possible to fully control the structure of the sample, the level of sparsity, and to repeat the experiment under identical conditions.

First, a set of users and a set of objects that they could rate were formed. For each “user-object” pair, a rating was generated with a certain probability, which allowed the desired level of density in the rating matrix to be specified. Rating values were generated in the range from 1 to 5, taking into account possible differences in user preferences and object characteristics. Separately, for each object, the values of the criteria according to which it was evaluated were generated, and these criteria were used as input data for constructing personalized fuzzy membership functions.

As a result, a model dataset was obtained that reproduces a typical information structure of recommender systems: a set of users, a set of objects, a partially filled rating matrix, and descriptive object criteria. This made it possible, under controlled conditions, to study the operation of the model, verify its ability to process sparse and partially uncertain data, and assess the impact of the proposed fuzzy mechanisms on recommendation quality.

Three metrics were used for comparison: MSE, RMSE, and SSE. All of them reflect the error

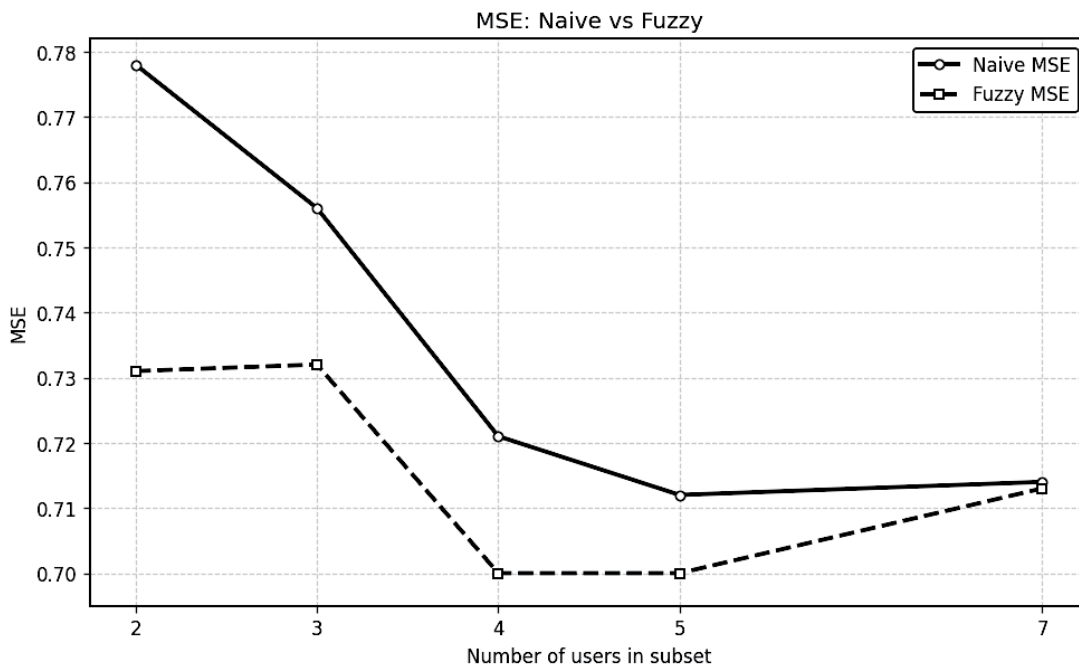


Fig. 2. Comparison of the mean squared error for Naive and Modified methods

between predicted and actual ratings, where lower values indicate better model performance.

The graph shown in **Figure 2** presents a comparison of the mean squared error (MSE) values for the naive collaborative filtering method and the modified fuzzy approach across samples with different numbers of users. The X-axis represents the number of users, while the Y-axis represents the MSE values. It can be observed that, for the considered subsamples, the MSE values of the modified approach are lower than or close to those of the naive method, which indicates better or at least no worse rating prediction accuracy.

The graph shown in **Figure 3** illustrates the change in RMSE for the two approaches depending on the number of users in the sample. The X-axis shows the number of users, while the Y-axis represents the RMSE values. As can be seen, the results are similar to those shown in the previous graph. The modified method demonstrates a reduction in error.

The graph shown in **Figure 4** presents a comparison of SSE for the naive and fuzzy approaches. The X-axis represents the number of users in the subset, while the Y-axis shows the SSE values. Since SSE reflects the total accumulated error for the entire sample, a reduction in this measure in our approach indicates that the overall number of rating prediction errors is lower compared to the baseline model.

Figure 5 shows a chart illustrating the percentage improvement of the modified approach compared to the naive method across three metrics:

MSE, RMSE, and SSE. The X-axis represents the number of users in the sample, while the Y-axis indicates the percentage change in the metrics. Positive values correspond to improvements in quality (i.e., error reduction) for the fuzzy approach relative to the baseline, allowing a clear visualization of how the proposed modification enhances results for each subset size.

When comparing the modified approach with the naive collaborative filtering method on artificially generated data, a heterogeneous pattern is observed: for some user subsets, the modified method demonstrates better error metrics, while for others, its performance is close to that of the baseline model.

One key factor explaining this behavior is the nature of the input data. In the proposed approach, when calculating similarity between users, additional criteria based on movie attributes are considered. For real-world data, these criteria typically correlate with user preferences (e.g., genre, cast, release year), allowing for more accurate modeling of the structure of user preferences.

In such situations, the added complexity of the proposed model does not necessarily reveal useful patterns, but rather amplifies the influence of random factors. The naive method, relying solely on the rating matrix, proves to be more robust in the absence of meaningful dependencies, whereas the modified approach, which incorporates membership functions and weighted coefficients based on the criteria, becomes sensitive to random

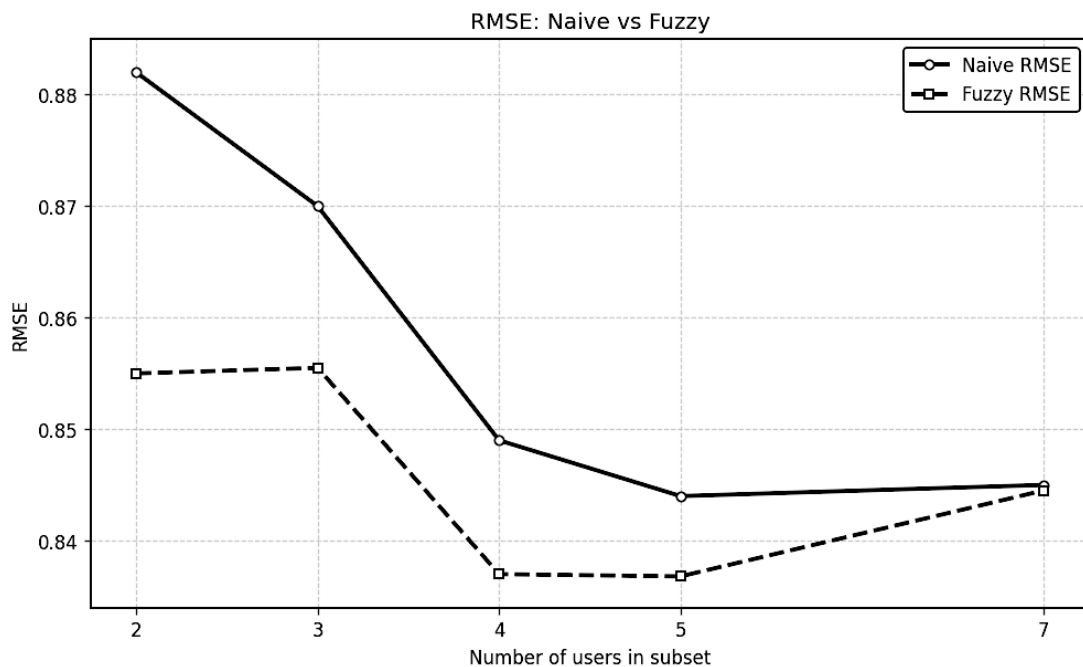


Fig. 3. Comparison of the root mean squared error for Naive and Modified methods

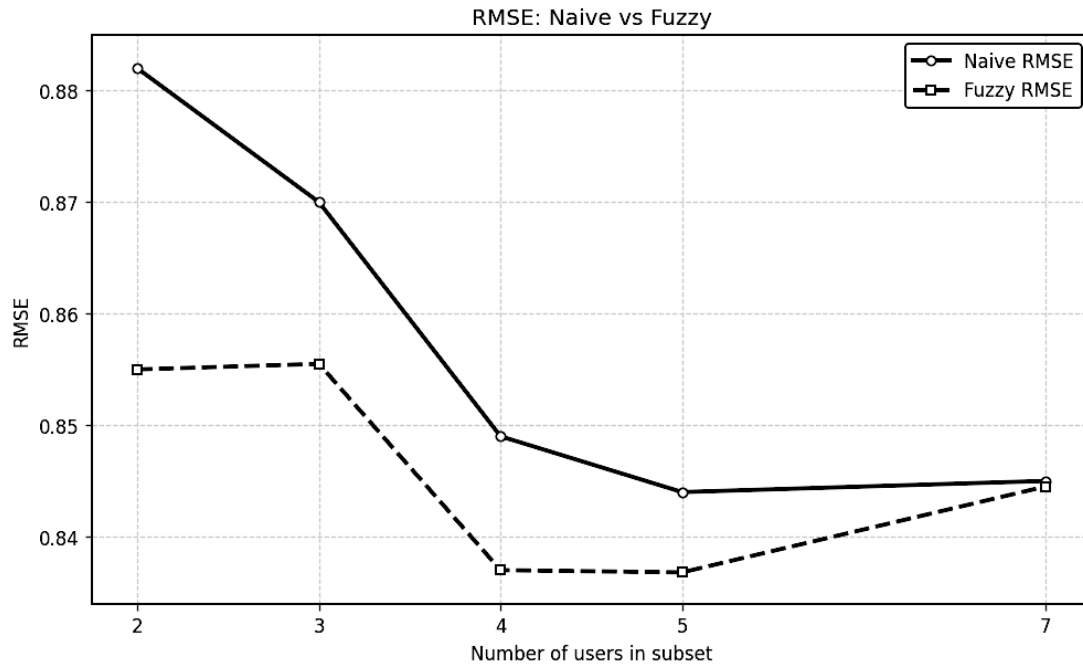


Fig. 4. Comparison of the sum of squared errors for Naive and Modified methods

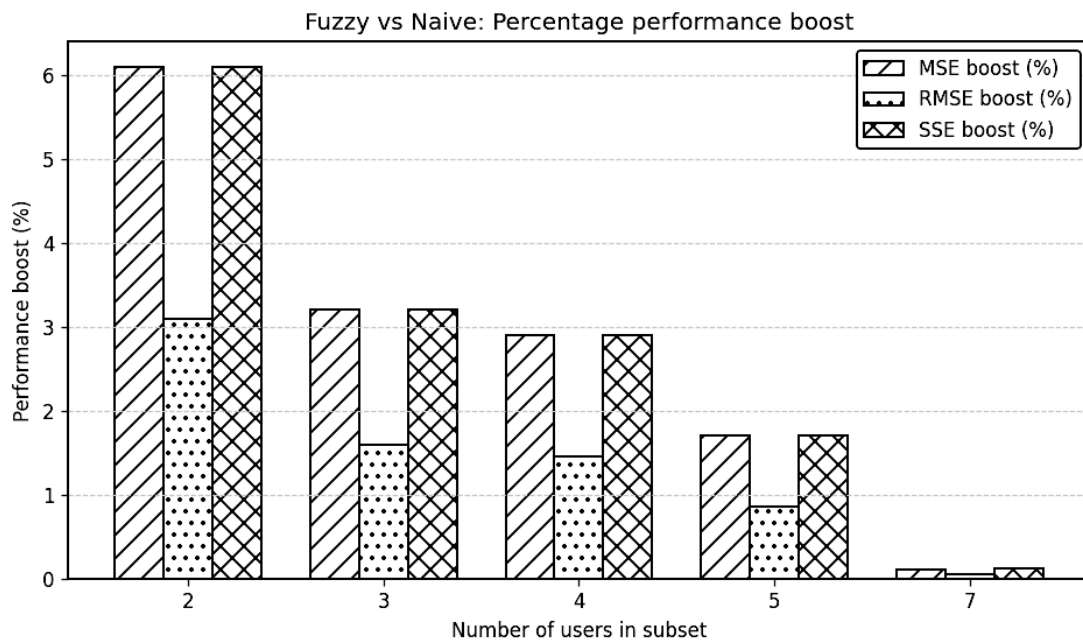


Fig. 5. Percentage improvement of the modified approach

fluctuations. As a result, for certain user subsets, the method demonstrates only a slight improvement in metrics compared to the naive approach.

CONCLUSIONS

In this work, a modification of the naive collaborative filtering method was proposed by introducing elements of fuzzy logic, which allowed

for the consideration of additional evaluation criteria for objects and the construction of a more flexible model of user preferences. A comparative experiment was conducted on an artificially generated dataset that reproduces the typical structure of information in recommendation systems, comparing the naive method with the proposed approach.

The results of the numerical experiments showed that even under conditions of artificially generated data, where the relationship between the criteria and user ratings does not fully reflect real behavioral patterns, the modified approach demonstrated a reduction in error values compared to the naive method. This indicates the potential effectiveness of incorporating evaluation criteria and using fuzzy membership functions to improve recommendation quality. At the same time, these results should be regarded as a conservative estimate of the model's capabilities, since the absence of real correlations in synthetic data partially limits the advantages of the modified approach.

Future research will focus on testing the proposed model on real-world data, where evaluation criteria are genuinely related to user preferences. This will allow for the assessment of the model's adequacy in real-world conditions, its robustness to random variations in preferences, and a comparison with other modern recommendation approaches. An additional task is the fine-tuning of fuzzy membership function parameters and criterion weights, which is expected to further enhance the quality of generated recommendations.

REFERENCES

1. Almohammadi, K., & Hagra, H. (2013). An adaptive fuzzy logic based system for improved knowledge delivery within intelligent e-learning platforms. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, p. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2013.6622350>.
2. Aly, S., & Vrana, I. (2018). Toward efficient modeling of fuzzy expert systems: A survey. *Agricultural Economics*, 52, 456-460. DOI: <https://doi.org/10.17221/5051-agricecon>.
3. Chrysafiadi, K., & Virvou, M. (2015). Fuzzy logic for adaptive instruction in an e-learning environment for computer programming. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 23 (1), 164-177. DOI: <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2014.2310242>.
4. Guruprasad, M., Ramachandran, S., & Balasubramanian, S. (2016). Fuzzy logic as a tool for evaluation of performance appraisal of faculty in higher education institutions. *SHS Web of Conferences*, 26, 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1051/shsconf/20162601121>.
5. Mandal, M., Mohanty, B. K., & Dash, S. (2021). Understanding consumer preference through fuzzy-based recommendation system. *IMB Management Review*, 33 (4), 287-298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iimb.2021.03.015>.
6. Ramathilagam, A., & Pitchipoo, P. (2022). Modeling and development of fuzzy logic-based intelligent decision support system. *Romanian Journal of Information Science and Technology*, 25 (1), 58-79. DOI: <https://www.romjist.ro/full-texts/paper707.pdf>.
7. Sun, T. J., Lv, X., Cai, Y., Pan, Y., & Huang, J. (2020). Software test quality evaluation based on fuzzy mathematics. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40 (4), 6125-6135. DOI: <https://doi.org/10.3233/JIFS-189451>.
8. Pasichnyk, V. V., Yunchyk, V. L., Kunanets, N. E., & Fedoniuk, A. A. (2022). Vykorystannia nechitkoi lohiky u protsesi ekspertnoho otsiniuvannia elektronnykh navchalnykh resursiv [The use of fuzzy logic in the process of expert evaluation of electronic learning resources]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy [Scientific Bulletin of UNFU]*, 32 (4), 66-76. DOI: <https://doi.org/10.36930/40320411> [in Ukr.].
9. Cañas, A., Santos, J., Anido-Rifón, L., & Perez-Rodriguez, R. (2015). A recommender system for non-traditional educational resources: A semantic approach. *Journal of Universal Computer Science*, 21 (2), 306-325. Retrieved from: <https://www.researchgate.net/publication/275580879>.
10. Eryilmaz, M., & Adabashi, A. M. (2020). Development of an intelligent tutoring system using Bayesian networks and fuzzy logic for higher student academic performance. *Applied Sciences*, 10 (19), 1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10196638>.
11. Esteban, A., Zafra, A., & Romero, C. (2019). Helping university students to choose elective courses by using a hybrid multi-criteria recommendation system with genetic optimization. *Knowledge-Based Systems*, 194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2019.105385>.
12. Ivokhin, Ye. V., & Yushtin, K. Ie. (2025). Alhorytm nechitkoi dyspetcheryzatsii protsesu planuvannia poslidovnosti vykonannia neperiodychnykh zavdan [Fuzzy dispatching algorithm for planning the sequence of non-periodic tasks]. *Artificial Intelligence*, 1, 85-97. DOI: <https://doi.org/10.15407/jai2025.01.085> [in Ukr.].
13. Yassin, F. M., Ouarda, W., & Alimi, A. M. (2022). Fuzzy ontology as a basis for recommendation systems for traveler's preference. *Multimedia Tools and Applications*, 81 (5), 6599-6631. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-021-11780-5>.
14. Khudik, B. O. (2023). Model predstavlenia danykh rekomendatsiinoi systemy v sferi osvity na osnovi nechitkoi lohiky [A data representation model of an educational recommendation system based on fuzzy logic]. *Kyberbezpeka: Osvita, Nauka, Tekhnika* [Cybersecurity: education, science, technology], 1 (21), 260-272. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.21.260272> [in Ukr.].
15. Larin, O. M., Hrinchenko, Ye. M., Sokolov, D. L., & Fedorenko, R. M. (2016). Vykorystannia teorii nechitkykh mnozhyn dlia otsinky pozhezhnogo ryzkyku rezervuaru z naftoproduktom [The use of fuzzy set theory for assessing the fire risk of a petroleum product storage tank]. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii* [Emergency problems], 23, 78-83. Retrieved from: <https://surl.li/pddexx> [in Ukr.].
16. Chung, F.-L., & Chan, S. C.-F. (2006). A collaborative filtering framework based on fuzzy association rules and multiple-level similarity. *Knowledge and Information Systems*, 10, 357-381. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10115-006-0002-1>.
17. Lee, S. (2020). Using fuzzy rating information for collaborative filtering-based recommender systems. *International Journal of Advanced Smart Convergence*, 9 (3), 42-48. DOI: <https://doi.org/10.7236/IJASC.2020.9.3.42>.
18. Ivokhin, Ye. V., Sheliakin, H. V. (2025). Zastosuvannia nechitkoi lohiky u realizatsii metody kolaboratyvnoi filtratsii [The application of fuzzy logic in the implementation of collaborative filtering methods]. *Artificial Intelligence*, 3, 63-77. DOI: <https://doi.org/10.15407/jai2025.03.063> [in Ukr.].
19. Mamdani, E. H. (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the IEEE*, 121 (12), 1585-1588. DOI: <https://doi.org/10.1049/ptee.1974.0328>.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Almohammadi K.* An adaptive fuzzy logic based system for improved knowledge delivery within intelligent E-Learning platforms / K. Almohammadi, H. Hagrass // IEEE International Conference on Fuzzy Systems. — 2013. — P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2013.6622350>.
2. *Aly S.* Toward efficient modeling of fuzzy expert systems: a survey / S. Aly, I. Vrana // Agricultural Economics. — 2018. — Vol. 52. — P. 456–460. DOI: <https://doi.org/10.17221/5051-agricecon>.
3. *Chrysafiadi K.* Fuzzy logic for adaptive instruction in an e-learning environment for computer programming / K. Chrysafiadi, M. Virvou // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. — 2015. — Vol. 23, No. 1. — P. 164–177. DOI: <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2014.2310242>.
4. *Guruprasad M.* Fuzzy logic as a tool for evaluation of performance appraisal of faculty in higher education institutions / M. Guruprasad, S. Ramachandran, S. Balasubramanian // SHS Web of Conferences. — 2016. — Vol. 26. — P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1051/shsconf/20162601121>.
5. *Mandal M.* Understanding consumer preference through fuzzy-based recommendation system / M. Mandal, B. K. Mohanty, S. Dash // IIMB Management Review. — 2021. — Vol. 33. — No. 4. — P. 287–298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iimb.2021.03.015>.
6. *Ramathilagam A.* Modeling and development of fuzzy logic-based intelligent decision support system [Electronic resource] / A. Ramathilagam, P. Pitchipoo // Romanian Journal of Information Science and Technology. — 2022. — Vol. 25. — No. 1. — P. 58–79. — Access mode: <https://www.romjist.ro/full-texts/paper707.pdf>.
7. Software test quality evaluation based on fuzzy mathematics / Tingting Sun, Xingjun Lv, Yakun Cai, Yuqing Pan, Jianchang Huang // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. — 2020. — Vol. 40. — No. 4. — P. 6125–6135. DOI: <https://doi.org/10.3233/JIFS-189451>.
8. Використання нечіткої логіки у процесі експертного оцінювання електронних навчальних ресурсів / В. В. Пасічник, В. Л. Юнчи., Н. Е. Кунанець, А. А. Федонюк // Науковий вісник НЛТУ України. — 2022. — Т. 32. — № 4. — С. 66–76. DOI: <https://doi.org/10.36930/40320411>.
9. A recommender system for non-traditional educational resources: a semantic approach [Electronic resource] / Agustín Cañas, Juan M. Santos, Luis E. Anido-Rifón L., Roberto Perez-Rodriguez // Journal of Universal Computer Science. — 2015. — Vol. 21. — No. 2. — P. 306–325. — Access mode: <https://www.researchgate.net/publication/275580879>.
10. *Eryilmaz M.* Development of an intelligent tutoring system using Bayesian networks and fuzzy logic for a higher student academic performance / M. Eryilmaz, A. Adabashi // Applied Sciences. — 2020. — Vol. 10. — No. 19. — P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10196638>.
11. *Esteban A.* Helping university students to choose elective courses by using a hybrid multi-criteria recommendation system with genetic optimization / A. Esteban, A. Zafra, C. Romero // Knowledge-Based Systems. — 2019. — Vol. 194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2019.105385>.
12. *Івохін Є. В.* Алгоритм нечіткої диспетчеризації процесу планування послідовності виконання неперіодичних завдань / Є. В. Івохін, К. Є. Юштин // Artificial Intelligence. — 2025. — № 1. — С. 85–97. DOI: <https://doi.org/10.15407/jai2025.01.085>.
13. *Yassin F. M.* Fuzzy ontology as a basis for recommendation systems for traveler's preference / F. M. Yassin, W. Ouarda, A. M. Alimi // Multimedia Tools and Applications. — 2022. — Vol. 81. — No. 5. — P. 6599–6631. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-021-11780-5>.
14. *Худік Б. О.* Модель представлення даних рекомендаційної системи в сфері освіти на основі нечіткої логіки / Б. О. Худік // Кібербезпека: освіта, наука, техніка. — 2023. — № 1 (21). — С. 260–272. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2032.21.260272>.
15. Використання теорії нечітких множин для оцінки пожежного ризику резервуару з нафтопродуктом [Електронний ресурс] / О. М. Ларін, Є. М. Грінченко, Д. Л. Соколов, Р. М. Федоренко // Проблеми надзвичайних ситуацій. — 2016. — Вип. 23. — С. 78–83. — Access mode: <https://surl.li/pddexx>.
16. *Chung F.-L.* A collaborative filtering framework based on fuzzy association rules and multiple-level similarity / F.-L. Chung, S. C.-F. Chan // Knowledge and Information Systems. — 2006. — Vol. 10. — P. 357–381. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10115-006-0002-1>.
17. *Lee S.* Using fuzzy rating information for collaborative filtering-based recommender systems / S. Lee // International Journal of Advanced Smart Convergence. — 2020. — Vol. 9. — No. 3. — P. 42–48. DOI: <https://doi.org/10.7236/IJASC.2020.9.3.42>.
18. *Івохін Є. В.* Застосування нечіткої логіки у реалізації методики колаборативної фільтрації / Є. В. Івохін, Г. В. Шелякін // Artificial Intelligence. — 2025. — № 3. — С. 63–77. DOI: <https://doi.org/10.15407/jai2025.03.063>.
19. *Mamdani E. H.* Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant / E. H. Mamdani // Proceedings of the IEEE. — 1974. — Vol. 121. — No. 12. — P. 1585–1588. DOI: <https://doi.org/10.1049/piee.1974.0328>.

Є. В. ІВОХІН, д-р фіз.-мат. наук, проф.

Г. В. ШЕЛЯКІН, аспірант

РЕКОМЕНДАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ДАНИХ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ТА МЕТОДУ КОЛАБОРАТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ

Резюме. У статті запропоновано модель представлення даних у рекомендаційних системах, що ґрунтується на впровадженні апарату нечіткої логіки в метод колаборативної фільтрації для підвищення якості формування персоналізованих рекомендацій. Особливу увагу приділено проблемам розрідженості даних, невизначеності користувацьких оцінок та суб'єктивності інтерпретації критеріїв, що традиційно ускладнюють роботу класичних алгоритмів рекомендацій. У межах дослідження обґрунтовано доцільність використання персоналізованих трикутних функцій належності, які дають змогу

відобразити персональні уподобання та особливості оцінювання кожного користувача. Запропоновано формалізовану процедуру побудови та динамічного оновлення параметрів таких функцій для всіх критеріїв оцінювання.

Для обчислення міри подібності між користувачами застосовано метод Мамдані, що забезпечує врахування нечіткості оцінок і дає змогу формувати логічно узгоджені висновки на основі системи правил. Такий підхід надає можливість визначити рівень (міру) схожості між користувачами з урахуванням багатовимірних критеріїв та їхньої якісної інтерпретації. Окрім того, продемонстровано процедуру дефазифікації отриманих нечітких значень подібності та їхньої інтеграції в процес прогнозування рейтингів.

Для оцінювання ефективності розробленої моделі проведено модельний експеримент на штучно згенерованому наборі даних із контрольованою структурою та заданим рівнем розрідженості. Застосовано метрики на основі значень середньоквадратичного відхилення (MSE), квадратного кореня з середньоквадратичного відхилення ($RMSE$) та суми квадратів відхилень (SSE) для порівняння запропонованого підходу з результатами базового методу колаборативної фільтрації. Отримані результати демонструють потенційну здатність модифікованої моделі зменшувати похибку прогнозування в умовах неповних і нечітких даних, а також поліпшувати адаптивність рекомендацій завдяки врахуванню індивідуальних моделей оцінювання. Запропонований підхід може бути використаний як підґрунтя для побудови більш стійких, гнучких та інтерпретованих рекомендаційних систем нового покоління.

Ключові слова: нечітка логіка, метод Мамдані, колаборативна фільтрація, розрідженість даних, невизначеність, нечіткі числа.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivokhin Y. V. — D. Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Taras Shevchenko National University of Kyiv, 60, Volodymyrska Str., Kyiv, Ukraine, 01033; ivohin@univ.kiev.ua; ORCID: 0000-0002-5826-7408

Shelyakin G. V. — Postgraduate Student, Taras Shevchenko National University of Kyiv, 60, Volodymyrska Str., Kyiv, Ukraine, 01033; shelyakingleb17@gmail.com; ORCID: 0009-0002-7171-6535

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

Івохін Євген Вікторович — д-р фіз.-мат. наук, проф., Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 60, м. Київ, Україна, 01033; ivohin@univ.kiev.ua; ORCID: 0000-0002-5826-7408

Шелякін Гліб Вячеславович — аспірант, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 60, м. Київ, Україна, 01033; shelyakingleb17@gmail.com; ORCID: 0009-0002-7171-6535

Надійшла до редакції 23.02.2026

Прийнята до друку 06.03.2026



Т. В. ШАБЕЛЬНИК, д-р екон. наук, проф.

С. О. ЄВСЄЄВА, студентка

КВАНТИТАТИВНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОРТФЕЛЬНИХ СТРАТЕГІЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ALPHA-СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ТА БЕКТЕСТИНГУ

Резюме. У статті запропоновано квантитативну модель побудови ML-based alpha-сигналів та їхньої інтеграції в процедуру портфельного бектестингу в межах середньострокового інвестиційного горизонту. Дослідження базується на щоденних фінансових часових рядах ліквідних інструментів фондового ринку США та передбачає формування структурованого простору ознак, що охоплює цінові (price-based), волатильні (volatility-based) та агреговані внутрішньоденні (intraday-aggregated) характеристики. Навчання моделей організовано в часово узгодженому режимі з використанням rolling або expanding схем і строгого розділення train/validation/test вибірок, що мінімізує витік інформації та забезпечує коректність оцінювання прогнозовної здатності.

Alpha-сигнали генеруються в дискретні моменти ребалансування як умовні оцінки очікуваної дохідності на заданому горизонті та інтегруються в процедуру формування портфеля. Ефективність підходу оцінюється через портфельний бектестинг із використанням стандартних ризик-орієнтованих метрик. Запропонований алгоритмічний pipeline поєднує машинне навчання та портфельний аналіз в єдину експериментальну систему та забезпечує методологічне підґрунтя для оцінювання інвестиційної доцільності ML-based стратегій.

Ключові слова: кількісне моделювання, машинне навчання, alpha-сигнали, портфельний бектестинг, фондовий ринок, середньострокові стратегії, ризик-орієнтовані метрики.

ВСТУП

Сучасні фінансові ринки характеризуються високим рівнем волатильності, частими змінами ринкових режимів і зростаючою складністю взаємозв'язків між фінансовими активами. За таких умов традиційні підходи до аналізу та управління інвестиційними портфелями, засновані на статичних припущеннях щодо розподілу дохідностей і стабільності кореляцій, дедалі частіше виявляються недостатніми для прийняття ефективних інвестиційних рішень. Це зумовлює зростання інтересу до квантитативного аналізу, що розглядає фінансовий ринок як динамічну стохастичну систему та ґрунтується на аналізі великих масивів даних і статистично значущих закономірностей.

Одним із ключових напрямів розвитку сучасних квантитативних підходів є використання методів машинного навчання (ML) для побудови прогнозних alpha-сигналів. На відміну від класичних моделей, зорієнтованих переважно на оцінювання середніх характеристик портфеля, ML-підходи дають змогу формувати сигнали, що враховують нелінійні залежності, зміну ринкових режимів і складну динаміку фінансових часових рядів. Особливого значення набувають alpha-

сигнали, які оцінюють не лише напрямок руху ціни, а й очікувану величину майбутньої дохідності активів, що створює передумови для їх безпосереднього використання в задачах портфельної оптимізації та динамічного ребалансування.

Водночас застосування ML у фінансових дослідженнях часто супроводжується надмірним акцентом на таких аналітичних метриках якості прогнозу, як середньоквадратична похибка або коефіцієнт детермінації. Хоча ці показники є важливими для оцінювання статистичної коректності моделей, вони не відображають реальної інвестиційної цінності побудованих alpha-сигналів. У практиці управління активами критичним є не лише сам факт точного прогнозування, а й здатність сигналів забезпечувати стійку портфельну ефективність з урахуванням динаміки ринку, ребалансування та транзакційних витрат.

У цьому контексті портфельний бектестинг набуває ролі необхідного методологічного продовження аналітичних метрик якості прогнозу. Саме бектестинг дає змогу оцінити економічну доцільність використання ML-alpha-сигналів, перевірити їхню стійкість у різних ринкових умовах і виявити потенційні ризики, пов'язані зі

зміною ринкових режимів. Навіть статистично стабільні α -сигнали можуть втрачати ефективність за умов структурних зламів на ринку, що зумовлює необхідність регулярного перегляду та повторного калібрування моделей у процесі бектестингу.

Таким чином, поєднання квантитативного аналізу, ML і портфельного бектестингу формує цілісний підхід до дослідження інвестиційних стратегій, зорієнтований не лише на якість прогнозування, а й на практичну інвестиційну ефективність. Саме такий підхід відповідає сучасним вимогам до кількісних досліджень у фінансах і створює передумови для побудови адаптивних і економічно обґрунтованих інвестиційних рішень.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Попри активний розвиток квантитативних методів аналізу фінансових ринків і широке впровадження алгоритмів ML у сфері управління активами, у сучасних дослідженнях залишається низка нерозв'язаних методологічних проблем. Значна частина праць зосереджена на підвищенні точності прогнозування цінних рухів або напрямку дохідності фінансових активів, причому інвестиційна інтерпретація отриманих результатів часто залишається поза межами аналізу. У результаті висока статистична якість прогнозів не завжди трансформується в практично значущу портфельну ефективність.

Класичні підходи до портфельного аналізу, зокрема моделі середньодисперсійної оптимізації, базуються на статичних оцінках очікуваної дохідності та ризику й передбачають відносну стабільність ринкових параметрів у часі. Проте в умовах змінних ринкових режимів, структурних зламів і дедалі більшої ролі нелінійних залежностей такі моделі демонструють обмежену адаптивність. Це зумовлює потребу в переході від статичних портфельних рішень до динамічних підходів, заснованих на прогнозних α -сигналах, які оновлюються відповідно до поточної ринкової інформації.

Водночас застосування методів ML у фінансових дослідженнях часто супроводжується фокусом на таких аналітичних метриках якості прогнозу, як похибка регресії чи коефіцієнти поясненої дисперсії. Хоча ці показники є важливими для оцінювання статистичних властивостей моделей, проте вони не враховують портфельний контекст використання α -сигналів, зокрема вплив ребалансування, часової стабільності сигналів та взаємодії між активами. Унаслідок цього виникає розрив між результатами модельної оцінки та реальною інвестиційною ефективністю.

Окрему проблему становить вибір часової шкали аналізу. Більшість досліджень або зосереджуються на короткострокових внутрішньоденних стратегіях, що потребують спеціалізованих даних і інфраструктури, або розглядають довгострокові інвестиційні горизонти, де вплив прогнозних сигналів суттєво згладжується. Натомість середньостроковий інвестиційний горизонт, характерний для практики кількісного управління портфелями, часто залишається недостатньо формалізованим з точки зору побудови та оцінювання ML- α -сигналів.

Таким чином, наукова проблема полягає у відсутності узгодженого підходу до формування ML-based α -сигналів, зорієнтованих на оцінювання очікуваної величини дохідності фінансових активів, а також у недостатній інтеграції аналітичних метрик якості прогнозу з портфельним бектестингом як інструментом оцінювання їхньої інвестиційної доцільності. Прикладна проблема полягає в необхідності розроблення методології, що дає змогу пов'язати результати ML із практичними портфельними рішеннями в межах середньострокового інвестиційного горизонту.

АНАЛІЗ АКТУАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

У сучасній літературі з квантитативних фінансів та управління активами простежується стійкий перехід від класичних факторних і середньодисперсійних моделей до підходів, у яких очікувана дохідність (expected return) розглядається як прогнозована величина, що може бути оцінена на основі широкого набору предикторів із використанням методів ML. Одним із найвпливовіших напрямів є застосування ML для задачі емпіричного ціноутворення активів (empirical asset pricing), де ціллю є прогнозування премій за ризик і побудова сигналів, що мають економічну цінність у портфельному контексті. У праці S. Gu, B. Kelly та D. Xiu показано, що низка ML-алгоритмів здатна формувати прогнози очікуваної дохідності на основі великої кількості характеристик (firm characteristics) та забезпечувати істотні економічні вигоди інвестору, що підкреслює перспективність ML-based α -сигналів як інструменту для прийняття інвестиційних рішень [1].

Паралельно зі зростанням популярності ML-методів виник критичний дискурс щодо їх коректного використання в asset pricing та factor zoo. У сучасних оглядових дослідженнях наголошується, що гнучкість ML може підвищувати прогнозу здатність, але водночас загострює ризику перенавчання, нестабільності результатів і помилкових висновків за умов множинного

тестування гіпотез і слабкої відтворюваності. Такі дослідження підкреслюють необхідність методологічно строгих процедур відбору ознак, валідації та інтерпретації результатів, оскільки статистична “успішність” моделі не гарантує її стійкої економічної ефективності [2].

Окремий вагомий пласт досліджень формує прикладна методологія побудови інвестиційних стратегій на основі ML-сигналів, де акцент переноситься з вибору “найточнішої” моделі на правильну організацію дослідження: структурування даних, контроль витоків інформації (look-ahead bias), уникнення overfitting, коректну постановку експерименту та повноцінний бектестинг. Праці M. López de Prado систематизують ці принципи та розглядають backtesting як центральний елемент процесу перетворення статистичного сигналу на практично релевантну інвестиційну стратегію [3].

Критично важливо, що в професійній та академічній літературі з backtesting підкреслюється проблема data mining / multiple testing: у середовищі, де генерується багато ідей і тестуються численні варіації стратегій, навіть оптимістичні показники з історичного тесту можуть бути випадковим результатом. Водночас C. R. Harvey та Y. Liu пропонують статистичний підхід до корекції (haircut) оцінених показників ефективності, пояснюючи, чому “історичний” коефіцієнт Шарпа (Sharpe ratio) часто потребує зниження для отримання реалістичної оцінки інвестиційної якості стратегії [4].

Ще один напрям досліджень стосується вдосконалення метрик оцінювання результатів бектестингу. Так, D. H. Bailey та M. López de Prado вводять імовірнісне трактування Sharpe ratio (Probabilistic Sharpe Ratio), що враховує невизначеність оцінки та відхилення дохідностей від нормальності. Це дає змогу більш коректно порівнювати стратегії та інтерпретувати значущість отриманого показника з урахуванням тривалості трек-рекорду та властивостей розподілу дохідностей [5].

Окрім того, сучасні публікації демонструють, що ML-підходи до прогнозування премій за ризик можуть узагальнюватися на ширший набір ринків та активів (наприклад, міжнародні вибірки), однак питання стійкості сигналів у часі, перенесення результатів між ринками та залежності від ринкових режимів залишається ключовим. Дослідники S. Gu, B. Kelly та D. Xiu підкреслюють економічну значущість ML-прогнозів, але водночас актуалізується потреба в обережній валідації та порівнянності результатів [1].

Отже, аналіз актуальних досліджень дає змогу зробити два принципові висновки. По-перше, сучасна література підтверджує пер-

спективність ML-based alpha-сигналів, зорієнтованих на оцінювання очікуваної величини дохідності як безперервної прогнозовної змінної, а не лише напрямку руху ціни [1; 6; 10]. По-друге, надійне оцінювання практичної цінності таких сигналів вимагає методологічно коректного процесу дослідження, у якому портфельний бектестинг є необхідним етапом поряд із аналітичними метриками якості прогнозу, з урахуванням ризиків множинного тестування та статистичної невизначеності показників ефективності [3–5]. Саме ці положення формують науково-методичне підґрунтя для подальшого обґрунтування запропонованого підходу в межах цього дослідження.

Метою статті є розроблення та обґрунтування квантитативного підходу до формування ML-based alpha-сигналів, зорієнтованих на оцінювання очікуваної величини дохідності фінансових активів, а також визначення ролі портфельного бектестингу як необхідного методологічного продовження аналітичних метрик якості прогнозу.

Досягнення поставленої мети передбачає аналіз сучасних підходів до використання методів ML у задачах прогнозування дохідності активів, формування безперервних alpha-сигналів на основі щоденних фінансових даних із використанням агрегованих внутрішньоденних ознак, а також дослідження їхньої практичної інвестиційної цінності в межах середньострокового інвестиційного горизонту. Особлива увага приділяється узгодженню результатів статистичної оцінки прогнозних моделей з результатами портфельного бектестингу, що дає змогу оцінити стійкість та економічну доцільність застосування запропонованого підходу.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Запропонований у дослідженні підхід ґрунтується на ідеї інтеграції методів квантитативного аналізу та ML у єдиний модельний комплекс, зорієнтований на формування прогнозних alpha-сигналів і подальшу оцінку їх інвестиційної цінності в портфельному контексті. На відміну від класичних портфельних моделей, у яких очікувана дохідність активів задається статично або оцінюється на засадах історичних середніх значень, у цьому дослідженні очікувана дохідність розглядається як динамічна величина, що може бути оцінена за допомогою ML-моделей на основі поточної ринкової інформації.

Ключовим елементом запропонованого підходу є чітке розмежування ролей між окремими компонентами модельного процесу. Методи ML використовуються лише для побудови alpha-сигналів, тобто прогнозних оцінок очікуваної

величини дохідності фінансових активів на заданому середньостроковому часовому горизонті. Формування торговельних або інвестиційних рішень безпосередньо ML-моделями не передбачається. Натомість alpha-сигнали виступають інформаційним входом для подальшого портфельного аналізу.

У межах підходу реалізується послідовний ланцюг оброблення даних, який передбачає декілька логічно пов'язаних етапів: збір і підготовку фінансових даних, побудову системи ознак, навчання ML-моделей, генерацію alpha-сигналів, формування портфельних рішень і проведення портфельного бектестингу. Така модульна структура дає змогу забезпечити прозорість дослідження, контроль потенційних методологічних помилок і надає можливість адаптації окремих компонентів без порушення цілісності всієї системи.

Особливістю підходу є орієнтація на середньостроковий інвестиційний горизонт, що відповідає практиці квантитативного управління портфелями. Частота прийняття інвестиційних рішень є істотно нижчою за частоту оновлення ринкових даних, що дає змогу використовувати щоденну інформацію та агреговані внутрішньоденні показники як джерело сигналів, уникаючи при цьому специфічних обмежень і витрат, характерних для високочастотної або внутрішньоденної торгівлі.

Важливим концептуальним положенням є твердження, що якість alpha-сигналів не може бути адекватно оцінена виключно за допомогою аналітичних метрик прогнозної точності. Навіть статистично стабільні сигнали можуть не мати практичної інвестиційної цінності чи втрачати ефективність у портфельному застосуванні. Тому портфельний бектестинг розглядається як необхідний етап модельного процесу, що доповнює аналітичну оцінку ML-моделей і дає змогу перевірити їх здатність генерувати стійкі економічні результати з урахуванням динаміки ринку та взаємодії між активами.

Загальна логіка алгоритмічного процесу

Алгоритмічний процес реалізується у вигляді послідовності етапів обробки (pipeline), що наведено на **рис. 1**.

Кожен етап виконує визначену функцію та інтегрований у єдину часово узгоджену систему

прийняття рішень. Наукова новизна полягає у формалізованій інтеграції часово-залежного (time-aware) ML-навчання та портфельного бектестингу в єдину квантитативну експериментальну систему.

Розглянемо структурну схему модельного комплексу у вигляді функціональних блоків і потоків даних між ними (**рис. 2**).

У **табл. 1** наведена інформація щодо інформаційних потоків, якими обмінюються блоки системи. Функціональне навантаження компонентів системи наведено в **табл. 2**.

Вхідні дані та простір ознак (Data Description & Feature Space). Емпіричною базою дослідження є щоденні фінансові часові ряди ліквідних інструментів фондового ринку США (акції та індексні активи). Аналіз здійснюється на середньостроковому горизонті 1–12 тижнів із використанням щоденних даних (Open, High, Low, Close). Внутрішньоденні значення застосовуються винятково для побудови агрегованих характеристик.

Простір ознак формується як структурована система кількісних показників динаміки активів і охоплює три групи:

- price-based: лагові дохідності та кумулятивні зміни цін;
- volatility-based: історична волатильність і дисперсійні характеристики;
- intraday-aggregated: діапазон найвищої та найнижчої цін (High — Low) та рух відкриття до закриття (Open — Close).

Усі ознаки на момент t формуються виключно на основі інформації $\leq t$, що забезпечує часову коректність моделювання.

Побудова ML-based alpha-сигналів. У сучасній квантитативній літературі з ML в asset pricing домінує постановка задачі прогнозування очікуваної (excess) дохідності як регресії, а не як бінарної класифікації напрямку руху ціни. У канонічній праці S. Gu, B. Kelly та D. Xiu очікувані премії за ризик/надлишкові дохідності оцінюються саме як регресійна задача (expected returns forecasting), що дає змогу безпосередньо інтерпретувати вихід моделі як кількісне оцінювання очікуваної дохідності та використовувати її для формування портфельних рішень [1]. Аналогічно, сучасні дослідження з прогнозування дохідностей на горизонтах 1–3–12 місяців (типових

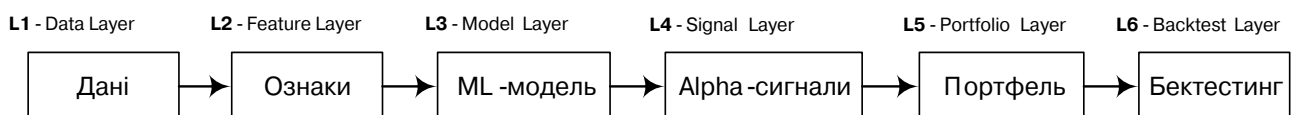


Рис. 1. Алгоритмічний процес роботи з моделлю

L1 - Data Layer

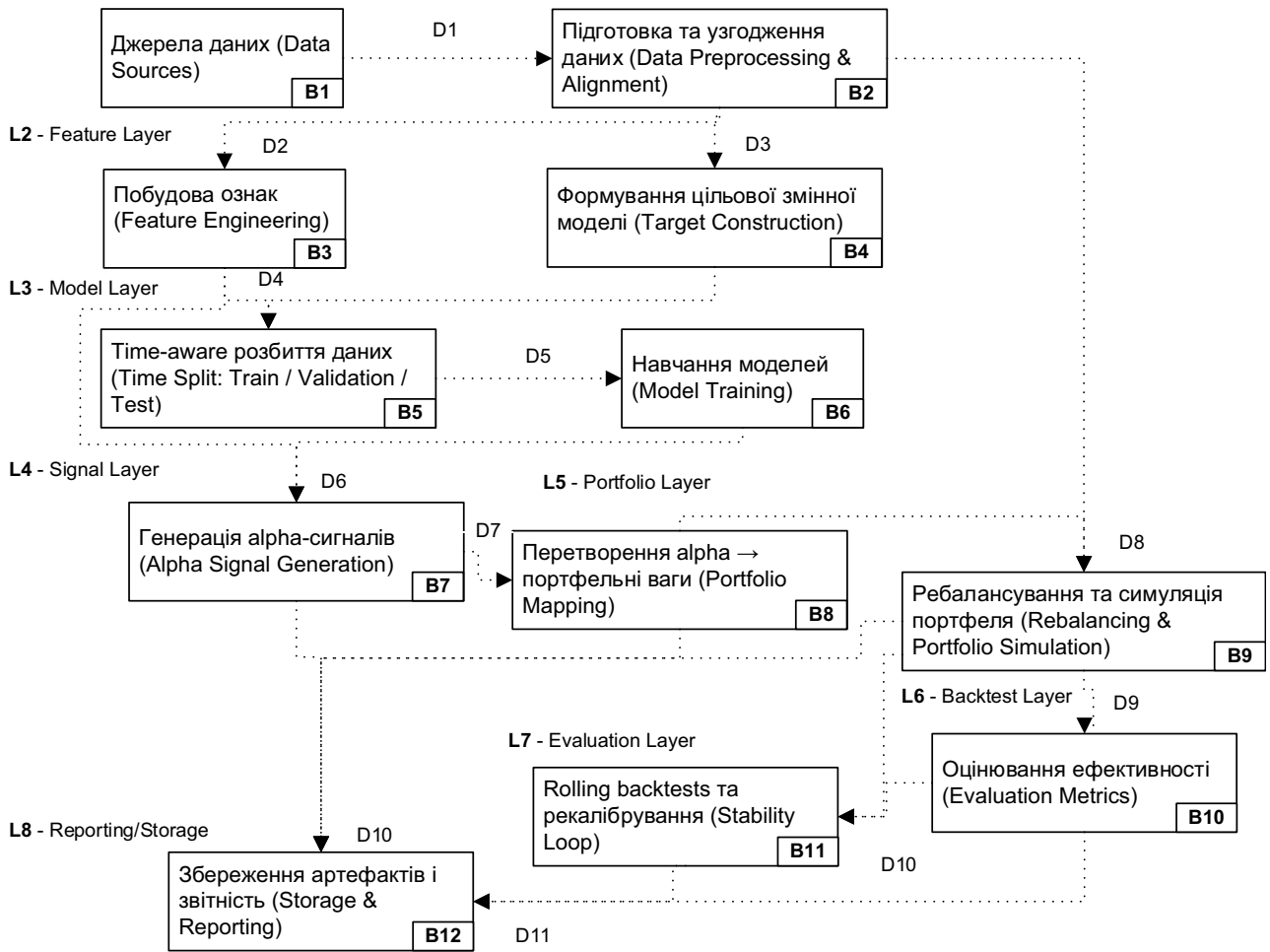


Рис. 2. Структурна схема модельного комплексу

Таблиця 1

Інформаційні потоки даних

Інформаційні потоки	Перетворення потоку
D1	$\mathcal{D}_0 \rightarrow \mathcal{D}_1$ — первинні дані перетворюються на очищені та узгоджені часові ряди
D2	$\mathcal{D}_1 \rightarrow X(t)$ — очищені ціни формують простір ознак
D3	$\mathcal{D}_1 \rightarrow y(t, H)$ — очищені ціни задають цільову змінну прогнозування
D4	$\{X, y\} \rightarrow \mathcal{S}$ — ознаки та цільова змінна формують time-aware спліти
D5	$\mathcal{S} \rightarrow M(t)$ — на основі сплітів формується навчена модель
D6	$\{M(t), X(t)\} \rightarrow \alpha(t)$ — модель та актуальні ознаки генерують alpha-сигнал
D7	$\alpha(t) \rightarrow w(t)$ — alpha-сигнал трансформується в портфельні ваги
D8	$\{w(t), \mathcal{D}_1\} \rightarrow \{R_p(t), V(t)\}$ — ваги та реалізовані дохідності формують динаміку портфеля
D9	$\{R_p(t), V(t)\} \rightarrow Met$ — портфельні результати перетворюються на метрики ефективності
D10	$\{R_p, Met\} \rightarrow$ тригер рекалібрування (recalibration trigger) – результати та метрики ініціюють перевірку стабільності та рекалібрування
D11	$\{\alpha, w, R_p, Met\} \rightarrow \mathcal{A}$ — ключові артефакти зберігаються та формують звітність

Компоненти системи та їх функціональне навантаження

Блок	Функціональне навантаження
B1	Агрегація та первинна уніфікація ринкових даних за активами
B2	Синхронізація дат; очищення пропусків; перевірка аномалій; формування базових дохідностей
B3	Обчислення price-based, volatility-based та intraday-aggregated ознак із дотриманням правила $\leq t$
B4	Обчислення майбутньої дохідності $y(t, H)$; часовий зсув таргету; узгодження X та y
B5	Часовий поділ вибірки; формування схем ковзного прогнозу (walk-forward схем); визначення ковзних/розширюваних (rolling/expanding) вікон
B6	Навчання ML-моделі; підбір гіперпараметрів; фіксація версії моделі для моменту t
B7	Прогноз очікуваної дохідності $\alpha_{i,t}(H)$ для кожного активу
B8	Ranking активів; нормалізація; застосування обмежень (концентрація, тільки довгі позиції (long-only) тощо)
B9	Застосування правил ребалансування; контроль turnover; урахування транзакційних витрат; обчислення портфельної дохідності
B10	Розрахунок кумулятивної дохідності (cumulative return), волатильності, коефіцієнта Шарпа (Sharpe ratio), максимального просідання (max drawdown)
B11	Серія ковзних бектестів (rolling-бектестів); моніторинг деградації; тригер оновлення моделі
B12	Логування; збереження конфігурацій; формування таблиць і графіків

для середньострокових квант-стратегій) також формулюють задачу як прогнозування величини дохідності (point forecasts) і оцінюють моделі за регресійними метриками (MSE) [7].

Постановка задачі як регресії очікуваної дохідності

У межах даного дослідження alpha-сигнал трактується як безперервна (continuous) прогнозна величина, що відповідає оцінці очікуваної дохідності активу на фіксованому горизонті H (1–12 тижнів). Типова формалізація:

$$\alpha_{i,t}(H) = E[r_{i,t \rightarrow t+H} | x_{i,t}], \quad (1)$$

де $x_{i,t}$ — вектор ознак (price-based, volatility-based, intraday-aggregated), а $r_{i,t \rightarrow t+H}$ — майбутня (excess) дохідність за горизонтом H . Така постановка є узгодженою з підходами емпіричного asset pricing, де ML застосовується для оцінювання очікуваних премій за ризик у крос-секції активів і в часі [1], а також із сучасними ML-підходами до прогнозування дохідностей на різних середньострокових горизонтах [7].

Популярна постановка “вгору/вниз” (класифікація) у фінансових задачах є інтуїтивною, однак методологічно слабшою для задач портфельного управління, де ключовою змінною є очікувана величина дохідності (expected return magnitude), а не лише знак. Класифікацію можна описати так:

- втрачає інформацію про *масштаб* очікуваної дохідності (сильні та слабкі сигнали потрапляють в одну категорію);
- потребує довільного вибору порогу (threshold) та/або перетворення прогнозу на торгове рішення, що підвищує нестабільність результатів між вибірками;
- складніше інтегрується в портфельні процедури, де ваги активів природно пов’язані з безперервними очікуваними дохідностями та ризиком.

Натомість регресійна постановка безпосередньо підтримує центральну ідею статті: ML використовується для побудови безперервних alpha-сигналів, а їх практична інвестиційна цінність оцінюється лише в портфельному бектестингу. Такий акцент є типовим для сучасної критичної дискусії щодо коректного використання ML в asset pricing: важливо не лише спрогнозувати, а й методологічно правильно вбудувати прогноз у процес побудови портфеля та перевірки стійкості результатів [8].

Клас моделей для побудови alpha-сигналів. З урахуванням вимог відтворюваності та інтерпретованості (для статті фахового рівня та бакалаврського диплома) доцільно розглядати декілька класів моделей, які в літературі використовуються як базові та/або конкурентні для прогнозування очікуваних дохідностей:

1) лінійні та регуляризовані моделі (baseline/benchmark) – регуляризовані регресії (Ridge/Lasso/Elastic Net) широко застосовуються як сильний базовий рівень у задачах прогнозування дохідностей у високовимірному просторі ознак, оскільки вони контролюють перенавчання та частково вирішують проблему мультиколінеарності предикторів. У підході S. Gu, B. Kelly та D. Xiu лінійні/регуляризовані моделі виступають важливою частиною порівняльного аналізу методів [1], а сучасні дослідження із прогнозування дохідностей також використовують їх як стандартний benchmark [7];

2) tree-based моделі (Random Forest/Gradient Boosting) — деревні методи (tree-based methods) та градієнтний бустинг є стандартним інструментом для виявлення нелінійностей та взаємодій між предикторами без ручного задання функціональної форми. У емпіричному asset pricing показано, що саме моделі, здатні захоплювати нелінійні взаємодії (зокрема tree-based і NN), забезпечують суттєві прирости прогновної та економічної ефективності порівняно з суто лінійними підходами [1]. У сучасних прикладних роботах з прогнозування дохідностей також типово порівнюють tree-based ансамблі з лінійними моделями та нейромережами [7];

3) ensemble-підхід — у прикладному quant-процесі ансамблювання використовується переважно як механізм підвищення стабільності прогнозів (зменшення дисперсії моделі) та зниження чутливості до специфічного вибору алгоритму. Важливо, що в asset pricing методологічні рішення (зокрема дизайн експерименту, схема валідації, період навчання та перевірки) можуть суттєво впливати на результати навіть за фіксованого класу моделей. З огляду на це, ансамбль доцільно розглядати як інструмент стійкості (robustness), а не як самоціль [8].

Оркестрація моделей та алгоритмічний pipeline (Model Orchestration & Workflow). Центральним елементом запропонованого підходу є формування узгодженого алгоритмічного pipeline, що забезпечує коректну інтеграцію методів машинного навчання в процес квантитативного портфельного аналізу. На відміну від фрагментарного використання ML-моделей для прогнозування окремих показників, у цьому дослідженні реалізується послідовний і замкнений робочий цикл, що імітує реальні умови прийняття інвестиційних рішень.

Навчання моделей у часовому контексті. З огляду на нестационарність фінансових рядів навчання організовується в послідовному часовому режимі. Застосовуються схеми rolling window або expanding window, у межах яких модель на кожному кроці часу використовує лише

інформацію, доступну на момент прийняття рішення.

Rolling window підвищує адаптивність до зміни ринкових умов, тоді як expanding window забезпечує стабільність оцінок завдяки накопиченню довгострокової інформації. Вибір схеми розглядається як частина експериментального дизайну.

Train-вибірка застосовується для оцінювання параметрів, validation — для вибору гіперпараметрів, test — для фінальної портфельної оцінки. Такий підхід забезпечує коректну оцінку позавибіркової (out-of-sample) ефективності.

Генерація alpha-сигналів. Alpha-сигнали формуються послідовно в часі: для кожного моменту t модель генерує прогноз очікуваної дохідності на заданому горизонті, використовуючи лише інформацію $\leq t$. Це усуває look-ahead bias та забезпечує інформаційну узгодженість між етапами ML і портфельного формування.

Інтеграція з портфельним бектестингом. Бектестинг інтегрований у pipeline та виконується для кожного циклу навчання і генерації сигналів. Оцінювання здійснюється на рівні портфельної динаміки, що дає змогу аналізувати не лише точність прогнозів, а й їхню реальну інвестиційну ефективність у часі.

Формування портфельних рішень на основі alpha-сигналів (Portfolio Construction). Ключовим етапом запропонованого підходу є перехід від прогнозних ML-based alpha-сигналів до конкретних портфельних рішень. Саме на цьому етапі відбувається інтеграція результатів ML з інвестиційною логікою, що дає змогу уникнути використання ML як самоцільі та оцінювати його практичну цінність у реальному портфельному контексті.

У межах дослідження alpha-сигнали інтерпретуються як відносні оцінки очікуваної дохідності активів, а не як готові торговельні рекомендації. Тому формування портфеля розглядається як окрема задача, що базується на ранжуванні активів за величиною alpha та подальшому перетворенні цього ранжування в систему портфельних ваг. Такий підхід дає змогу зберегти інтерпретованість рішень і водночас уникнути надмірної складності, що властива оптимізаційним моделям із великою кількістю припущень.

Ранжування активів за alpha-сигналами. Першим кроком формування портфеля є ранжування активів на основі згенерованих alpha-сигналів. Для кожного моменту часу активи впорядковуються відповідно до прогнозованої очікуваної дохідності на заданому горизонті. Таке ранжування відображає відносну привабливість активів з точки зору ML-моделі та

створює підґрунтя для подальшого розподілу капіталу.

Використання ранжування, а не абсолютних значень α , дає змогу зменшити чутливість портфельних рішень до масштабу прогнозів і потенційних зсувів у рівні сигналів між різними періодами. Це особливо важливо в умовах нестационарності фінансових ринків, коли абсолютні значення прогнозованої дохідності можуть змінюватися разом із загальним ринковим фоном.

Нормалізація та побудова портфельних ваг. Після ранжування α -сигнали перетворюються в портфельні ваги за допомогою процедур нормалізації. У найпростішому випадку це може бути лінійна нормалізація, за якої ваги активів пропорційні відносному положенню активу в α -ранжуванні. Такий механізм забезпечує прозорий зв'язок між прогнозованою інформацією та портфельним розподілом капіталу.

Нормалізація виконує подвійну функцію: по-перше, вона гарантує дотримання бюджетного обмеження портфеля, а по-друге, знижує ризик надмірної концентрації капіталу в окремих активах унаслідок екстремальних значень α -сигналів. Завдяки цьому портфельні рішення залишаються стабільними навіть у періоди підвищеної волатильності прогнозів.

Обмеження та контроль портфельного ризику. Для забезпечення практичної реалізованості портфельних рішень застосовуються прості та інтерпретовані обмеження: максимальні та мінімальні ваги активів, контроль концентрації капіталу та, за потреби, симетричні умови для довгих і коротких позицій. Запропонований підхід не потребує розв'язання складних оптимізаційних задач і не спирається на припущення щодо стаціонарності коваріацій чи нормальності розподілів дохідностей.

У межах дослідження не використовується класична оптимізація Марковіца або її модифікації, що дає змогу уникнути залежності результатів від нестійких оцінок матриці коваріацій. Портфель розглядається як механізм агрегування α -сигналів, а не як результат формальної оптимізації.

Такий підхід забезпечує чітке розмежування між задачею прогнозування та задачею управління капіталом і дає змогу інтерпретувати портфель як інструмент трансформації ML-прогнозів у практичні інвестиційні рішення з урахуванням заданих обмежень [10].

Портфельний бектестинг і оцінювання ефективності (Portfolio Backtesting & Evaluation). Портфельний бектестинг у межах цього дослідження розглядається як ключовий інструмент перевірки практичної інвестиційної цінності ML-

based α -сигналів. На відміну від оцінювання моделей лише за аналітичними метриками прогнозованої точності, бектестинг надає можливість відтворити послідовність реальних рішень інвестора у часі та оцінити, чи трансформуються прогнозовані сигнали в стабільний економічний результат на рівні портфеля [12].

Методологічно бектестинг реалізується як замкнений цикл, у якому α -сигнали генеруються на основі інформації, доступної на момент прийняття рішення, після чого на їх основі формується портфель, виконується ребалансування та фіксується портфельна дохідність за наступний інтервал часу. Отриманий часовий ряд портфельних дохідностей використовується для розрахунку показників ефективності та ризику.

Загальна схема проведення бектестингу. Бектестинг організовується як послідовність кроків, що повторюються для кожного моменту ребалансування. На кроці t виконуються такі операції:

1) оновлення даних і ознак — формується набір ознак $x_{i,t}$ для кожного активу на основі даних до моменту t включно;

2) навчання/оновлення ML-моделі (за rolling або expanding схемою): модель оцінюється на історичному вікні даних, що закінчується моментом t ;

3) генерація α -сигналів — для кожного активу отримується $\alpha_{i,t}(H)$ — прогноз очікуваної дохідності на горизонті H ;

4) побудова портфельних ваг $w_{i,t}$ на основі α (ranking \rightarrow normalization \rightarrow constraints);

5) ребалансування портфеля — портфель переходить до нових ваг із урахуванням обраної частоти ребалансування;

6) обчислення реалізованої портфельної дохідності на інтервалі $(t, t+\Delta)$ та оновлення історії портфельних результатів.

Завдяки такій схемі бектестинг забезпечує причинно-часову коректність: рішення у момент t не можуть залежати від інформації, що з'явиться після t . Це є критично важливим для уникнення завищених результатів і забезпечення відтворюваності дослідження.

Розрахунок портфельних дохідностей у бектесті. Головним вихідним результатом бектестингу є часовий ряд портфельних дохідностей $R_{p,t}$, що формується на кожному інтервалі між ребалансуваннями. У базовому випадку портфельна дохідність на періоді $(t, t+\Delta)$ визначається як зважена сума дохідностей активів за цей період:

$$R_{p,t \rightarrow t+\Delta} = \sum_i w_{i,t} \cdot r_{i,t \rightarrow t+\Delta}, \quad (2)$$

де $w_{i,t}$ — ваги портфеля після ребалансування у момент t , а $r_{i,t \rightarrow t+\Delta}$ — реалізована дохідність активу на відповідному інтервалі.

Для забезпечення практичності моделювання портфельного процесу допускається врахування простих і інтерпретованих елементів, зокрема:

- обмежень на ваги (щоб уникати надмірної концентрації);
- обмежень на зміну ваг між періодами (як механізм контролю turnover);
- умовного моделювання транзакційних витрат як параметра чутливості (за потреби).

Причому ключовим є не деталізація торговельної інфраструктури, а методологічно коректне відтворення послідовності “сигнал → рішення → результат” у часі.

Метрики оцінювання ефективності та ризику. Оцінювання результатів бектестингу здійснюється на основі набору метрик, що відображають як прибутковість, так і ризикові характеристики портфеля. Вибір метрик обмежується базовими показниками, які легко інтерпретуються та є достатніми для порівняння альтернативних моделей і варіантів pipeline.

Кумулятивна дохідність (Cumulative Return). Кумулятивна дохідність характеризує накопичений результат стратегії за весь період бектесту. Вона визначається як нарощення капіталу при послідовному реінвестуванні:

$$V_t = V_0 \cdot \prod_k (1 + R_{p,k}), \quad (3)$$

де V_t — вартість портфеля у момент t , а $R_{p,k}$ — портфельні дохідності на інтервалах ребалансування. Кумулятивна крива капіталу дає змогу візуально оцінити стабільність зростання та наявність кризових періодів.

Волатильність (Volatility). Волатильність використовується як базовий вимір ризику, що характеризує мінливість портфельних дохідностей. Вона визначається як стандартне відхилення R_p на відповідній частоті (тижневій/місячній), з можливістю приведення до річної шкали для порівняльності:

$$\sigma_p = \text{std}(R_p). \quad (4)$$

Волатильність важлива для розуміння того, якою “ціною” (у вигляді коливань капіталу) досягається кумулятивний результат.

Коефіцієнт Шарпа (Sharpe ratio). Sharpe ratio застосовується як компактний показник співвідношення “дохідність/ризик”, але без надмірної інтерпретації як універсального критерію. У базовому вигляді:

$$SR = \text{mean}(R_p - r_f) / \text{std}(R_p - r_f), \quad (5)$$

де r_f — безризикова ставка на відповідній частоті. У практичному експериментальному дизайні допускається використання спрощеної постановки з $r_f \approx 0$ для коротких інтервалів або для порівняння моделей за однакових умов.

Важливо, що Sharpe ratio розглядається як один із декількох показників, а не як єдина метрика якості.

Максимальне просідання (Maximum Drawdown). Максимальне просідання (drawdown) вимірює найбільше падіння капіталу від локального максимуму до наступного мінімуму:

$$DD_t = (Peak_t - V_t) / Peak_t, \quad (6)$$

$$MaxDD = \max(DD_t).$$

Цей показник є критично важливим у прикладному контексті, оскільки відображає найгірший сценарій втрати капіталу в межах бектесту та дає змогу оцінити “психологічну” та ризик-менеджерську прийнятність стратегії.

Інтерпретація результатів і критерії порівняння. Результати бектестингу інтерпретуються як комплексна характеристика інвестиційної доцільності alpha-сигналів. Порівняння альтернативних підходів (різні моделі, різні набори ознак, різні схеми rolling/expanding) здійснюється не лише за рівнем прибутковості, а й за профілем ризику:

- вища кумулятивна дохідність при контрольованій волатильності;
- вищий Sharpe ratio за схожої стабільності;
- менше максимальне просідання або більш “плавна” крива капіталу.

Окрім того, у межах середньострокового підходу важливим є аналіз чутливості результатів до частоти ребалансування та до вибору прогнозного горизонту. Це дає змогу оцінити, чи є ефективність сигналів стійкою властивістю підходу, а не випадковим результатом конкретної конфігурації експерименту.

Таким чином, портфельний бектестинг у запропонованому дослідженні виконує роль ключового методологічного механізму, який забезпечує перехід від статистичного оцінювання ML-моделей до оцінювання їхньої реальної інвестиційної цінності.

Стійкість сигналів та адаптація до ринкових режимів (Stability & Recalibration)

Однією з ключових характеристик фінансових ринків є їх динамічність і наявність різних ринкових режимів, що відрізняються рівнем волатильності, кореляційною структурою активів, ліквідністю та домінантними драйверами дохідності [11]. У таких умовах навіть статистично стабільні та економічно обґрунтовані alpha-сигнали можуть із часом втрачати ефективність або демонструвати суттєве погіршення портфельних результатів. Це зумовлює необхідність розглядати прогнозні сигнали не як стаціонарні характеристики активів, а як умовні оцінки, чутливі до поточного ринкового середовища.

Порівняння результатів моделей (2015–2023)

Модель	Середня річна дохідність	Волатильність	Sharpe ratio	Max Drawdown
Ridge	11,2 %	16,5 %	0,68	–18,4 %
Random Forest	13,6 %	17,8 %	0,76	–19,7 %
Equal-weight benchmark	8,9 %	15,9 %	0,56	–22,1 %

У межах запропонованого підходу визнається, що ефективність ML-based alpha-сигналів не є постійною в часі та може змінюватися внаслідок переходу між ринковими режимами. Такі зміни можуть бути пов'язані з макроекономічними шоками, фазами ринкових циклів, періодами підвищеної або зниженої волатильності, а також зі структурними змінами в поведінці учасників ринку. Відповідно, оцінювання сигналів лише на фіксованому історичному інтервалі не є достатнім для висновків щодо їх довгострокової інвестиційної придатності.

Регулярна переоцінка та повторне калібрування моделей. Для забезпечення адаптивності до змін ринкових умов у дослідженні передбачається регулярна переоцінка та повторне калібрування ML-моделей [9], що використовуються для генерації alpha-сигналів. У рамках алгоритмічного pipeline це реалізується через послідовне оновлення моделей у rolling або expanding window режимі, де параметри моделі оцінюються на актуальному підборі історичних даних.

Такий підхід дає змогу, з одного боку, враховувати нову інформацію та зміну статистичних властивостей ринку, а з іншого — уникати надмірної реакції на короткострокові флуктуації. Повторне калібрування моделей розглядається не як виняткова процедура у відповідь на погіршення результатів, а як невіддільний елемент системного квантитативного процесу.

Rolling backtests як інструмент аналізу стійкості. Для оцінювання стабільності alpha-сигналів і портфельних результатів у часі застосовується підхід rolling backtests, за якого бектестинг виконується на послідовних перекривних часових інтервалах. Кожен такий інтервал дає змогу оцінити поведінку стратегії в різних ринкових умовах і зменшити ризик узагальнення результатів, отриманих на окремому сприятливому періоді.

Rolling backtests дають змогу аналізувати динаміку ключових метрик ефективності — кумулятивної дохідності, волатильності, Sharpe ratio та максимальних просідань — у різних часових підвибірках. Це допомагає виявляти

періоди деградації сигналів, оцінювати тривалість таких фаз і перевіряти, чи відновлюється ефективність після повторного калібрування моделей.

Емпіричні результати квантитативного моделювання.

Для демонстрації практичної придатності запропонованого підходу було проведено емпіричне тестування на вибірці з 20 ліквідних інструментів фондового ринку США за період 2015–2023 років. Прогнозний горизонт становив чотири тижні, частота ребалансування — щотижнева. Навчання моделей здійснювалося у режимі rolling window із використанням щоденних даних.

У межах експерименту було порівняно дві специфікації моделей:

- регуляризована лінійна регресія (Ridge) як базова модель;
- Random Forest як нелінійний ансамблевий підхід.

Оцінювання ефективності здійснювалося на основі портфельного бектестингу із застосуванням стандартних ризик-орієнтованих метрик, результати якого наведено в **табл. 3**.

Обидві ML-моделі демонструють покращення ризик-скоригованої ефективності в порівнянні з рівноваговим бенчмарком. Random Forest забезпечує вищу середню дохідність та Sharpe ratio, що свідчить про здатність враховувати нелінійні взаємозв'язки між ознаками. Водночас регуляризована лінійна модель демонструє стабільніші результати та нижчу чутливість до ринкових коливань.

Отримані результати підтверджують практичну доцільність інтеграції ML-based alpha-сигналів у портфельні стратегії в межах середньострокового квантитативного підходу.

ВИСНОВКИ

У межах дослідження розроблено та реалізовано інтегрований квантитативний підхід до формування ML-based alpha-сигналів та їхньої перевірки в портфельному контексті. На відміну від робіт, що обмежуються оцінюванням прогновної точності моделей, запропонований

підхід поєднує регресійну постановку задачі прогнозування очікуваної дохідності з процедурою послідовного портфельного бектестингу.

Емпіричні результати на вибірці ліквідних акцій американського ринку підтверджують, що використання ML-based alpha-сигналів дає змогу підвищити ризик-скориговану дохідність портфеля в порівнянні з наївною стратегією рівновагового розподілу. Зокрема alpha-орієнтовані портфелі демонструють вищу кумулятивну дохідність і Sharpe ratio за порівнянного рівня волатильності та контрольованого максимального просідання.

Отримані результати свідчать про те, що економічна цінність ML-моделей проявляється не стільки в покращенні статистичних метрик прогнозу, скільки у їхній здатності генерувати стійкий портфельний ефект у середньостроковому горизонті за умов регулярного оновлення моделей і контролю ризику.

Водночас дослідження підтверджує, що ефективність alpha-сигналів є часово-змінною величиною, що потребує систематичного моніторингу та рекалібрування моделей. Таким чином, запропонований підхід може розглядатися як методологічне підґрунтя для побудови адаптивних квантитативних стратегій, у яких машинне навчання інтегрується в контрольований портфельний процес.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gu S. Empirical Asset Pricing via Machine Learning / S. Gu, B. Kelly, D. Xiu // *The Review of Financial Studies*. — 2020. — Vol. 33. — Issue 5. — P. 2223–2273. DOI: <https://doi.org/10.1093/rfs/hhaa009>.
2. Bagnara M. Asset Pricing and Machine Learning: A critical review / Matteo Bagnara // *Journal of Economic Surveys*. — 2024. — Vol. 38. — P. 27–56. DOI: [10.1111/joes.12532](https://doi.org/10.1111/joes.12532).
3. Lopez de Prado M. *Advances in Financial Machine Learning* / M. Lopez de Prado. — Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2018. — 400 p.
4. Harvey C. R. Backtesting / C. R. Harvey, Y. Liu. — Available at SSRN 2345489. — 2015. — Jul 28.
5. Bailey D. H. The Sharpe ratio efficient frontier / D. H. Bailey, M. López de Prado // *The Journal of Risk*. — 2012. — Vol. 15. — No. 2. — P. 3–44. DOI: <https://doi.org/10.21314/JOR.2012.255>.
6. Nadler P. Empirical Asset Pricing with Functional Factors / Philip Nadler, Alessio Sancetta // *Journal of Financial Econometrics*. — 2023. — Vol. 21. — Issue 5. — P. 1258–1281. DOI: <https://doi.org/10.1093/jfinec/nbac003>.
7. Wang Z. Machine learning for stock return prediction: Transformers or simple neural networks? / Z. Wang // *Finance Research Letters*. — 2025. — Vol. 86. — Part F. — P. 108783. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.frl.2025.108783>.
8. Giglio S. Asset pricing with omitted factors / S. Giglio, D. Xiu // *Journal of Political Economy*. — 2021. — Vol. 129. — No. 7. — P. 1947–1990. — Access mode: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/714090>.

9. Identifying the system of value factors of green consumer choice / L. Potrashkova, V. Zaruba, D. Raiko, O. Yevsyeyev // *Innovative Marketing*. — 2024. — Vol. 20. — Issue 1. — P. 199–211. DOI: [http://dx.doi.org/10.21511/im.20\(1\).2024.17](http://dx.doi.org/10.21511/im.20(1).2024.17).
10. Modern Approach To Modeling Of Efficiency Of Financial Market Based On Methods Of Dynamic Programming / O. Maslyhan, T. Shabelnyk, O. Korolovych, N. Liba // *Ефективна економіка*. — 2022. — No. 9. DOI: <http://doi.org/10.32702/2307-2105.2022.9.7>.
11. Influence of regional financial market models on the structure of global financial assets / O. Bulatova, T. Shabelnyk, T. Marena, N. Reznikova // *Advances in Economics, Business and Management Research (AEBMR): 6th International Conference on Strategies, Models and Technologies of Economic Systems Management (SMTESM 2019)*. Proceedings of the International Scientific Conference. — 2019. — Vol. 95. — P. 339–345. DOI: <https://doi.org/10.2991/smtesm-19.2019.55>
12. Shabelnyk T. V. Approaches to optimize investment risks / T. V. Shabelnyk / *Problems of Decision Making Under Uncertainties: Proceedings of the International Conference..* — 2018.
13. Wang Y. Predicting Stock Prices Based on Machine Learning to Build Self-adaptive Trading Strategy / Y. Wang, P. Huang, J. Luo // *Computational Economics*. — 2025. DOI: [10.1007/s10614-025-11054-4](https://doi.org/10.1007/s10614-025-11054-4).
14. Forecasting high-frequency excess stock returns via data analytics and machine learning / E. Akyildirim, D. Khuong Nguyen, A. Sensoy, M. Šikić // *International Review of Financial Analysis*. — 2023. — Vol. 29. — Issue 1. — P. 22–75. DOI: <https://doi.org/10.1111/eufm.12345>.

REFERENCES

1. Gu, S., Kelly, B., & Xiu, D. (2020). Empirical Asset Pricing via Machine Learning. *The Review of Financial Studies*, 33 (5), 2223–2273. DOI: <https://doi.org/10.1093/rfs/hhaa009>.
2. Bagnara, M. (2024). Asset Pricing and Machine Learning: A critical review. *Journal of Economic Surveys*, 38, 27–56. DOI: [10.1111/joes.12532](https://doi.org/10.1111/joes.12532).
3. Lopez de Prado, M. (2018). *Advances in Financial Machine Learning*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 400 p.
4. Harvey, C. R., & Liu, Y. (2015). *Backtesting*. Available at SSRN 2345489.
5. Bailey, D. H., & Lopez de Prado, M. (2012). The Sharpe ratio efficient frontier. *The Journal of Risk*, 15 (2), 3–44. DOI: <https://doi.org/10.21314/JOR.2012.255>.
6. Nadler, P., & Sancetta, A. (2023). Empirical Asset Pricing with Functional Factors. *Journal of Financial Econometrics*, 21 (5), 1258–1281. DOI: <https://doi.org/10.1093/jfinec/nbac003>.
7. Wang, Z. (2025). Machine learning for stock return prediction: Transformers or simple neural networks? *Finance Research Letters*, 86 (Part F), 108783. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.frl.2025.108783>.
8. Giglio, S., & Xiu, D. (2021). Asset pricing with omitted factors. *Journal of Political Economy*, 129 (7), 1947–1990. Retrieved from: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/714090>.
9. Potrashkova, L., Zaruba, V., Raiko, D., & Yevsyeyev, O. (2024). Identifying the system of value factors of green consumer choice. *Innovative Marketing*, 20 (1), 199–211. DOI: [http://dx.doi.org/10.21511/im.20\(1\).2024.17](http://dx.doi.org/10.21511/im.20(1).2024.17).
10. Maslyhan, O., Shabelnyk, T., Korolovych, O., & Liba, N. (2022). Modern Approach to Modeling Of Efficiency

- ciency Of Financial Market Based On Methods Of Dynamic Programming. *Elektronnyi zhurnal "Efektivna ekonomika"* [Electronic magazine "Effective Economy"], 9. DOI: <http://doi.org/10.32702/2307-2105.2022.9.7>.
11. Bulatova, O., Shabelnyk, T., Marena, T., & Reznikova, N. (2019). Influence of regional financial market models on the structure of global financial assets. *Advances in Economics, Business and Management Research (AEBMR)*, 95. 6th International Conference on Strategies, Models and Technologies of Economic Systems Management (SMTESM 2019). Proceedings of the International Scientific Conference, 95. P. 339-345. DOI: <https://doi.org/10.2991/smtesm-19.2019.55>.
 12. Shabelnyk, T. V. (2018). Approaches to optimize investment risks. Proceedings of the International Conference "Problems of Decision Making Under Uncertainties" (Conference Materials).
 13. Wang, Y., Huang, P., & Luo, J. (2025). Predicting Stock Prices Based on Machine Learning to Build Self-adaptive Trading Strategy. *Computational Economics*. DOI: 10.1007/s10614-025-11054-4.
 14. Akyildirim, E., Nguyen, D. K., Sensoy, A., & Šikić, M. (2023). Forecasting high-frequency excess stock returns via data analytics and machine learning. *International Review of Financial Analysis*, 29 (1), 22-75. DOI: <https://doi.org/10.1111/eufm.12345>.

T. V. SHABELNYK, D. Sc. in Economics, Professor
S. O. YEVSIEYEVA, Student

QUANTITATIVE MODELING OF PORTFOLIO STRATEGIES USING MACHINE LEARNING-BASED ALPHA SIGNALS AND BACKTESTING

Abstract. This paper proposes a quantitative framework for constructing ML-based alpha signals and integrating them into a portfolio backtesting procedure over a medium-term investment horizon. The empirical analysis relies on daily financial time series of liquid equity market instruments, providing statistically consistent input data for quantitative modeling. A structured feature space is constructed, incorporating price-based, volatility-based, and intraday-aggregated characteristics. Model training is implemented in a time-aware setting using rolling or expanding window schemes and strict chronological separation of the training, validation, and test sets, ensuring robust quantitative out-of-sample evaluation and minimizing information leakage.

Alpha signals are generated at discrete rebalancing dates as numerical forecasts of expected returns over a predefined horizon and are directly embedded into portfolio construction. Performance is assessed through quantitative portfolio backtesting using standard risk-adjusted metrics, including returns, volatility, the Sharpe ratio, and maximum drawdown. The proposed algorithmic pipeline formalizes the interaction between machine learning and portfolio analysis and provides a methodological basis for the quantitative evaluation of the investment performance of ML-based strategies.

Keywords: quantitative modeling, machine learning, alpha signals, portfolio backtesting, equity market, mediumterm strategies, risk-adjusted performance metrics.

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

Шабельник Тетяна Володимирівна — д-р екон. наук, проф., завкафедри Економічної кібернетики і системного аналізу, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, просп. Науки, 9А, м. Харків, Україна, 61001; +38 (050) 176-84-78; Tanya.Shabelnik17@gmail.com; ORCID: 0000-0001-9798-391X

Євсєєва Софія Олексіївна — студентка, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, просп. Науки, 9А, м. Харків, Україна, 61001; +38 (068)805-58-00; Sofii.Yevsieieva@hneu.net; ORCID: 0009-0001-9496-6804

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shabelnyk T. V. — D. Sc. in Economics, Professor, Chair of the Department of Economic Cybernetics and Systems Analysis Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, 9A, Nauky Ave, Kharkiv, Ukraine, 61001; +38 (050) 176-84-78; Tanya.shabelnik17@gmail.com; ORCID: 0000-0001-9798-391X

Yevsyeyeva S. O. — Student, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, 9A, Nauky Ave., Kharkiv, Ukraine, 61001; +38 (050) 176-84-78; Sofii.Yevsieieva@hneu.net; ORCID: 0009-0001-9496-6804

Надійшла до редакції 21.02.2026

Прийнята до друку 09.03.2026



Б. В. ПАСЄКА, аспірант

КОНТЕКСТНО-ЗАЛЕЖНА АДАПТИВНА РЕДУКЦІЯ ТА ЕКВІВАЛЕНТУВАННЯ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З ПЕРЕМИКАННЯМ РЕЖИМІВ РУХУ ДЛЯ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Резюме. У статті розглянуто проблему практичної реалізації математичних моделей оптимального руху електромобіля з тяговим електроприводом змінного струму в системах підтримки прийняття рішень водієм. Обґрунтовано необхідність еквівалентування складних динамічних моделей для забезпечення обчислень у реальному часі. Запропоновано метод контекстно-залежної адаптивної редукції моделей, що передбачає автоматичне перемикання між спрощеними еквівалентними моделями залежно від поточного режиму руху транспортного засобу: горизонтальна ділянка, підйом, спуск, поворот. Сформульовано критерії еквівалентності редукованих моделей на основі мінімізації інтегральної похибки траєкторії швидкості та енергоспоживання. Розроблено структуру гібридної моделі з перемикальною логікою, що забезпечує безперервність траєкторії руху під час зміни режимів. Виконано комп'ютерне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink для порівняння обчислювальної складності повної та еквівалентних моделей. Результати моделювання підтверджують зменшення часу обчислень у 4–6 разів за умови збереження точності прогнозування параметрів руху на рівні 2–5 % відносної похибки. Визначено умови застосування кожної з еквівалентних моделей залежно від профілю дороги та динамічних характеристик руху. Запропоновано алгоритм інтеграції еквівалентних моделей у програмний застосунок системи підтримки прийняття рішень з можливістю подальшого розширення функціональності завдяки інтелектуальним алгоритмам прогнозування. Окреслено перспективи застосування розроблених моделей для створення адаптивних систем керування електромобілем на основі методів штучного інтелекту. Отримані результати можуть бути використані під час проектування інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень водієм електромобіля, спрямованих на підвищення енергоефективності, безпеки та адаптивності руху в реальних умовах експлуатації.

Ключові слова: електромобіль, еквівалентна модель, система підтримки прийняття рішень, адаптивна редукція, перемикання режимів, оптимальний рух, тяговий електропривод.

ВСТУП

Глобальний ринок електромобілів швидко зростає, водночас обсяги продажів зростають більш ніж на 55 % щороку. Зокрема у 2022 р. було продано понад 10 млн електромобілів [1]. Це означає, що технології управління енергією та системи підтримки водія мають бути досконалішими, ніж будь-коли. Ефективність цих систем залежить від низки чинників, що охоплюють конструкцію силового агрегату та алгоритми керування [2]. Сучасні методи управління енергією в гібридних та електричних транспортних засобах використовують комбінацію найефективніших методів контролю, методів машинного навчання та адаптивних алгоритмів [3]. Головні ідеї, що становлять основу цих методів, детально обговорюються в праці [4], автори якої зазначають, наскільки важливо збалансувати енергоефективність з операційною продуктивністю. Системи підтримки прийняття рішень

водія стають дедалі важливішими, оскільки вони можуть надавати рекомендації щодо найкращої швидкості для транспортного засобу, часу перемикання між режимами роботи і дистанції, яку транспортний засіб може проїхати в поточних дорожніх умовах [5]. Це висуває високі вимоги до математичних моделей, які використовуються, зокрема щодо їхньої ефективності. Існує чимало наукових праць, які окреслюють математичні моделі електромобілів. У деяких із них розглянуто енергетичні моделі, які враховують рекуперативне гальмування [6], методи оптимізації профілів швидкості на основі динамічного програмування для зменшення споживання енергії [7], алгоритми прогнозування споживання енергії, які враховують особливості рельєфу [8], методи зменшення порядку моделі на основі збалансованого усічення та проєкції підпростору Крилова [9], підходи до управління енергією гідравлічних гібридних систем із

використанням нейронних мереж [10], технології цифрових двійників і методи глибокого навчання для оцінювання стану батареї [11], а також методи стохастичного оптимального керування для паралельних гібридних електромобілів [12]. Однак тему адаптивного зменшення моделі для електромобілів із контекстно-залежним перемиканням режимів — з урахуванням динамічних коливань умов руху та спрощенням автоматичних коригувань рівня деталізації моделі на основі поточних вимог до точності та доступних обчислювальних ресурсів — не було ретельно розглянуто в науковій літературі, що вимагає формулювання нових методологічних засад.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Стрімке зростання глобального ринку електромобілів, що характеризується понад 55-відсотковим щорічним приростом продажів і досягненням позначки в 10 млн проданих одиниць у 2022 р., детермінує критичну потребу в розробленні високоефективних систем управління енергією та інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень водія, ефективність яких фундаментально залежить від точності математичних моделей силового агрегату та обчислювальної складності алгоритмів керування в режимі реального часу. Наявні в науковій літературі підходи до моделювання електромобілів охоплюють широкий методологічний спектр — від енергетичних моделей із рекуперативним гальмуванням і динамічного програмування для оптимізації швидкісних профілів до технік редукції порядку моделей на основі збалансованого усічення, проекції підпростору Крилова, застосування нейронних мереж для управління гібридними системами та використання технологій цифрових двійників для оцінювання стану акумуляторних батарей. Водночас у сучасних дослідженнях залишається невирішеною фундаментальна проблема створення адаптивних методів редукції моделей електромобілів, здатних до контекстно-залежного перемикання між режимами різної деталізації з урахуванням динамічно змінюваних умов експлуатації, поточних вимог до точності прогнозування та наявних обчислювальних ресурсів бортової електроніки.

Наукова проблема полягає в необхідності забезпечення балансу між суперечливими вимогами систем підтримки водія. З одного боку, потреба у високоточних прогнозах енергоспоживання, оптимальних швидкісних режимах і запасі ходу в реальному часі вимагає деталізованих моделей із високою обчислювальною складністю, а з іншого — обмежені бортові обчислювальні потужності та жорсткі часові об-

меження на прийняття рішень у динамічних дорожніх умовах вимагають спрощених моделей із прийнятною точністю. Відсутність методологічного апарату для автоматичного адаптивного коригування рівня деталізації математичних моделей залежно від поточного експлуатаційного контексту створює критичний розрив між теоретичними можливостями систем управління енергією та їхньою практичною реалізацією в серійних електромобілях, що зумовлює актуальність розроблення нових методологічних засад адаптивної редукції моделей з інтелектуальним перемиканням режимів для підвищення енергоефективності електротранспорту, збільшення запасу ходу та прискорення комерціалізації електромобілів як ключового елемента декарбонізації транспортного сектору.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Упровадження сучасних технологій електромобілів вимагає розроблення вдосконалених систем підтримки прийняття рішень, здатних розв'язувати складні задачі управління енергією за умови збереження придатності до функціонування в режимі реального часу. Глобальні кліматичні зобов'язання та стрімке поширення електрифікації транспорту зумовлюють необхідність пошуку нових підходів до поєднання методів редукції моделей з адаптивними стратегіями управління [1; 2]. Перед науковою спільнотою постає суттєва проблема щодо узгодження точності моделей з обчислювальними обмеженнями, притаманними вбудованим автомобільним системам, особливо для багаторежимних силових установок, що демонструють нелінійну перемикальну динаміку в різних експлуатаційних режимах [3; 4].

Для створення ефективних систем підтримки прийняття рішень щодо управління енергією електромобілів необхідно системно інтегрувати низку різних напрямів досліджень:

- 1) проаналізувати комплексні архітектури електричних і гібридних електричних транспортних засобів для визначення фундаментальних вимог до керування та обчислювальних обмежень, специфічних для реалізації вбудованих систем реального часу [2; 6];

- 2) імплементувати системи редукції порядку моделей, що зберігають суттєву нелінійну динаміку за одночасного зменшення обчислювальної складності, непотрібної для цілей керування, зокрема враховуючи поведінку перемикання режимів, характерну для сучасних силових установок [9];

- 3) розробити адаптивні стратегії еквівалентування, що динамічно коригують складність

моделі залежно від операційного контексту, вимог до горизонту прогнозування та миттєвої доступності обчислювальних ресурсів;

4) застосувати алгоритми машинного навчання для покращення прогностичних можливостей управління енергією шляхом виявлення закономірностей в історичних експлуатаційних даних та оцінювання умов руху в режимі реального часу [7; 8];

5) створити контекстно-залежні архітектури підтримки прийняття рішень, здатні інтелектуально обирати моделі відповідно до різних експлуатаційних ситуацій — від міських режимів “стоп-старт” до тривалого руху на автомагістралях [5];

6) верифікувати методи редукції через комплексні імітаційні дослідження, що порівнюють продуктивність моделей повного та зниженого порядку на репрезентативних їздових циклах із вимірюванням компромісів між точністю та ефективністю [11];

7) використати формулювання стохастичної оптимізації, що враховують невизначеність патернів руху та умов навколишнього середовища, для створення робастних стратегій, які підтримують гарантії продуктивності навіть за мінливих умов [12].

Значний обсяг досліджень присвячено методам керування гібридними електричними транспортними засобами, які заклали фундамент для оптимізації розподілу потужності. Зокрема A. Sciarretta та L. Guzzella представили вичерпний аналіз архітектур керування з акцентом на систематичному виборі режимів між двигунами внутрішнього згоряння та електродвигунами, що підвищує паливну ефективність завдяки процедурам на основі правил та оптимізаційним методам [4]. Реалізації еволюційних алгоритмів продемонстрували можливість застосування для створення онлайн-систем управління енергією для підзаряджуваних конфігурацій. Зокрема X. Qi та співавтори досягли показників, близьких до оптимальних, за допомогою налаштування параметрів відповідно до стилю водіння [5]. Праця T. Liu та співавторів, присвячена оптимізації алгоритмів випереджального перегляду на основі навчання з підкріпленням, продемонструвала позитивні результати в паралельних гібридних конфігураціях. Вони використовували прогнозовані умови руху для завчасного прийняття рішень щодо розподілу потужності [7]. Інтеграція глибокого навчання з підкріпленням із системами модельно-прогнозного керування додатково продемонструвала синергетичний потенціал, поєднуючи строгість оптимізації з адаптацією на основі навчання в різноманітних сценаріях [8].

Аналіз сучасної літератури виявляє суттєві дослідницькі прогалини, що потребують систематичного вивчення для вдосконалення систем підтримки прийняття рішень для контекстно-залежного управління енергією:

1) недостатнє дослідження нелінійної редукції моделей, спеціально зорієнтованої на динаміку перемикавання режимів, притаманну багаторежимним електричним силовим установкам, оскільки поточні методології переважно зосереджені на лінійних системних апроксимаціях, які можуть неефективно представляти складну перехідну поведінку;

2) недостатній обсяг праць з адаптивних процедур редукції, що змінюють складність моделей залежно від ситуації, попри їхній потенціал у досягненні оптимального балансу між точністю та ефективністю за обмежених обчислювальних ресурсів;

3) відсутність комплексних систем, що інтегрують адаптивну редукцію моделей із системами підтримки прийняття рішень у режимі реального часу, здатних інтелектуально обирати моделі для ситуацій зі значною варіабельністю;

4) недостатнє вивчення контекстно-залежних методологій еквівалентування, що використовують ідентифікацію експлуатаційного режиму для забезпечення належного спрощення моделі за збереження точності прогнозування, необхідної для оптимальної продуктивності управління енергією;

5) недостатня кількість валідаційних досліджень, що кількісно оцінюють вплив різних методів редукції на продуктивність у реальних умовах руху, що ускладнює надання практичних рекомендацій розробникам вбудованих систем щодо застосування цих методів.

Для заповнення виявлених прогалин необхідно створити інтегровані методологічні системи, що охоплюють адаптивну редукцію моделей, контекстно-залежну підтримку прийняття рішень і відтворення динаміки перемикавання режимів. Запропоновані напрями досліджень наголошують на потребі в інтелектуальних архітектурах, здатних змінювати складність моделей у відповідь на зміну експлуатаційних умов, доступних обчислювальних ресурсів і вимог до точності прогнозування. Для розвитку галузі необхідно систематично дослідити стратегії еквівалентування, розроблені спеціально для багаторежимних електричних силових установок, встановити теоретичні засади для гарантованих меж продуктивності за редукції моделей і провести ретельне тестування в різноманітних реальних умовах. Поєднання машинного навчання з фізично обґрунтованим моделюванням є надзвичайно перспективною стратегією для

підвищення ефективності систем управління енергією наступного покоління за умови збереження їхньої придатності до практичного застосування в автомобільній галузі.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Розроблення контекстно-залежної адаптивної методології редукції моделей електромобілів потребує системної інтеграції математичного моделювання, обчислювальної оптимізації та принципів проектування систем підтримки прийняття рішень. Дослідницький підхід передбачає формулювання комплексних математичних описів, встановлення критеріїв еквівалентності, розроблення архітектур перемикання режимів, а також ретельну валідацію шляхом обчислювального моделювання. Методологічна система спрямована на розв'язання фундаментальної проблеми балансування точності прогнозування з вимогами до обчислювальної ефективності, притаманними застосункам підтримки прийняття рішень у режимі реального часу, що їх впроваджують на вбудованих автомобільних платформах з обмеженими ресурсами.

У формулюванні математичної моделі повного порядку встановлено базове представлення динаміки електромобіля, що містить механічну та електричну підсистеми. Рівняння поступального руху описує поведінку транспортного засобу через другий закон Ньютона з урахуванням інерційних ефектів, тягових сил і елементів опору:

$$m \frac{dv}{dt} = F_T - F_R - F_G - F_A, \quad (1)$$

де m — еквівалентна маса транспортного засобу з урахуванням обертальних інерцій [кг], v — швидкість [м/с], F_T — тягова сила на колесах [Н], F_R — сила опору кочення [Н], F_G — складова сили тяжіння, спрямована вздовж напрямку руху [Н], F_A — сила аеродинамічного опору [Н].

Формулювання опору кочення містить коефіцієнт тертя та зміну нормальної сили залежно від нахилу дороги:

$$F_R = f \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha, \quad (2)$$

де f — коефіцієнт опору кочення, g — прискорення вільного падіння [м/с²], α — кут нахилу дороги [рад].

Складова сили тяжіння відображає вплив перепаду висот рельєфу:

$$F_G = m \cdot g \cdot \sin \alpha, \quad (3)$$

Аеродинамічний опір підпорядковується квадратичній залежності від швидкості, характерній для турбулентних режимів течії:

$$F_A = 0.5 \cdot C_x \cdot \rho \cdot S \cdot v^2, \quad (4)$$

де C_x — коефіцієнт аеродинамічного опору, ρ — густина повітря [кг/м³], S — площа лобового поперечного перерізу [м²].

Генерування тягової сили через систему електроприводу змінного струму передбачає врахування моментних характеристик двигуна, передавального числа трансмісії, радіуса колеса та коефіцієнта корисної дії в межах робочого діапазону. Динаміка стану заряду акумуляторної батареї враховує споживання струму з урахуванням електричних характеристик двигуна, втрат у силовій електроніці та споживання допоміжних систем. Повна модель сьомого порядку охоплює механічну динаміку, електричні перехідні процеси двигуна, теплові ефекти та електрохімічні процеси батареї, що призводить до надмірної обчислювальної складності, неприйнятної для реалізації в режимі реального часу на стандартних автомобільних мікроконтролерах, що працюють в умовах жорстких часових обмежень.

Методологія редукції порядку моделі застосовує систематичні методи спрощення, що зберігають суттєву динаміку за умови усунення обчислювальних надлишкових затрат. Стратегія редукції ідентифікує домінуючі характеристики поведінки системи через аналіз чутливості, декомпозицію в частотній області та фізичне розуміння експлуатаційних режимів. Швидкі електричні перехідні процеси, що демонструють сталі часу, на порядки менші за механічну динаміку, дають змогу використовувати квазістаціонарні апроксимації з заміною диференціальних рівнянь алгебраїчними співвідношеннями. Теплова динаміка, що демонструє повільну зміну відносно періодів оновлення керування, дає змогу знехтувати температурними перехідними процесами протягом коротких горизонтів прогнозування, типових для застосунків підтримки прийняття рішень. Електрохімічні процеси батареї, що демонструють нелінійні характеристики, придатні до кусково-лінійної апроксимації навколо робочих точок, що зменшує обчислювальне навантаження за збереження належної точності. Отримані моделі зниженого порядку досягають другого чи третього порядку, що суттєво зменшує кроки інтегрування та забезпечує виконання в режимі реального часу на вбудованих платформах.

Встановлення критеріїв еквівалентності означає кількісні метрики, що забезпечують збереження редукованими моделями прийнятної точності для цілей підтримки прийняття рішень. Інтегральний функціонал похибки об'єднує відхилення траєкторії швидкості та розбіжність споживання енергії:

$$J = w_v \int_0^T |v(t) - v_{ref}(t)|^2 dt + w_e |E_{consumed} - E_{ref}| \quad (5)$$

де W_v та W_e — вагові коефіцієнти, що балансують точність відстеження швидкості з точністю прогнозування енергії, $v(t)$ — траєкторія швидкості редукованої моделі, $v_{ref}(t)$ — еталонна траєкторія моделі повного порядку, $E_{consumed}$ — споживання енергії, прогнозоване редукованою моделлю, E_{ref} — еталонна енергія з моделювання повного порядку.

Вибір вагових коефіцієнтів враховує специфічні пріоритети застосування, акцентуючи на точності швидкості для оптимізації траєкторії в режимі реального часу та надаючи пріоритет точності енергоспоживання для задач прогнозування запасу ходу. Специфікація порогу еквівалентності встановлює максимально допустиму інтегральну похибку, що визначає прийнятну продуктивність редукованої моделі, зазвичай обмежуючи відхилення швидкості рівнем нижче за 3 % та похибку енергії нижче ніж 5 % для практичних застосувань підтримки прийняття рішень.

Стратегія контекстно-залежного вибору моделі розробляє інтелектуальну логіку перемикання, що активує відповідні редуковані моделі на основі класифікації експлуатаційного режиму. Аналізатор профілю дороги обробляє дані про рельєф, враховуючи градієнт висоти, кривизну та характеристики поверхні, генеруючи сигнал класифікації режиму.

Режим горизонтального рельєфу, що характеризується величиною нахилу нижче порогового значення $|\alpha| < \alpha_{threshold}$, активує спрощену модель із нехтуванням складової сили тяжіння, що забезпечує максимальну обчислювальну ефективність. Режим підйому, ідентифікований позитивним нахилом $\alpha > \alpha_{threshold}$, активує модель з акцентом на гравітаційному опорі, що відображає характеристики підвищеної потреби в потужності. Розпізнавання режиму спуску через негативний нахил $\alpha < -\alpha_{threshold}$ активує модель, що охоплює можливості рекуперативного гальмування, точно прогножуючи потенціал рекуперативної енергії. Виявлення руху на поворотах через аналіз радіуса кривизни запускає модель, що враховує вплив бокової динаміки на опір кочення та визначає оптимальну швидкість проходження повороту.

Проектування архітектури гібридної моделі інтегрує множинні моделі зниженого порядку з можливістю плавного перемикання, що підтримує неперервність траєкторії. Дискретно-подійний супервізор реалізує скінченний автомат, що керує переходами між режимами

на основі класифікованого експлуатаційного режиму. Інтерполятор стану забезпечує плавні переходи між моделями, запобігаючи розривам швидкості, що потенційно спричиняють числову нестійкість або нереалістичні прогнози прискорення. Стратегія інтерполяції застосовує зважене усереднення протягом перехідних періодів, поступово зміщуючись від прогнозів вихідної моделі до виходів вхідної моделі протягом визначеного часового вікна. Захисні умови запобігають надмірній частоті перемикання через реалізацію гістерезису, що вимагає стабільності класифікації режиму перед ініціюванням переходів. Логіка пріоритетів розв'язує одночасні умови режимів, наприклад, розрізняючи сегменти підйому на повороті, що потребують комбінованого моделювання гравітаційних і бокових ефектів.

Конфігурація середовища обчислювального моделювання здійснюється на платформі MATLAB/Simulink, що забезпечує можливості чисельного інтегрування, засоби візуалізації та автоматизовані дослідження варіації параметрів. Розв'язувач звичайних диференціальних рівнянь зі змінним кроком, що застосовує адаптивну дискретизацію часу, забезпечує чисельну точність під час оптимізації обчислювальної ефективності. Стенд для моделювання охоплює реалістичні профілі їздових циклів, що представляють різноманітні експлуатаційні сценарії, зокрема міські режими "стоп-старт", рух на автомагістралях та навігацію гірською місцевістю.

Специфікація параметрів транспортного засобу відображає характеристики сучасних електромобілів: маса — 1800 кг, коефіцієнт опору кочення — 0,012, коефіцієнт аеродинамічного опору — 0,28, лобова площа — 2,3 м², максимальна потужність двигуна — 150 кВт, ємність батареї — 75 кВт·год. Бібліотека їздових циклів охоплює стандартизовані регуляторні цикли, доповнені користувацькими маршрутами з різноманітними профілями висот, обмеженнями швидкості та умовами дорожнього руху, що забезпечує комплексну валідацію моделі в межах репрезентативного експлуатаційного діапазону.

Протокол оцінювання метрик продуктивності встановлює систематичні процедури кількісного визначення ефективності редукованих моделей. Оцінювання обчислювальної ефективності вимірює час виконання для моделювання маршруту завдовжки 50 км, порівнюючи модель повного порядку з окремими редукованими моделями та гібридною адаптивною архітектурою. Для вимірювання часу застосовують високоточні лічильники продуктивності, що фіксують процесорні цикли, необхідні для чисельного інтегрування, оновлення стану та виконання логіки перемикання.

Кількісне визначення точності прогнозування передбачає обчислення відносних похибок для траєкторії швидкості та кумулятивного споживання енергії щодо еталонних результатів моделі повного порядку. Статистичний аналіз визначає середню абсолютну відсоткову похибку, середньоквадратичне відхилення та максимальну миттєву похибку протягом усього періоду моделювання. Аналіз чутливості досліджує погіршення продуктивності редукованих моделей за умов невизначеності параметрів, враховуючи варіації маси, флуктуації опору кочення та допуски аеродинамічних коефіцієнтів, встановлюючи запаси робастності для практичної реалізації.

Система методології валідації застосовує багатоетапний процес верифікації, що забезпечує коректність математичних формулювань, чисельних реалізацій та інтерпретації результатів моделювання. Верифікація моделі підтверджує правильність трансляції математичних рівнянь в обчислювальний код через модульне тестування окремих компонентів, порівнюючи аналітичні розв'язки для спрощених сценаріїв із результатами моделювання. Валідація чисельної точності досліджує ефекти дискретизації через дослідження подібнення кроку, підтверджуючи збіжність до розв'язків у неперервному часі.

Верифікація критеріїв еквівалентності забезпечує відповідність редукованих моделей встановленим порогам похибки в різних експлуатаційних сценаріях через вичерпне дослідження простору параметрів. Валідація логіки перемикавання перевіряє ефективність інтерполятора стану в підтриманні неперервності траєкторії під час переходів між режимами, запобігаючи числовим артефактам і фізичним неузгодженостям. Бенчмаркінг обчислювальної ефективності встановлює досяжні коефіцієнти реального часу на цільових вбудованих апаратних платформах, кількісно визначаючи запас між доступними обчислювальними ресурсами та необхідною обчислювальною потужністю.

Архітектура інтеграції системи підтримки прийняття рішень визначає шлях реалізації, що транслює валідовані моделі в практичну функціональність допомоги водієві. Структура програмного забезпечення застосовує модульний дизайн, що розділяє компоненти інтерфейсу датчиків, оцінювання стану, виконання моделі, оптимізації та людино-машинного інтерфейсу. Інтеграція операційної системи реального часу забезпечує детермінований час виконання, що відповідає жорстким дедлайнам оновлення керування.

Стратегія управління пам'яттю оптимізує структури даних, мінімізуючи промахи кешу та

затримку доступу до пам'яті, які є критичними для продуктивності вбудованих систем. Реалізація комунікаційного протоколу забезпечує обмін телеметричними даними, підтримуючи віддалений моніторинг, реєстрацію продуктивності та оновлення моделей через бездротові мережі. Положення щодо масштабованості враховують майбутні розширення функціональності, зокрема оптимізацію маршруту з прогнозуванням, рекомендації щодо стратегії заряджання та адаптацію патернів водіння на основі машинного навчання. Механізми розширюваності підтримують інтеграцію провідних алгоритмів, зокрема предикторів на нейронних мережах, методів генетичної оптимізації та колаборативного обміну інформацією "транспортний засіб — інфраструктура", що розширює можливості підтримки прийняття рішень за межі базової функціональності на основі моделей.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Комплексне математичне представлення руху електромобіля з тяговим електроприводом змінного струму охоплює систему диференціальних рівнянь, що враховує динаміку механічної та електричної підсистем. Рівняння поступального руху, що описує поведінку транспортного засобу, має такий вигляд:

$$m \frac{dv}{dt} = F_T - F_R - F_G - F_A \quad (6)$$

де m — еквівалентна маса транспортного засобу з урахуванням обертальних інерцій [кг], v — швидкість [м/с], F_T — тягова сила на колесах [Н], F_R — сила опору кочення [Н], F_G — складова сили тяжіння вздовж напрямку руху [Н], F_A — сила аеродинамічного опору [Н].

Складові сил опору визначено відповідно до співвідношень (2) — (4), наведених у розділі "Методика дослідження". Зазначені залежності враховують опір кочення, гравітаційну складову та аеродинамічний опір, що формують результуюче навантаження на транспортний засіб у різних режимах руху.

Структурну організацію запропонованої архітектури гібридної моделі з логікою перемикавання режимів проілюстровано на **рис. 1**.

Детектор режиму аналізує поточні параметри дороги та активує відповідну еквівалентну модель на основі класифікації експлуатаційного режиму. Інтерполятор стану забезпечує неперервність траєкторії під час перехідних перемикань між експлуатаційними режимами, запобігаючи розривам, що потенційно погіршують продуктивність системи підтримки прийняття рішень.

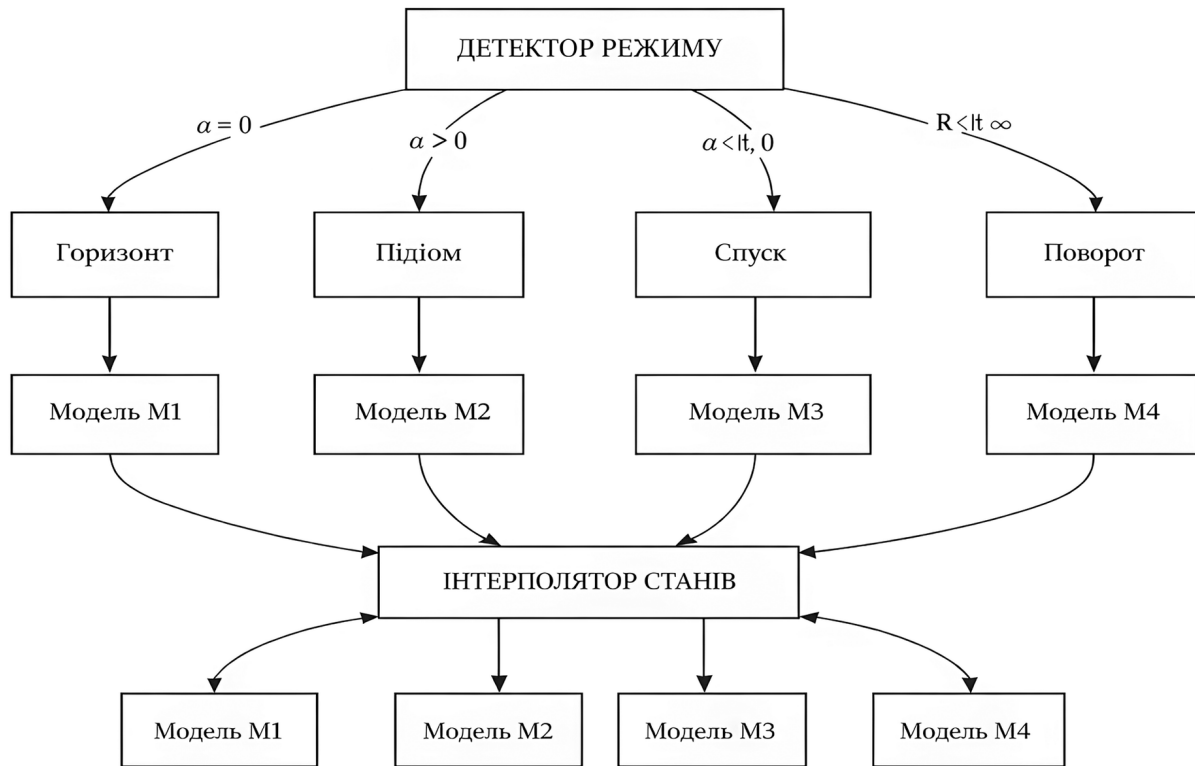


Рис. 1. Структура гібридної моделі з перемикальною логікою

На рис. 1 показано, що детектор режиму аналізує поточні параметри дороги та активує відповідну еквівалентну модель, а інтерполятор стану забезпечує неперервність траєкторії під час перемикання.

Параметри електромобіля, що використовуються для моделювання, наведено в табл. 1.

Для верифікації запропонованого методу розроблено візуалізацію в середовищі MATLAB (рис. 2). Дані, подані на рис. 2, засвідчують, що еквівалентна модель адекватно відтворює динаміку розгону електромобіля.

Максимальне відхилення швидкості не перевищує 3 км/год у перехідних режимах. Порівняльний аналіз часу обчислень виконано для

маршруту завдовжки 50 км зі змінним профілем дороги. Результати наведено в табл. 2.

З рис. 3 видно, що похибка зменшується зі зростанням швидкості, що пояснюється домінуванням аеродинамічного опору, який однаково враховується в обох моделях.

ВИСНОВКИ

У статті розроблено метод контекстно-залежної адаптивної редукції математичних моделей оптимального руху електромобіля з тяговим електроприводом змінного струму для застосування в системах підтримки прийняття рішень водієм. Нижче наведено головні результати дослідження.

Таблиця 1

Параметри електромобіля для моделювання

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Маса	m	1800	кг
Коефіцієнт опору кочення	f	0,012	–
Коефіцієнт аеродинамічного опору	C_x	0,28	–
Площа лобового перерізу	S	2,3	м ²
Максимальна потужність двигуна	P_{max}	150	кВт
Ємність батареї	E_b	75	кВт·год

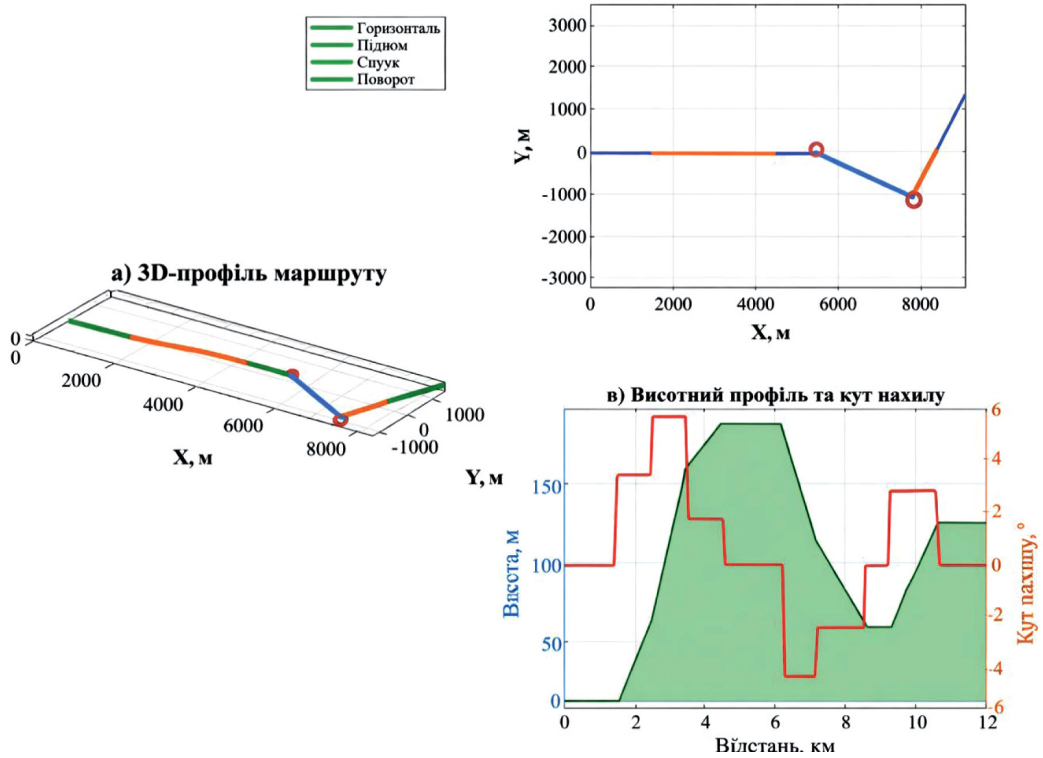


Рис. 2. Результати моделювання швидкісних профілів

Таблиця 2

Порівняння обчислювальної складності моделей

Модель	Час обчислення, мс	Відносна похибка швидкості, %	Відносна похибка енергії, %	Модель
Повна (сьомого порядку)	847			
Еквівалентна М1 (горизонт)	156	2,1	2,8	Еквівалентна М1 (горизонт)
Еквівалентна М2 (підйом)	189	3,4	4,2	Еквівалентна М2 (підйом)
Еквівалентна М3 (спуск)	178	2,9	3,1	Еквівалентна М3 (спуск)
Гібридна адаптивна	203	2,7	3,5	Гібридна адаптивна

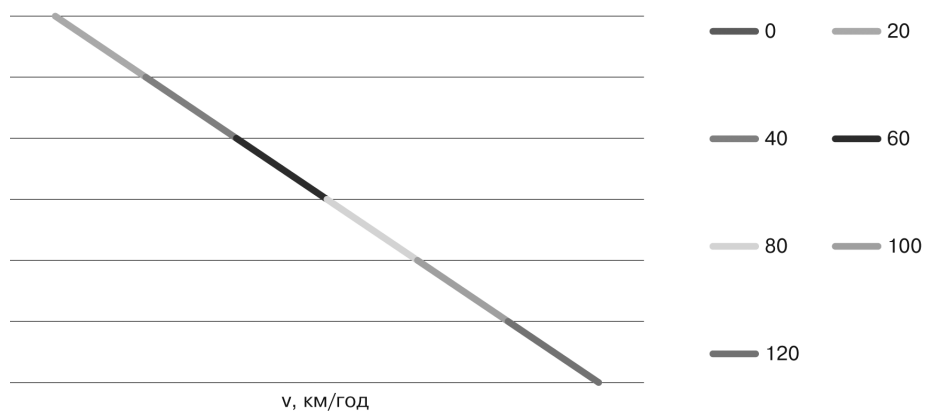


Рис. 3. Залежність відносної похибки еквівалентної моделі від швидкості

Сформульовано критерії еквівалентності редукованих моделей на основі мінімізації інтегрального функціонала похибки, що враховує відхилення траєкторії швидкості та енергоспоживання від значень, отриманих за допомогою повної моделі. Застосування вагових коефіцієнтів у функціоналі дає змогу налаштувати баланс між точністю відтворення швидкісного профілю та точністю прогнозування енерговитрат залежно від пріоритетів конкретного застосування.

Запропоновано структуру гібридної моделі з перемикальною логікою, що забезпечує автоматичний вибір відповідної еквівалентної моделі залежно від поточного режиму руху: горизонтальна ділянка, підйом, спуск або поворот. Розроблений інтерполятор станів гарантує неперервність траєкторії руху під час перемикання між еквівалентними моделями, що є критично важливим для практичного застосування в бортових системах.

Результати комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB підтверджують ефективність запропонованого підходу. Застосування гібридної адаптивної моделі забезпечує зменшення часу обчислень у 4,2 раза в порівнянні з повною моделлю сьомого порядку. Водночас відносна похибка прогнозування швидкості не перевищує 2,7 %, а похибка оцінювання енергоспоживання становить 3,5 %, що є прийнятним для задач підтримки прийняття рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Global EV Outlook 2023: Catching up with climate ambitions [Electronic resource] / International Energy Agency. — Paris : IEA, 2023. — Access mode: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>.
- Emadi A. Advanced electric drive vehicles [Electronic resource] / A. Emadi. — Boca Raton, FL : CRC Press, 2014. — 61 p. — Access mode: https://api.pageplace.de/preview/DT0400_9781466597709_A38205355/preview-9781466597709_A38205355.pdf.
- Yang S. Energy management of hybrid electric propulsion system: Recent progress and a flying car perspective under three-dimensional transportation networks / S. Yang, Z. Lu, W. Wang et al. // *Green Energy and Intelligent Transportation*. — 2023. — Vol. 2. — No. 1. — Article 100061. DOI: 10.1016/j.geits.2022.100061.
- Sciarretta A. Control of hybrid electric vehicles / A. Sciarretta, L. Guzzella // *IEEE Control Systems Magazine*. — 2007. — Vol. 27. — No. 2. — P. 60–70. DOI: 10.1109/MCS.2007.338280.
- Qi X. Development and evaluation of an evolutionary algorithm-based online energy management system for plug-in hybrid electric vehicles / X. Qi, G. Wu, K. Boriboonsomsin, M. J. Barth // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. — 2017. — Vol. 18. — No. 8. — P. 2181–2191. — DOI: 10.1109/TITS.2016.2633542.
- Ehsani M. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles / M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, K. Ebrahimi; 3rd ed. — Boca Raton, FL : CRC Press, 2018.
- Liu T. Reinforcement learning optimized look-ahead energy management of a parallel hybrid electric vehicle / T. Liu, X. Hu, S. E. Li, D. Cao // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. — 2017. — Vol. 22. — No. 4. — P. 1497–1507. DOI: 10.1109/TMECH.2017.2707338.
- Zhang C. Energy management of hybrid electric vehicles based on model predictive control and deep reinforcement learning / C. Zhang, W. Cui, Y. Du, T. Li, N. Cui // 2022 41st Chinese Control Conference (CCC). — IEEE, 2022. — P. 5441–5446. DOI: 10.23919/CCC55666.2022.9902409.
- Schilders W. H. Model order reduction: Theory, research aspects and applications / W. H. Schilders, H. A. van der Vorst, J. Rommes. — Berlin : Springer, 2008. — DOI: 10.1007/978-3-540-78841-6.
- Raduenz H. Energy management based on neural networks for a hydraulic hybrid wheel loader / H. Raduenz, L. Ericson, K. Uebel, K. Heybroek, P. Krus, V. J. D. Negri // *International Journal of Fluid Power*. — 2022. — Vol. 23, No. 3. — P. 411–432. DOI: 10.13052/ijfp1439-9776.2338.
- Zhao K. Digital twin-supported battery state estimation based on TCN-LSTM neural networks and transfer learning / K. Zhao, Y. Liu, Y. Zhou, Y. Wang, X. Li, Z. Chen // *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. — 2025. — Vol. 11. — No. 2. — P. 567–579. DOI: 10.17775/CSEEJES.2024.00900.
- Qin F. Stochastic optimal control of parallel hybrid electric vehicles / F. Qin, G. Xu, Y. Hu, K. Xu, W. Li // *Energies*. — 2017. — Vol. 10. — No. 2. — Article 214. DOI: 10.3390/en10020214.

REFERENCES

- (2023). Global EV Outlook 2023: Catching up with climate ambitions. International Energy Agency. Paris: IEA. Access mode: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>.
- Emadi A. (2014). Advanced electric drive vehicles. Boca Raton, FL : CRC Press, 61 p. Retrieved from: https://api.pageplace.de/preview/DT0400_9781466597709_A38205355/preview-9781466597709_A38205355.pdf.
- Yang, S., Lu, Z., Wang, W., Li, Y., Chen, Y., & Xu, B. (2023). Energy management of hybrid electric propulsion system: Recent progress and a flying car perspective under three-dimensional transportation networks. *Green Energy and Intelligent Transportation*. Vol. 2. No. 1. Art. 100061. DOI: 10.1016/j.geits.2022.100061.
- Sciarretta, A., & Guzzella, L. (2007). Control of hybrid electric vehicles. *IEEE Control Systems Magazine*, 27 (2), 60-70. DOI: 10.1109/MCS.2007.338280.
- Qi, X., Wu, G., Boriboonsomsin, K., & Barth, M. J. (2017). Development and evaluation of an evolutionary algorithm-based online energy management system for plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18 (8), 2181-2191. DOI: 10.1109/TITS.2016.2633542.
- Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K. (2018). Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles, 3rd ed. Boca Raton, FL : CRC Press.
- Liu, T., Hu, X., Li, Sh. E., & Cao, D. (2017). Reinforcement learning optimized look-ahead energy management of a parallel hybrid electric vehicle. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22 (4), 1497-1507. DOI: 10.1109/TMECH.2017.2707338.

8. Zhang, C., Cui, W., Du, Y., Li, T., & Cui, N. (2022). Energy management of hybrid electric vehicles based on model predictive control and deep reinforcement learning. *2022 41st Chinese Control Conference (CCC)*. IEEE, P. 5441-5446. DOI: 10.23919/CCC55666.2022.9902409.
9. Schilders W. H., van der Vorst H. A., & Rommes J. (2008). Model order reduction: Theory, research aspects and applications. Berlin: Springer. DOI: 10.1007/978-3-540-78841-6.
10. Raduenz, H., Ericson, L., Uebel, K., Heybroek, K., Krus, P., & Negri, V. J. D. (2022). Energy management based on neural networks for a hydraulic hybrid wheel loader. *International Journal of Fluid Power*, 23 (3), 411-432. DOI: 10.13052/ijfp1439-9776.2338.
11. Zhao, K., Liu, Y., Zhou, Y., Wang, Y., Li, X., & Chen, Z. (2025). Digital twin-supported battery state estimation based on TCN-LSTM neural networks and transfer learning. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 11 (2), 567-579. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2024.00900.
12. Qin, F., Xu, G., Hu, Y., Xu, K., & Li, W. (2017). Stochastic optimal control of parallel hybrid electric vehicles. *Energies*, 10 (2), Article 214. DOI: 10.3390/en10020214.

B. V. PASIEKA, Postgraduate Student

CONTEXT-DEPENDENT ADAPTIVE REDUCTION AND EQUIVALENT MODELING OF AN ELECTRIC VEHICLE WITH DRIVING MODE SWITCHING FOR A DECISION SUPPORT SYSTEM

Abstract. *The problem of the practical implementation of mathematical models of optimal motion of an electric vehicle with an AC traction electric drive in driver decision support systems is considered. The necessity of the equivalencing of complex dynamic models to ensure real-time calculations is substantiated. A method of context-dependent adaptive model reduction is proposed, which involves automatic switching between simplified equivalent models depending on the current driving mode of the vehicle: a horizontal section, ascent, descent or turn. Criteria for the equivalence of reduced models are formulated based on minimising the integral error of the velocity trajectory and energy consumption. A hybrid model structure with switching logic is developed, which ensures the continuity of the motion trajectory when changing modes. Computer modelling has been performed in the MATLAB/Simulink environment to compare the computational complexity of the full and equivalent models. The modelling results confirm a four- to sixfold reduction in computation time while maintaining the accuracy of motion parameter prediction at a level of 2% to 5% relative error. The conditions for the applicability of each of the equivalent models were determined depending on the road profile and dynamic movement characteristics. An algorithm for integrating equivalent models into a decision support system software application was proposed, with the possibility of further expanding functionality through intelligent prediction algorithms. The prospects for applying the developed models to the creation of adaptive electric vehicle control systems based on artificial intelligence methods are outlined. The results obtained can be used in the design of intelligent decision support systems for electric vehicle drivers, aimed at improving energy efficiency, safety and adaptability of movement in real operating conditions.*

Keywords: *electric vehicle, equivalent model, decision support system, adaptive reduction, mode switching, optimal movement, traction electric drive.*

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРА

Пасека Богдан Володимирович — аспірант кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна, 21000; +38 (095) 442-92-20; bogdanpaseka2000@gmail.com; ORCID: 0009-0002-9975-2896

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pasieka B. V. — Postgraduate Student, Department of System Analysis and Information Technologies, Vinnytsia National Technical University, 95, Khmelnytskyi Highway, Vinnytsia, Ukraine, 21000; +38 (095) 442-92-20; bogdanpaseka2000@gmail.com; ORCID: 0009-0002-9975-2896

Надійшла до редакції 08.02.2026

Прийнята до друку 26.02.2026



І. В. КАЗАЧКОВ, д-р техн. наук, проф.

О. В. НЕСТЕРЕНКО, д-р техн. наук, проф.

В. В. ФЕДОРОВ, канд. фіз.-мат. наук

П. П. ЯЦУК, канд. техн. наук

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ПУБЛІЧНОМУ УПРАВЛІННІ: ВІД ПОЧАТКІВ ДО ВИКОРИСТАННЯ В УМОВАХ ВИКЛИКІВ І ПОТРЕБ ВОЄННОГО СТАНУ

Резюме. Метою дослідження є окреслення шляхів розвитку використання органами публічного управління України інформаційно-комунікаційних технологій для забезпечення взаємодії з суспільством від зародження інформатизації до нової реальності воєнного часу. Проведено систематизований огляд моделей застосування інформаційно-комунікаційних технологій в органах публічного управління на основі публікацій світової наукової спільноти та вітчизняної наукової літератури. Здійснено оцінювання сучасного стану застосування інформаційно-комунікаційних технологій в органах публічного управління в Україні та світі, а також напрямів розвитку в цій сфері. Сформовано оцінку чинників впливу інформаційно-комунікаційних технологій на виконання головних функцій органами публічного управління. Проаналізовано ключові виклики та потреби публічного управління в умовах воєнного стану, що можуть бути забезпечені за допомогою інформаційно-комунікаційних технологій. Головні результати свідчать про важливу роль технологічної складової в розвитку публічного управління в умовах електронного урядування та в забезпеченні його ефективності. Саме завдяки використанню сучасних інформаційно-комунікаційних технологій електронне урядування як загальна модель трансформується в нові форми підтримки як головної діяльності органів публічного управління, так і їх взаємодії з бізнесом і громадянами. Водночас існують розриви між можливостями сучасних технологічних засобів і тим, як вони використовуються для забезпечення електронного урядування. Чимало сучасних технологічних тенденцій у сфері підтримки публічного управління або не використовуються, або увага до них є відносно незначною. Головні причини цього полягають у повільності адаптації державної системи до поточних технологічних зрушень, а також в економічних та інших ресурсних труднощах запровадження й опанування сучасних інформаційно-комунікаційних технологій. Проведений систематизований огляд може бути корисним для відповідальних осіб, а також безпосередньо для науковців і фахівців різних галузей, залучених до процесів формування та модернізації інформаційних технологій, систем і ресурсів органів публічного управління.

Ключові слова: цифрова трансформація, органи влади, електронний уряд, інформаційні технології, адміністративні послуги, штучний інтелект.

ВСТУП

Сьогодні комп'ютер у кабінеті посадовця сприймається як необхідний атрибут інтер'єру, а отримання громадянами адміністративних послуг у режимі онлайн вважається досить буденним. Хоча лише трохи більше ніж чверть століття тому про це лише міркували фахівці та вчені в різноманітних публікаціях, кількість яких невпинно збільшувалася. За цю коротку історію впровадження інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) у публічне управління, головним наслідком якого став стрімкий розвиток електронного урядування в країнах світу, було запропоновано розмаїття принципів і різнопланову панораму тем. Вони охоплюють напрями підтримки у владних інституціях завдяки вико-

ристанню інформаційних технологій процесів управління, прийняття рішень, розроблення документів, моніторингу та оцінювання державної політики та програм, а також забезпечення взаємодії з населенням. Упродовж цього періоду ця сфера істотно змінилася і як досить нова інженерна дисципліна та перспективний науковий напрям продовжує активно розвиватися.

Проте існує думка, що величезний потенціал ІКТ для підтримки найважливіших функцій вищого рівня державної влади використовується лише незначною мірою. Хоча у керівників і службовців державних установ існує розуміння, що цілі використання ІКТ у державному секторі є надзвичайно масштабними як щодо підвищення ефективності та результа-

тивності, так і щодо зміцнення демократичних функцій, однак чи справді вони усвідомлюють наявність у ІКТ численних функцій та можливостей, як ними користуватися та як варто ними керувати? Існує невідповідність між цілями, заявленими для розбудови електронного урядування, а також способами та повнотою використання ІКТ та їх численних функцій. У державних органах, як і раніше, залишаються проблеми реалізації широкого спектра засобів і заходів, підходів до управління ІКТ, а також наявності відповідних економічних і людських ресурсів.

Водночас на сучасному етапі переходу до цифровізації, застосування засобів штучного інтелекту (ШІ), інтелектуалізації управління та підтримки прийняття рішень, ІКТ у публічному управлінні є не лише технічним інструментом або засобом оптимізації адміністративних процедур — вони виступають як соціотехнологічне явище, що змінює саму природу управлінських відносин. ІКТ є стратегічним чинником розвитку державного управління, забезпечуючи його інноваційність, відкритість і стійкість у складних суспільно-політичних умовах, створюючи передумови для розвитку сервісно-орієнтованої моделі держави, у якій інформаційні потоки стають головним ресурсом для формування політики, управління ризиками й підвищення адаптивності управлінських систем до кризових ситуацій. Нові реалії підкреслюють також особливу важливість цих процесів у період воєнних викликів.

Таке широкомасштабне використання нових технологій у всіх сферах діяльності влади не може не призводити до постійного підвищення ефективності задоволення інформаційних потреб суспільства та забезпечення його взаємодії з органами державного управління на нових щаблях розвитку.

У межах загальної проблеми поширення застосування ІКТ у державному (публічному) управлінні актуальною є завдання щодо проведення досліджень, що мають відображати суспільно-технологічні часові тренди у вказаному напрямі. На їх основі стає можливим не лише створення умов для забезпечення ефективної взаємодії державного управління з суспільством, а й для вибору та застосування новітніх технологічних засобів його підтримки.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Мета дослідження полягає у визначенні шляхів розвитку використання органами публічного управління ІКТ для забезпечення взаємодії з суспільством від витоків інформатизації до нової реальності воєнного часу.

Цільова спрямованість зумовлює логіку дослідження, що спрямована на постановку та вирішення таких завдань:

а) провести систематизований огляд моделей застосування ІКТ в органах публічного управління на основі публікацій світової наукової спільноти та вітчизняної наукової літератури;

б) здійснити оцінювання сучасного стану застосування ІКТ в Україні та світі та напрямів розвитку в цій сфері;

в) сформулювати оцінку чинників впливу ІКТ на виконання головних функцій органами публічного управління;

г) проаналізувати ключові виклики та потреби публічного управління в умовах воєнного стану, що можуть бути забезпечені за допомогою ІКТ.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Майже одразу з появою перших комп'ютерів у середині ХХ ст. на тлі інформаційних хвиль і революцій у світовому дискурсі почали з'являтися публікації, де зазначалося, що владні органи мають надавати громадянам широкий доступ до державної інформації та використовувати для цього відповідні технології. З початку 2000-х рр. дедалі більше поширювались ідеї орієнтації урядів на своїх громадян (у технологічній термінології — на користувача) та встановлення зв'язків такої орієнтації з традиційним підходом до публічного управління, що базується на верховенстві адміністрації. Причому вказувалося, як саме ІКТ можуть бути застосовані для створення оптимального розподілу праці між урядом, бізнесом і громадянами [1]. Вибуховий розвиток ІКТ як у розвинених країнах, так і в деяких країнах, що розвиваються, привів до відповідних реорганізацій державного сектору, що створило можливість завдяки впровадженню нових технологій для більшого економічного зростання, а люди відчули підвищення якості життя [2].

Однак уже тоді зазначалося, що величезний потенціал ІКТ для підтримки найважливіших функцій вищого рівня державної влади використовується лише незначною мірою [3]. У праці [4] дослідники з'ясовують, чи справді керівники державних органів розуміють численні функції та ролі ІКТ та те, як ними користуватися та ефективно ними керувати? У цій статті вказується на наявність невідповідності між функціями, що неявно закладені в цілях, заявлених для електронного урядування, способами використання ІКТ та їхніх численних функцій. Реалізація такого різноманітного набору цілей вимагає широкого спектра засобів і заходів, а також підходів до управління ІКТ.

Обсяг досліджень успіхів і невдач проєктів впровадження ІКТ у державному секторі постійно зростає. Однак у цих публікаціях нечасто розглядається питання, чому деякі проєкти, попри погане функціонування, зберігаються та продовжуються. У статті [5] автори припускають, що поняття інституційної логіки та відмінностей у статусі державних органів дають корисне розуміння структури та траєкторії цього типу безперервності проєктів. У статті детально розглядаються два рівні безперервності: 1) на рівні політики, що забезпечується логікою децентралізації та технократії, 2) на операційному рівні, коли групи з різними мотивами, пов'язаними зі статусом організації, підтримують проєкт.

Пріоритетність інвестицій в ІКТ та оцінювання технологічних інновацій є передумовами успішної реалізації подібних проєктів. Необхідні об'єктивні оцінки витрат і вигод, що виникають унаслідок інвестицій в ІКТ та їх впровадження. У праці [6] представлено ключові методи та запропоновано деякі рекомендації щодо оцінювання технологічних інновацій у державному секторі.

Сучасні дослідження розглядають вплив поширення ІКТ разом із електронним урядуванням на стійкий розвиток країн. Вони також підкреслюють важливість інвестицій в інфраструктуру ІКТ, відповідні програми та проєкти, а також удосконалення інституційних реформ і практик управління [7]. Для покращення надання послуг, прийняття рішень і практики управління в сучасних умовах розглядається цифрова трансформація та впровадження новітніх ІКТ, зокрема використання ШІ, проте тут органи державного сектору під час впровадження засобів ШІ можуть зіткнутися з певними перешкодами. Дослідження [8] визначає ці бар'єри та класифікує їх за такими групами, як люди, організації, процеси та інформаційні технології. Урахування цього може забезпечити урядам краще розуміння шляхів упровадження та допомогти з'ясувати перешкоди, з якими вони стикаються.

З перших років незалежності українські вчені почали проводити дослідження, базуючись на ідеях піонера кібернетики В. М. Глушкова щодо підвищення ефективності державного управління через автоматизацію збирання даних та їх автоматичне математичне оброблення, з урахуванням наявних на той час технологій. Одним з перших були напрацьовані пропозиції щодо створення в органах влади ситуаційних центрів, призначених для автоматизованої підтримки прийняття рішень посадовими особами, а також сформульовані вимоги щодо створення в органах влади автоматизованих інформаційно-аналітичних систем. Це були перші спроби ство-

рити в Україні умови для майбутнього електронного уряду, а невдовзі почали виходити дослідження, що безпосередньо присвячені цій сфері. Дослідження різних аспектів е-уряду та е-урядування продовжуються донині, зокрема в напрямках розвитку електронного урядування загалом, адміністративно-правових засад, використання міжнародного досвіду тощо. Водночас питанню безпосереднього використання в органах влади різних ІКТ приділяється недостатньо уваги. Розгляд окремих технологій і методології проєктування інформаційних систем в органах влади є досить фрагментарним [9–16]. У вітчизняних публікаціях увагу приділяють також дослідженню сучасних підходів до впровадження ШІ у сферу публічного управління та його інтелектуалізації [17]. Однак і в цьому випадку увага переважно приділяється переважно ключовим напрямкам застосування ШІ в публічному секторі, розгляду етичних, правових та організаційних викликів, що постають під час інтеграції ШІ в державні структури [18], а технологічні питання залишаються поза межами досліджень.

Таким чином, науково-методичні засади подальшого розвитку ІКТ в публічному управлінні потребують подальших досліджень в контексті пріоритетів сучасних технологічних трендів, електронного урядування та соціології. Концептуальний базис дослідження цих питань прогресує, а особливості технологічного середовища постійно розгортаються. Актуальність завдання полягає в урахуванні цих процесів у методологічних принципах проєктування та розроблення ефективних технологічних засобів і систем для забезпечення їх широкого застосування в усіх сферах взаємодії з суспільством.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Важливість формування умов для забезпечення розвитку “електронізації” державної влади уперше була усвідомлена урядами Канади та США, які, разом із такими країнами, як Південна Корея та Естонія, стали піонерами вдосконалення державного управління на основі використання ІКТ, нормативно-правової та технологічної підтримки цих процесів.

Проте необхідно зазначити, що поява перших праць щодо питання надання громадянам широкого доступу до державної інформації, що почали з'являтися у світовому дискурсі, а також щодо запровадження технологічних систем у владних агенціях, збігається в часі з розвитком ініціатив і реалізацією ідей академіка В. М. Глушкова щодо підвищення ефективності державного управління через автоматизацію збирання даних та їх автоматичне математичне

оброблення на основі застосування електронних обчислювальних машин. З боку західних політиків тоді лунали критичні заяви стосовно праць В. М. Глушкова, називаючи їх “урядом на перфокартах”. Однак у другій половині ХХ ст. сталася світова криза, спричинена впливом низки чинників, серед яких фінансовий тиск, бюджетний дефіцит тощо. У пошуках нових шляхів виходу з цієї кризи уряди багатьох країн розпочали перегляд встановлених канонів організації діяльності владних інституцій, їх взаємодії між собою, з бізнесом і громадянами. Саме тоді стали в пригоді здобутки В. М. Глушкова, які на той час виявилися досить ефективними. З огляду на можливості комп’ютерів нові виклики сприяли започаткуванню відкритості влади, ключовим ресурсом якої вважали інформацію, а серед модерних шляхів розвитку державного управління важливе місце зайняв поступ в ІКТ. Чимало вчених почали розглядати головні організаційні проблеми, з якими стикаються ініціативи щодо впровадження ІКТ у публічне врядування, керівні принципи та питання реструктуризації управлінських функцій і процесів в таких умовах. У сучасних реаліях це сприяло покращенню надання адміністративних послуг, прийняттю рішень, підвищенню ефективності практики управління, а також забезпеченню сталого розвитку через управління даними, цифрову трансформацію та використання ШІ. На **рис. 1** наведено ілюстрацію еволюції електронного (цифрового) врядування та відповідних ІКТ у публічному управлінні за період історії цього питання та на ближчу перспективу.

Для розуміння засад цієї еволюції насамперед необхідно звернутися до розгляду поняття та сутності ІКТ у сфері публічного управління. У широкому розумінні ІКТ — це комплекс методів, засобів і процесів, що забезпечують збирання, зберігання, оброблення, передавання та використання інформації за допомогою комп’ютерних і телекомунікаційних технологій. Завдяки цьому ІКТ посідають чільне місце в трансформації сучасної системи публічного управління, забезпечуючи якісно новий рівень ефективності діяльності влади та взаємодії між державою, громадянами та бізнесом. У сфері публічного управління ІКТ слугують інструментом модернізації державного апарату, підвищення ефективності управлінських процесів і прозорості діяльності органів влади. Їх впровадження сприяє переходу від традиційного бюрократичного адміністрування до цифрового врядування (digital governance), заснованого на принципах відкритості, орієнтації на громадянина, сервісності та на широкому використанні даних для підтримки прийняття рішень.

Згідно з підходами ООН, відображеними в UN E-Government Survey¹, використання ІКТ у публічному секторі визначається як інтегрований процес створення, обміну та застосування інформаційних ресурсів державними інституціями з метою покращення якості державних послуг і підвищення рівня довіри до влади.

Сутність ІКТ у публічному управлінні проявляється саме через їх функціональні можливості, серед яких: автоматизація управлінських процесів (електронний документообіг, електронні

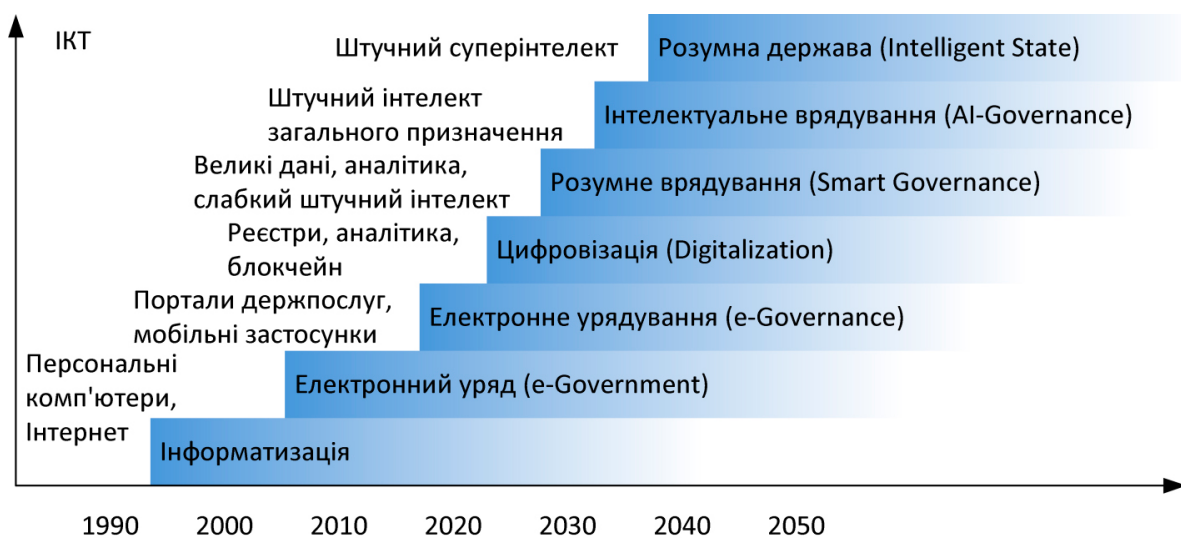


Рис. 1. Еволюція електронного (цифрового) врядування та відповідних ІКТ у публічному управлінні

¹ <https://publicadministration.un.org/egovkb/en-us/Reports/UN-E-Government-Survey-2024>.

реєстри, інтегровані бази даних); підвищення ефективності управлінських рішень (аналітика великих даних, системи підтримки прийняття рішень, прогностичне моделювання); цифрова комунікація (електронні сервіси, портали та мобільні застосунки); посилення прозорості та підзвітності органів влади (відкриті дані, публічні платформи моніторингу); зміцнення захисту критичної інфраструктури (кібербезпека) тощо.

Із **рис. 1** видно, що еволюція цифрового врядування та застосування ІКТ демонструє поступовий рух від технологічної автоматизації до інтелектуалізації управління. Якщо e-Government та e-Governance орієнтувалися на автоматизацію діяльності та надання онлайн-послуг, а Smart Governance спрямоване на участь громадян в управлінні та аналізі даних, то AI-Governance формує якісно нову модель управління, де рішення приймаються на основі знань, аналітики та ШІ. Цей перехід створює передумови для розвитку “розумної держави” (Intelligent State), у якій технології є не самоціллю, а засобом забезпечення прозорості, безпеки та стійкості управлінських процесів у динамічних умовах.

Активізація впровадження ІКТ у владних інституціях та спрямування цих процесів у вказаних напрямках стали можливими не лише завдяки наявності в обігу комп’ютерних та телекомунікаційних засобів. Засади використання ІКТ і систем ШІ в публічному секторі сформувалися насамперед на базі декількох теоретичних моделей на перетині таких наукових напрямів, як державне управління, інформатика, соціальна кібернетика, політичні науки, теорія прийняття рішень тощо. Ці моделі, що почали розвиватися у другій половині ХХ ст., відображають різні підходи до інтеграції технологій у систему державного управління та визначають принципи взаємодії між технологіями, владними інституціями та громадянами.

Одна з ранніх моделей базується на філософській концепції технологічного детермінізму (Technological Determinism Model), відповідно до якої розвиток технологій є головною і неминучою рушійною силою соціальних змін, культури та історії, водночас суспільство має адаптуватися до технологічних інновацій. Відповідно до цієї ідеї впровадження ІКТ розглядається як рушій змін у сфері державного управління. Представники цього підходу (D. Osborne, T. Gaebler) вважають, що цифрові технології автоматично підвищують ефективність, прозорість і підзвітність влади [19]. Стосовно цього існують також критичні зауваження щодо того, що технологічний чинник не є самодостатнім без належної інституційної культури, політичної волі керівництва та професійної компетентності службовців.

Ці думки знаходять підтвердження, наприклад, на практиці впровадження в органах влади автоматизованих інформаційно-аналітичних систем (ІАС), вимоги до яких було сформульовано ще на початку 2000-х рр., однак і досі цей процес просувається занадто повільно [14].

Більш сучасною є модель соціотехнічної інтеграції (Sociotechnical Systems Model), у межах якої ІКТ розглядаються як елементи єдиної соціотехнологічної системи. Згідно з нею, успішна цифрова трансформація публічної влади можлива лише за умови гармонійної взаємодії технологічних компонентів (інфраструктури даних, моделей прийняття рішень і алгоритмів, ШІ) і соціальних чинників (організаційна культура, нормативна база, людський капітал).

Ця модель, що бере початок у працях E. Trist, F. Emery ще у середині ХХ ст., нині сучасному вигляді використовується для аналізу впливу інновацій на управлінські структури держави та формування цифрової екосистеми врядування. Тут також існують застереження щодо необхідності для її реалізації організаційної культури, відповідної нормативної бази та людського капіталу [20].

Значну популярність здобув загальний мережецентричний підхід, що уперше було застосовано у військовій доктрині США, що передбачає перехід від класичних командних структур до гнучких мережевих, за допомогою використання інформаційних технологій. На його основі поширення набула модель “цифрового уряду як мережі” (Network Governance Model). У межах мережевого врядування, апологетами якого є видатні соціальні та політичні теоретики M. Castells, J. Torfing, B. Jessop, відомі своїми дослідженнями мереж, управління та “мережевого суспільства”, публічний сектор розглядається як система взаємопов’язаних акторів (державних, приватних і громадських), які співпрацюють через цифрові платформи та інформаційні мережі. Зазначені автори зробили внесок у розуміння управління, зосереджуючись на тому, як мережі функціонують всередині держави та ринку або кидають їм виклик, а також на концепції “належного управління”. ІКТ у цій моделі виконують роль посередника між суб’єктами прийняття та виконання рішень, забезпечуючи координацію, спільне управління ресурсами та публічну участь [21]. Для дотримання такої моделі насамперед потрібна належна технологічна база та відсутні фінансові інвестиції, а також ґрунтовна нормативна база.

Важливий наслідок просування розглянутих теоретичних моделей у публічне управління проявився появою різних практико-орієнтованих моделей використання в публічному секторі

ІКТ, а згодом і ШІ — від класичної автоматизації діяльності та управління до сучасних мульти-акторних фантомів, у яких держава постає не традиційним монополістом, а суспільним координатором інформаційних потоків, ресурсів і

сервісів, що має на меті забезпечити розвиток держави на засадах демократії, новітніх методів і технологій управління для забезпечення громадян і бізнесу на рівні світових стандартів адміністративних послуг (**табл. 1**).

Таблиця 1

Характеристики практико-орієнтовних моделей використання ІКТ і ШІ в публічному секторі

№	Модель			
	Ключові характеристики	Провідні технології	Переваги	Обмеження та виклики
1	Електронний уряд (e-Government)			
	Автоматизація адміністративних процедур	ЕДО, ЕЦП, бази даних	Підвищення ефективності виконання рутинних процедур	Фрагментарність систем, низький рівень інтеграції
2	Електронне урядування (e-Governance)			
	Електронні послуги: G2C, G2B, G2G	Портали державних послуг	Підвищення прозорості, швидкості реагування, зменшення бюрократії	Фінансові інвестиції, недосконалість нормативної бази
3	Цифрове урядування (Digital Governance)			
	Інтеграція даних і процесів	Big Data, хмарні сервіси, мобільні застосунки	Централізованість, міжвідомча взаємодія	Ризики безпеки даних, потреба в стандартизації
4	Урядування на основі даних (Data-Driven Governance)			
	Прийняття управлінських рішень на основі аналітики великих даних	Big Data, Open Data, Evidence-Based Policy Making, ШІ	Об'єктивізація політик через аналіз статистичних і соціальних даних	Ризики недостовірних даних, потреба в реінжинірингу процесів в органах влади
5	ШІ-врядування (AI-Governance)			
	Алгоритмічне управління, прогнозне моделювання, когнітивні сервіси	Машинне навчання, NLP, комп'ютерний зір	Оптимізація рішень, автоматизація аналітики	Етичні дилеми, прозорість алгоритмів
6	Держава як платформа (GaaP)			
	Взаємодія держави та бізнесу	Відкриті API, хмарні інтерфейси, Open Data	Гнучкість, інноваційність, розвиток партнерств	Залежність від приватних розробників
7	Стійке цифрове врядування (Resilient Digital Governance)			
	Децентралізація, кіберстійкість, збереження даних у кризових ситуаціях	Резервні дата-центри, кіберзахист, ШІ-моніторинг	Безперервність управління в кризових ситуаціях	Висока вартість впровадження
8	Синергетична модель ІКТ-ШІ (ICT-AI Synergistic Model)			
	Комплексне поєднання сучасних технологій для підтримки рішень	Інтегровані ІКТ-платформи, аналітичні ШІ-системи	Баланс ефективності, прозорості та адаптивності	Необхідність нормативної бази та кадрового потенціалу

В Україні одними з перших були пропозиції щодо створення в органах влади автоматизованих ситуаційних центрів, а також сформульовані вимоги щодо створення автоматизованих інформаційно-аналітичних систем (ІАС). З появою інтернету, промислових систем керування базами даних, а з часом і мобільних засобів було створено умови для формування систем електронного уряду та електронного урядування, яким присвячено чимало праць [22].

Наразі в Україні впроваджується й активно обговорюється цифрове урядування, урядування на основі даних та, як наслідок, ШІ-врядування [23–25], що мають значний потенціал для покращення публічного управління. З огляду на наявні виклики щодо впровадження і використання ІКТ у державних органах, про що йшлося вище, у міжнародному дискурсі обговорюється ІТ-рішення, здатне розв'язати чимало з вказаних проблем — програмне забезпечення як послуга (SaaS). Це модель хмарних обчислень, на яку переходить дедалі більше державних установ у всьому світі, зокрема для просування впровадження електронного урядування [26].

Також актуальності набуває застосування моделі “Держава як платформа”, про яку насправді говорять вже тривалий час, з огляду на зростання кількості проблем із ІКТ у державних органах і недостатність ресурсів для їх розв'язання [27]. Чимало урядовців визнали можливість, що почали надавати технології Web 2.0, саме для того, щоб домогтися кращого виконання своєї роботи. Окрім того, з'явилися публікації щодо концепції держави як платформи, що постає у вигляді взаємопов'язаних суб'єктів, компонентів технологічної інфраструктури та цифрових активів [28]. У цій моделі уряд є організатором і сприятливим чинником, що допомагає бізнесу та громадянам ініціювати інновації, які призведуть до покращеного підходу до публічного управління.

Упровадження цих провідних технологій змінює спосіб функціонування бюрократії та трансформує відносини між урядом і громадянами. Підхід держави як платформи забезпечує спільне творення інновацій та спільне виробництво засобів як державними структурами, так і бізнесом [29]. Це створить базис для реалізації синергетичної моделі ІКТ–ШІ, що хоча й передбачає значний потенціал для ефективності та прозорості, але також створює чимало проблем із впровадженням, враховуючи потреби в конфіденційності даних, кібербезпеці та готовності людських і технологічних ресурсів [30].

Повертаючись до сьогоднішнього, доцільно розглянути: які ж головні функції публічного управ-

ління підтримуються поширеними ІКТ (**табл. 2**). Звісно наведений перелік не є вичерпним, проте він демонструє широкі можливості, які надають ІКТ для забезпечення різних видів діяльності державних органів та їхньої взаємодії з суспільством.

В умовах воєнного стану для публічного управління з'являються нові, часто непередбачувані, виклики та потреби, що є надзвичайно важливими для забезпечення ефективності функціонування держави в таких кризових ситуаціях. Зокрема війна накладає серйозні обмеження на всі аспекти управління та вимагає оперативного реагування, постійної адаптації діяльності та реалізації змін у способах взаємодії органів влади з громадянами та бізнесом. У таких умовах у підтримці публічного управління, окрім інших заходів, важливу роль відіграє активне використання різноманітних ІКТ.

Нижче наведено ключові виклики та потреби публічного управління в умовах воєнного стану, що можуть бути забезпечені за допомогою ІКТ.

Насамперед ідеться про виклики аспектів управління, що пов'язані з *забезпеченням національної безпеки та оборони*, які полягають у зміщенні пріоритетів публічного управління між соціальними, економічними та безпековими завданнями, виникненні необхідності максимально ефективно взаємодіяти з військовими структурами та органами безпеки для забезпечення швидкої мобілізації ресурсів і захисту території та громадян. У цих напрямках необхідним є посилення координації між органами державної влади, зокрема між цивільними та військовими структурами, для реалізації заходів, спрямованих на забезпечення національної безпеки. Для цього необхідно застосовувати такі сучасні ІКТ, як системи мобільних оповіщень (повідомлення населення про загрози), шифровані засоби зв'язку, VPN та захищені корпоративні мережі, геоінформаційні системи (оперативне картографування, відстеження ситуації на місцевості), а також системи управління інцидентами (Command & Control Systems, C4ISR) для управління бойовими діями, моніторингу та комунікації.

Виклики аспектів управління, пов'язаних зі *збереженням інституційної спроможності держави*, полягають у руйнуванні інфраструктури державних органів, зменшенні людських ресурсів через мобілізацію та інші чинники, зниженні ефективності адміністративних процедур. Це потребує забезпечення безперервності роботи публічних органів, створення резервних організаційних структур, електронних платформ для дистанційного управління, що дає змогу продовжувати виконання державних функцій

Перелік поширених ІКТ для підтримки головних функцій публічного управління

№	Головні функції публічного управління, що підтримуються	Категорія ІКТ
1	Автентифікація громадян, безпечний доступ до послуг, транзакції, підкріплені ідентифікацією	Цифрова ідентифікація та автентифікація (eID, PKI)
2	Надання послуг першої лінії (G2C/G2B), прийом, платежі, сповіщення	Портали, вебсервіси та мобільні застосунки
3	Прозорість, участь, повторне використання даних для політики та інновацій	Відкриті урядові дані (OGD) та платформи публікацій
4	Аналіз політики, управління ефективністю, прогностичні послуги, реагування на кризи	ШІ та розширена аналітика (ML, NLP, підтримка прийняття рішень)
5	Діяльність бек-офісу, оброблення рутинних транзакцій, автоматизоване заповнення форм, оброблення заробітної плати, звернень/претензій, робочі процеси закупівель	Роботизована автоматизація процесів (RPA) та автоматизація робочих процесів
6	Міжвідомчий обмін даними, інтегровані послуги (G2G)	Хмарні платформи, масштабований хостинг, віртуальні магістральні мережі
7	Ведення справ, архівування, ведення журналу, внутрішнє адміністрування	CRM, EDMS (електронне управління документами)
8	Польові операції, відстеження активів, просторове планування, моніторинг	Інтернет речей, ГІС, сенсори, RFID
9	Незмінні реєстри, відстежуваність, автоматизовані контракти, безпечні міжорганізаційні записи	Блокчейн, технологія розподіленого реєстру (DLT)
10	Залучення громадян, консультації, кризова комунікація, прозорість	Соціальні мережі та платформи електронної участі
11	Захист даних, довіра, дотримання законодавства та безперервність діяльності	Кібербезпека (PKI, шифрування, реагування на інциденти), технології конфіденційності

навіть в умовах обмежених ресурсів. У цьому контексті важливу роль відіграють технології електронного урядування та електронного документообігу ("Вчасно", M.E.Doc, СЕД органів влади), хмарні технології (AWS, Azure, GCP) для збереження даних за межами країни, а також міжнародні платформи (Microsoft 365, Zoom, Google Workspace) для підтримки дистанційної роботи.

Аспекти управління щодо *забезпечення стабільності економіки* зазнають дестабілізації через воєнні дії, блокаду, руйнування підприємств та інфраструктури, проблеми з постачанням товарів і ресурсів тощо. Це потребує постійного моніторингу економічних процесів, прискореного розроблення антикризових економічних стратегій, забезпечення соціальних виплат і пенсій, підтримки малого та середнього бізнесу через спеціальні державні програми, а також посилення внутрішніх фінансових інститутів. У цьому

контексті не обійтись без аналітичних систем Big Data для прогнозування економічних процесів, електронних фінансових систем (інтернет-банкінг, платіжні шлюзи), а також цифрових платформ підтримки бізнесу (електронні гранти, державні портали) і хмарних ERP-систем для ведення діяльності фінансових органів.

В умовах воєнних дій нового виміру набуває *управління гуманітарною ситуацією* щодо масових евакуацій, великих потоків біженців і переселень, знищення громадської інфраструктури, дефіциту продуктів харчування, води та медичних засобів. Публічне управління має адекватно реагувати на ці потреби різними заходами, які забезпечать головні потреби населення в умовах нестабільності, зокрема через організацію евакуації та розташування укриттів, гуманітарну допомогу для внутрішньо переміщених осіб (ВПО), психологічну підтримку осіб, що зазнали втрат. Для відповіді на ці виклики необхідним є

використання платформ електронної гуманітарної допомоги (система “Дія”, UNHCR системи, eHelp) та відповідних мобільних застосунків для реєстрації, виплат, логістики, CRM гуманітарних організацій для управління потоками допомоги, а також використання дронів для проведення дистанційного моніторингу з метою оцінювання пошкоджень та потреб.

З вказаними вище межують виклики аспектів управління щодо *підтримки громадян і забезпечення соціальної справедливості*. Адже в кризових умовах унаслідок воєнних дій збільшення соціальної нерівності, зростання безробіття та зниження рівня життя потребує реалізації політика соціальної підтримки, спрямованої на людей, які постраждали від війни. Це передбачає надання гуманітарної допомоги, підтримку ветеранів, реабілітацію біженців і ВПО, а також захист прав постраждалих. Широке використання платформи “Дія” є необхідним для підтримки соціальних виплат, документів, надання статусу ВПО, а також ведення відповідних електронних реєстрів (ветеранів, постраждалих, одержувачів соціальних послуг). Важливим постає застосування платформи електронної черги для оптимізації навантаження на органи влади. Також особливої актуальності набуває поширення телемедицини та надання онлайн-консультацій.

У таких умовах важливими є *міжнародна підтримка та співпраця*, хоча вони стикаються з невизначеністю щодо певних аспектів міжнародної підтримки, запровадження санкцій, перерозподілу економічних зв'язків. Посилення дипломатичних зусиль для залучення міжнародної фінансової, технічної, гуманітарної допомоги, а також забезпечення підтримки з боку міжнародних організацій у сфері прав людини потребують використання платформ міжнародної технічної допомоги (USAID, EU4Expertise тощо), відеоконференц-систем (Zoom, Webex, Teams) для онлайн-дипломатії, а також систем електронного документообігу міждержавного рівня. Забезпечення відкритості вимагає також застосування цифрових платформ прозорості витрат і закупівель (наприклад, “Дія.City”, Prozorro).

Публічне управління в нових реаліях війни потребує оперативної *адаптації правового поля* та гнучкості в правовому регулюванні, щоб швидко реагувати на змінні умови воєнного стану. Це вимагає постійного перегляду та прийняття нових законів та інших нормативних актів для забезпечення в умовах надзвичайного стану мобілізаційних заходів, економічної стабільності, прав людини, а також забезпечення кіберзахисту та безперервності діяльності. Суттєва підтримка забезпечується електронними

парламентськими системами (e-Parliament) для онлайн-голосування та відповідного електронного документообігу, а також автоматизованими системами оброблення нормативних актів. Для аналізу та моделювання впливу законодавчих змін ефективними є ШІ-системи. Для суспільства ж особливого значення набуває використання правових баз даних (портал “Законодавство України” — zakon.rada.gov.ua, портал відкритих даних — data.gov.ua, ІПС ЛІГА:ЗАКОН, онлайн-інструмент для запобігання бізнес-ризикам LIGA360, правові чат-боти).

У нашу цифрову епоху до аспектів публічного управління додаються й питання *інформаційної безпеки та управління комунікаціями*. В умовах війни вони ускладнюються через використання інформаційних атак, пропаганду та дезінформацію для дестабілізації ситуації в країні. Виникає необхідність підтримки ефективної роботи державних органів у контексті інформаційної війни, обмеження впливу ворожих інформаційних ресурсів, забезпечення населення достовірною інформацією, оперативного інформування про зміни, заходи безпеки та державну допомогу. Для моніторингу атак, захисту державних мереж мають активно використовуватися системи кіберзахисту та SOC-центри, платформи фактчекінгу та OSINT (наприклад, StopFake, Bellingcat-інструменти), технології аналізу інформаційних потоків на основі ШІ/ML для виявлення фейків і бот-мереж. Важливості набуває контрольоване використання цифрових каналів комунікації (Telegram-канали, чат-боти, соціальні мережі тощо).

Таким чином, ІКТ міцно увійшли в усі сфери діяльності органів публічного управління України. Вони відіграють важливу роль у забезпеченні їхньої ефективності, підтримці населення та спрощенні доступу до державних послуг. Найяскравішим прикладом є програма “Дія” і відповідний мобільний застосунок, що вже давно став одним із головних у смартфонах українців. Хоча ця реалізація отримала гучну назву “Держава в смартфоні”, з технологічного погляду, це є прикладом відтворення моделей “держави як платформа” та “стійке цифрове врядування” на основі забезпечення спільного творення інновацій і спільного виробництва засобів ІКТ державними структурами та бізнесом.

Актуальність застосування ІКТ в публічному управлінні ще суттєвіше зросла під час повномасштабного вторгнення агресора. У цей період життя кардинально змінилося, і всім довелося адаптуватися до нових реалій воєнного часу. Природно, що саме “Дія” з початку повномасштабного вторгнення в найкоротші терміни переформатувалася в універсальну платформу, що

допомагає населенню й під час війни, надаючи послуги, актуальні не лише для мирного часу, а й для воєнного періоду.

Таким чином, такі приклади показують ефективність належного використання ІКТ в органах публічного управління та їхня актуальність під час воєнних дій, про що свідчить досвід мільйонів людей, які отримали необхідні послуги, документи чи допомогу від держави лише завдяки платформі «Дія» та з її допомогою.

На завершення необхідно зазначити, що названі досягнення, попри всю їхню важливість, тривалий час залишалися фрагментарними і недостатніми для забезпечення створення необхідної організаційної та технічної бази електронної взаємодії держави, бізнесу та громадськості. Це пов'язано з неповнотою, неефективністю та суперечливістю чинної нормативно-правової бази інформаційної галузі, недостатністю публікаційної уваги до поточних проблем розвитку державних інформаційних систем і сервісів. Лише упродовж останніх років ситуація почала змінюватися на краще. Можна сподіватись, що такі здобутки, як платформа «Дія» та інші технологічні розробки, що використовуються зараз державою для супроводу воєнних дій, дадуть потужний поштовх до широкого впровадження та застосування ІКТ у публічному управлінні, розвитку систем державних інформаційних ресурсів, інформаційної та аналітичної підтримки діяльності державних органів та органів місцевого самоврядування.

ВИСНОВКИ

Аналіз процесів розвитку публічного управління в умовах електронного урядування свідчить про важливу роль технологічної складової в забезпеченні їх прискорення та ефективності. Саме завдяки використанню сучасних ІКТ електронне урядування як загальна модель трансформується в нові форми підтримки як основної діяльності органів публічного управління, так і їхньої взаємодії з бізнесом і громадянами.

Суспільний попит на високоякісні адміністративні послуги буде безперервно зростати. У зв'язку з новими викликами нарощуються й вимоги до діяльності органів публічного управління та ефективності рішень, що приймаються. Однак здійснений аналіз свідчить про наявні розриви між можливостями сучасних технологічних засобів і тим, як вони використовуються для забезпечення електронного урядування. Чимало сучасних технологічних тенденцій у сфері підтримки публічного управління або не використовуються, або увага до них є відносно незначною. Головні причини цього полягають у повільності адаптації державної системи

до поточних технологічних зрушень, а також в економічних та інших ресурсних труднощах запровадження й опанування сучасних ІКТ. Ця суперечність породжує стримування інноваційної актуалізації сфери публічного управління, що негативно впливає на темпи розгортання електронного урядування.

Ключовим рішенням має бути значне підвищення рівня уваги вищого державного керівництва та науково-технічної спільноти до питань цифровізації державних органів. Яскравим прикладом результативності взаємодії українських вчених і фахівців із державними інституціями стало широке впровадження платформи «Дія», завдяки якій десятки мільйонів людей отримують необхідні адміністративні послуги, документи чи соціальну допомогу, особливо у важкі часи воєнного стану в країні. Саме ці складні умови продемонстрували, що наявність в публічному управлінні технологічних засобів, створених на основі використання сучасних ІКТ, є запорукою не лише його ефективної діяльності, а й підтримання життєздатності влади та єдності суспільства в часи кризових ситуацій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Schartum D. W.* ICT, service policy and changing division of labour between citizens and government / D. W. Schartum // *Electronic Communication Law Review*. — 2002. — Vol. 9. — No. 1. — P. 7–22. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016345029779>.
2. *Kalvet T.* Digital Divide and the ICT Paradigm Generally and in Estonia / T. Kalvet // *Encyclopedia of Developing Regional Communities with Information and Communication Technology*. — IGI Global Scientific Publishing, 2005. — P. 182–187. DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-59140-575-7.ch032>.
3. *Loukis E.* Computer supported collaboration in the public sector: The ICTE-PAN project / E. Loukis, S. Kokolakis // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. — 2003. — 2739. — P. 181–186. DOI: https://doi.org/10.1007/10929179_34.
4. *Jansen A.* The understanding of ICTs in public sector and its impact on governance / A. Jansen // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. — 2012. — 7443 LNCS. — P. 174–186. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-33489-4_15.
5. *Sandeep M. S.* The continuity of underperforming ICT projects in the public sector / M. S. Sandeep, M. N. Ravishankar // *Information and Management*. — 2014. — Vol. 51. — No. 6. — P. 700–711. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.im.2014.06.002>.
6. *Buccoliero L.* Information and communication technology evaluation: Role, methods and practices in the public sector / L. Buccoliero, S. Calciolari // *Developments in E-Government. Innovation and the Public Sector*. Publisher: IOS. — 2007. — P. 152–167.
7. *Khan S.* ICT diffusion, E-governance, and sustainability in the digital era / S. Khan, S. Ullah, H. Nobanee // *Sustainable Futures*. — 2024. — Vol. 8. —

- Art. 100272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2024.100272>.
8. *Marzouki A.* Barriers and actions for the adoption and use of Artificial Intelligence in the public sector / A. Marzouki, A. Chouikh, S. Mellouli, R. Haddad // Proceedings of the 16th International Conference on Theory and Practice of Electronic Governance ICEGOV '23. — 2023. — P. 94–100. DOI: <https://doi.org/10.1145/3614321.3614334>.
 9. *Нестеренко О. В.* Методологія використання сучасних інформаційних технологій в інформаційно-аналітичних системах органів державної влади / О. В. Нестеренко // Реєстрація, зберігання і обробка даних. — 2004. — Т. 6. — № 1. — С. 62–74.
 10. *Лойко Л. І.* Інструменти, механізми та еволюція електронного урядування / Л. І. Лойко, І. Х. Хоть // Правова держава. — 2010. — Вип. 21. — С. 471–476.
 11. *Федонюк С. В.* “Хмарні” технології в електронному урядуванні / С. В. Федонюк // Науковий вісник Волинського національного університету імені Лесі Українки. — 2011. — № 20. — С. 13–19.
 12. *Климаш М. М.* Створення ефективних ІКТ-платформ електронного урядування інтерактивного типу: аналіз архітектури систем розповсюдження контенту / М. М. Климаш, Нажм Ахмад Байдун, О. Л. Костів та ін. // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. — 2019. — № 3. — С. 31–45.
 13. *Василишин С.* Розробка безпеки систем електронного урядування на основі блокчейну / С. Василишин, І. Опірський // Захист інформації. — 2022. — Т. 24. — № 2. — С. 58–70.
 14. *Trofymchuk O. M.* Methodology for Designing Analytical Information Systems for Administrative Management / O. M. Trofymchuk, O. V. Nesterenko, I. Ye. Netesin // Science and Innovation. — 2022. — Vol. 18. — No. 4. — P. 25–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/scine18.04.025>.
 15. *Цира О. В.* Цифрова трансформація органів державного управління: роль ІКТ в оптимізації управлінських процесів / О. В. Цира // Economic synergy. — 2024. — № 4. — С. 171–181. DOI: <https://doi.org/10.53920/ES-2024-4-12>.
 16. *Сяська О. В.* Нові інформаційні технології в публічному управлінні: проблеми та перспективи / О. В. Сяська, О. Ю. Поліщук, О. Р. Савченко // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Публічне управління та адміністрування. — 2024. — Т. 35 (74). — № 1. — С. 157–163. DOI: <https://doi.org/10.32782/TNU-2663-6468/2024.1/27>.
 17. *Запорожець Т. В.* Перспективні напрями запровадження механізмів інтелектуального управління в діяльності органів публічної влади / Т. В. Запорожець // Вісник Національної академії державного управління при Президентові України. — 2020. — № 2. — С. 36–44. (Серія: “Державне управління”).
 18. *Дикань О.* Впровадження штучного інтелекту в державному управлінні / О. Дикань, У. Сторожилова, О. Васильєв, М. Третяк // Вісник економіки, транспорту і промисловості. — 2025. — № 90. — С. 60–71. DOI: <https://doi.org/10.18664/btie.90.337078>.
 19. *Osborne D.* Reinventing Government: How the Entrepreneurial Spirit Is Transforming the Public Sector / D. Osborne, T. Gaebler // Basic Books. — 1992.
 20. *Walker G.* A Review of Sociotechnical Systems Theory: A Classic Concept for New Command and Control Paradigms / G. Walker, N. Stanton, P. Stanton, D. Jenkins // Theoretical Issues in Ergonomics Science. 2008. — No. 9. — P. 479–499. DOI: <https://doi.org/10.1080/14639220701635470>.
 21. *Margetts H.* The Second Wave of Digital-Era Governance: A Quasi-Paradigm for Government on the Web / H. Margetts, P. Dunleav // Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences. — 2013. — 371. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0382>.
 22. *Нестеренко О. В.* Технологічний розвиток електронного урядування як інноваційна стратегія держави / О. В. Нестеренко, В. В. Федоров, П. П. Яцук, В. П. Чабан // Наука, технології, інновації. — 2025. — № 3. — С. 77–93. DOI: <http://doi.org/10.35668/2520-6524-2025-3-09>.
 23. *Куйбіда В. С.* Цифрове урядування в Україні: базові дефініції понятійно-категоріального апарату / В. С. Куйбіда // Вісник Національної академії державного управління при Президентові України. — 2018. — № 1. — С. 5–10. (Серія: “Державне управління”).
 24. *Данкевич Є. М.* Цифрові інструменти удосконалення державної політики та урядування в умовах глобальних викликів / Є. М. Данкевич, В. Є. Данкевич // Актуальні проблеми економіки. — 2025. — № 1. — С. 95–105. DOI: <https://doi.org/10.32752/1993-6788-2025-1-289-95-105>.
 25. *Максіменцева Н. О.* Виклики застосування штучного інтелекту у сфері публічного управління, урядування та послуг / Н. О. Максіменцева, М. Г. Максіменцев // Інвестиції: практика та досвід. — 2024. — № 4. — С. 204–213. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6814.2024.4.204>.
 26. *Maluleka S.M.* External Saas Readiness Influences Towards Improved E-Government Implementation in the Public Sector / S. M. Maluleka, A. Budree, J.-P. Van Belle // Proceedings of the International Conference on eDemocracy and eGovernment (ICEDEG, 2025). — 2025. — P. 303–310. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEDEG65568.2025.11081670>.
 27. *O'Reilly T.* Government as a Platform / T. O'Reilly // Innovations: Technology, Governance, Globalization. — 2011. — Vol. 6. — No 1. — P. 13–40. DOI: https://doi.org/10.1162/INOV_a_00056.
 28. Упровадження концепції “Держава як платформа”: метод оцінювання та оптимальна людиноцентрична структура для відповіді на технологічні виклики [Електронний ресурс] / І. В. Дунаєв, Л. О. Белова, А. А. Кудь, В. Б. Родченко // Науково-дослідний центр економіко-правових рішень у сфері застосування технологій розподіленого реєстру. — 2023. — 29 с. — Режим доступу: <https://www.blockchainukraine.org/our-publications/>.
 29. *Voorberg W. H.* A Systematic Review of Co-Creation and Co-Production: Embarking on the Social Innovation Journey / W. H. Voorberg, V. J. J. M. Bekkers, L. G. Tummers // Public Management Review. — 2015. — Vol. 7. — No. 9. — P. 1333–1357. DOI: <https://doi.org/10.1080/14719037.2014.930505>.
 30. *Susilowati Y. T.* Smart Public Service: Synergy of Artificial Intelligence and Big Data Analytics in the Revolution of Modern Bureaucratic Systems [Electronic resource] / Y. T. Susilowati // Intelligent transformation: AI's Role in Business, Governance, Learning, and Spiritual Growth, Chapter XI, Yayasan Drestanta Pelita Indonesia. — 2025. — P. 165–179. — Access mode: <https://publisher.yayasandpi.or.id/index.php/dpipress/issue/view/56>.

REFERENCES

- Schartum, D. W. (2002). ICT, service policy and changing division of labour between citizens and government. *Electronic Communication Law Review*, 9 (1), 7-22. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016345029779>.
- Kalvet, T. (2005). Digital Divide and the ICT Paradigm Generally and in Estonia. *Encyclopedia of Developing Regional Communities with Information and Communication Technology*, 182-187. DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-59140-575-7.ch032>.
- Loukis, E., & Kokolakis, S. (2003). Computer supported collaboration in the public sector: The ICTE-PAN project, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2739, 181-186. DOI: https://doi.org/10.1007/10929179_34.
- Jansen, A. (2012). The understanding of ICTs in public sector and its impact on governance. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 744, 174-186. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-33489-4_15.
- Sandeep, M. S., & Ravishankar, M. N. (2014). The continuity of underperforming ICT projects in the public sector. *Information and Management*, 51 (6), 700-711. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.im.2014.06.002>.
- Buccoliero, L., & Calciolari, S. (2007). Information and communication technology evaluation: Role, methods and practices in the public sector. *In book: Developments in E-Government. Innovation and the Public Sector. Publisher: IOS. Editors: Griffin, D. and Trevorrow, P. and Halpin, E. F.*, 152-167.
- Khan, S., Ullah, S., & Nobanee, H. (2024). ICT diffusion, E-governance, and sustainability in the digital era. *Sustainable Futures*, 8, 100272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100272>.
- Marzouki, A., Chouikh, A., Mellouli, S., & Haddad, R. (2023). Barriers and actions for the adoption and use of Artificial Intelligence in the public sector. *Proceedings of the 16th International Conference on Theory and Practice of Electronic Governance ICEGOV '23*, 94-100. DOI: <https://doi.org/10.1145/3614321.3614334>.
- Nesterenko, O. V. (2004). Metodolohiia vykorystannia suchasnykh informatsiinykh tekhnolohii v informatsiino-analitychnykh systemakh orhaniv derzhavnoi vlady. [Methodology of using modern information technologies in information and analytical systems of state authorities]. *Reiestratsiia, zberihannia i obrobka danykh* [Data registration, storage and processing], 6 (1), 62-74. [in Ukr.].
- Loiko, L. I., & Khoch, I. Kh. (2010). Instrumenty, mekhanizmy ta evoliutsiia elektronnoho uriaduvannia [Tools, mechanisms and evolution of e-government]. *Pravova derzhava* [Rule of law], 21, 471-476. [in Ukr.].
- Fedoniuk, S. V. (2011). "Khmarni" tekhnolohii v elektronnomu vriaduvanni ["Cloud" technologies in e-government]. *Nauk. visn. Volyn. nats. un-tu im. Lesi Ukrainky* [Scientific Bulletin of the Volyn National University named after Lesya Ukrainka], 20, 13-19. [in Ukr.].
- Klymash, M. M., Baidun, N. A., & Kostiv, O. L. et al. (2019). Stvorennia efektyvnykh IKT-platform elektronnoho uriaduvannia interaktyvnoho typu: analiz arkhitektury system rozpovsiudzhennia kontentu [Creating effective interactive e-government ICT platforms: analysis of the architecture of content distribution systems]. *Naukovi zapysky Ukrainskoho naukovo-doslidnoho instytutu zviazku* [Scientific paper of the Ukrainian Research Institute of Communications], 3, 31-45. [in Ukr.].
- Vasylyshyn, S., & Opirskyi, I. (2022). Rozrobka bezpeky system elektronnoho uriaduvannia na osnovi blokcheinu Developing security for blockchain-based e-government systems]. *Zakhyst informatsii* [Information protection], 24 (2), 58-70. [in Ukr.].
- Trofymchuk, O., Nesterenko, O., & Netesin, I. (2022). Methodology for designing information and analytical systems for administrative management. *Science and Innovation*, 18 (4), 25-40. DOI: <https://doi.org/10.15407/scine.18.04.025>.
- Tsyra, O. V. (2024). Tsyfrova transformatsiia orhaniv derzhavnoho upravlinnia: rol IKT v optymizatsii upravlinskykh protsesiv. [Digital transformation of public administration: the role of ICT in optimizing management processes]. *Economic synergy*, 4, 171-181. DOI: <https://doi.org/10.53920/ES-2024-4-12> [in Ukr.].
- Siaska, O. V., Polishchuk, O. Yu., & Savchenko, O. R. (2024). Novi informatsiini tekhnolohii v publichnomu upravlinni: problemy ta perspektyvy. [New information technologies in public administration: problems and prospects]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Publichne upravlinnia ta administruvannia* [Scientific Notes of the V. I. Vernadsky TNU. Series: Public Management and Administration], 35 (74), 1, 157-163. DOI: <https://doi.org/10.32782/TNU-2663-6468/2024.1/27> [in Ukr.].
- Zapozhets, T. V. (2020). Perspektyvni napriamy zaprovadzhennia mekhanizmiv intelektualnoho upravlinnia v diialnosti orhaniv publichnoi vlady [Promising directions for introducing intelligent management mechanisms in the activities of public authorities]. *Visnyk Natsionalnoi akademii derzhavnoho upravlinnia pry Prezydentovi Ukrainy* [Bulletin of the National Academy of Public Administration under the President of Ukraine], 2, 36-44. [in Ukr.].
- Dykan, O., Storozhylova, U., Vasyliov, O., & Tretiak, M. (2025). Vprovadzhennia shtuchnoho intelektu v derzhavnomu upravlinni. [Implementation of artificial intelligence in public administration] *Visnyk ekonomiky, transportu i promyslovosti* [Bulletin of Economy, Transport and Industry], 90, 60-71. DOI: <https://doi.org/10.18664/btie.90.337078>. [in Ukr.].
- Osborne, D., & Gaebler, T. (1992). Reinventing Government: How the Entrepreneurial Spirit Is Transforming the Public Sector. Basic Books.
- Walker, G., Stanton, N., Salmon, P., & Jenkins, D. (2008). A Review of Sociotechnical Systems Theory: A Classic Concept for New Command and Control Paradigms. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 9, 479-499. DOI: <https://doi.org/10.1080/14639220701635470>.
- Margetts, H., & Dunleavy, P. (2013). The Second Wave of Digital-Era Governance: A Quasi-Paradigm for Government on the Web. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 371. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0382>.
- Nesterenko, O. V., Fedorov, V. V., Yatsuk, P. P., & Chaban, V. P. (2025). Tekhnolohichniy rozvytok elektronnoho uriaduvannia yak innovatsiina stratehiia derzhavy. [Technological development of e-governance as an innovative strategy of the state]. *Nauka, tekhnolohii, innovatsii* [Science, technology, innovation], 3, 77-93. DOI: <http://doi.org/10.35668/2520-6524-2025-3-09> [in Ukr.].

23. Kuibida, V. S. (2018). Tsyfrove vriaduvannia v Ukraini: bazovi definitsii poniatiino-katehorialnogo aparatu. [Digital governance in Ukraine: basic definitions of the conceptual and categorical apparatus]. *Visnyk Natsionalnoi akadnyii derzhavnoho upravlinnia pry Prezydentovi Ukrainy. Serii Derzhavne upravlinnia* [Bulletin of the National Academy of Public Administration under the President of Ukraine. Public Administration Series], 1, 5-10. [in Ukr.].
24. Dankevych, Y., & Dankevych, V. (2025). Tsyfrovii instrumenty udoskonalennia derzhavnoi polityky ta vriaduvannia v umovakh hlobalnykh vyklykiv [Digital tools for enhancing public policy and governance in the context of global challenges]. *Aktualni problemy ekonomiky* [Actual Problems of Economics], 1, 95-105. DOI: <http://doi.org/10.32752/1993-6788-2025-1-289-95-105> [in Ukr.].
25. Maksimentseva, N. O., & Maksimentsev, M. H. (2024). Vyklyky zastosuvannia shtuchnogo intelektu u sferi publichnoho upravlinnia, vriaduvannia ta posluh [Challenges of applying artificial intelligence in the field of public administration, governance and services]. *Investytsii: praktyka ta dosvid* [Investments: practice and experience], 4, 204-213. DOI: <http://doi.org/10.32702/2306-6814.2024.4.204>. [in Ukr.].
26. Maluleka, S. M., Budree, A., & Van Belle, J.-P. (2025). External Saas Readiness Influences Towards Improved E-Government Implementation in the Public Sector. *Proceedings of the International Conference on eDemocracy and eGovernment (ICEDEG, 2025)*, 303-310. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEDEG65568.2025.11081670>.
27. O'Reilly T. (2011). Government as a Platform. *Innovations: Technology, Governance, Globalization*, 6 (1), 13-40. DOI: https://doi.org/10.1162/INOV_a_00056.
28. Dunaiev, I. V., Bielova, L. O., Kud, A. A., & Rodchenko, V. B. (2023). Uprovadzhennia kontseptsii "Derzhava yak platforma": metod otsiniuvannia ta optymalna liudynotsentrychna struktura dlia vidpovidni na tekhnolohichni vyklyky [Implementing the "State as a Platform" Concept: An Assessment Method and Optimal Human-Centered Structure for Responding to Technological Challenges]. *Naukovo-doslidnyi tsentr ekonomiko-pravovykh rishen u sferi zastosuvannia tekhnolohii rozpodilenoho reiestru* [Research Center for Economic and Legal Solutions in the Field of Distributed Ledger Technologies]. Retrieved from: <https://www.blockchainukraine.org/our-publications/>. [in Ukr.].
29. Voorberg, W., Bekkers, V., & Tummers, L. (2014). A Systematic Review of Co-Creation and Co-Production: Embarking on the Social Innovation Journey. *Public Management Review*, 7 (9), 1333-1357. DOI: <https://doi.org/10.1080/14719037.2014.930505>.
30. Susilowati, Y. T. (2025). Smart Public Service: Synergy of Artificial Intelligence and Big Data Analytics in the Revolution of Modern Bureaucratic Systems. In book: *Intelligent transformation: AI's Role in Business, Governance, Learning, and Spiritual Growth, Chapter XI, Yayasan Drestanta Pelita Indonesia*, 165-179. Retrieved from: <https://publisher.yayasandpi.or.id/index.php/dpipress/issue/view/56>.

I. V. KAZACHKOV, D. Sc. in Engineering, Professor
O. V. NESTERENKO, D. Sc. in Engineering, Professor
V. V. FEDOROV, PhD in Physics and Mathematics
P. P. YATSUK, PhD in Engineering

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES IN PUBLIC ADMINISTRATION: FROM ITS BEGINNINGS TO ITS USE UNDER THE CHALLENGES OF MARTIAL LAW

Abstract. The purpose of this study is to determine the ways of developing the use of information and communication technologies by public administration bodies of Ukraine to ensure interaction with society from the early stages of informatization to the new reality of wartime. A systematic review of models of ICT application in public administration bodies was conducted based on publications from the international scientific community and domestic scientific literature. An assessment of the current state of ICT application in public administration bodies in the country and worldwide, as well as the directions for further development in this area was carried out. An assessment of the factors influencing performance of the main functions of public administration bodies was formed. The key challenges and needs of public administration under martial law that can be addressed through ICT were analyzed. The main results indicate the important role of the technological component in the development of public administration in the conditions of e-government and in ensuring its effectiveness. It is thanks to the use of modern information and communication technologies that e-government as a general model is transformed into new forms of support for both the main activities of public administration bodies and their interaction with businesses and citizens. At the same time, there are gaps between the capabilities of modern technological tools and how they are used to ensure e-government. Many modern technological trends in the field of public administration support are either not used at all or receive relatively little attention. The main reasons for this are the slow adaptation of the state system to current technological changes, as well as the economic and other resource difficulties of introducing and mastering modern ICT. The conducted systematic review can be useful for decision-makers, as well as directly for scientists and specialists in various fields involved in the processes of forming and modernizing information technologies, systems and resources of public administration bodies.

Keywords: digital transformation, public authorities, e-government, information and communication technologies, administrative services, artificial intelligence.

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

Казачков Іван Васильович — д-р техн. наук, проф., Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя, вул. Графська, 2, Ніжин, Україна, 16602; +38 (097) 319-13-43; kazachkov.iv@ndu.edu.ua; ORCID: 0000-0001-9645-563X

Нестеренко Олександр Васильович — д-р техн. наук, проф., Міжнародний європейський університет, просп. Академіка Глушкова, 42, м. Київ, Україна, 03187; +38 (097) 757-27-96; oleksandr_nesterenko@ieu.edu.ua; ORCID: 0000-0001-5329-889X

Федоров Володимир Володимирович — канд. фіз.-мат. наук, Міжнародний європейський університет, просп. Академіка Глушкова, 42, м. Київ, Україна, 03187; +38 (073) 666-09-99; volodymyr.fedorov@ieu.edu.ua; ORCID: 0009-0004-2901-3646

Яцук Петро Петрович — канд. техн. наук, Міжнародний європейський університет, просп. Академіка Глушкова, 42, м. Київ, Україна, 03187; +38 (050) 441-05-05; petro_yatsuk@ieu.edu.ua; ORCID: 0009-0002-7124-4849

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kazachkov I. V. — D. Sc. in Engineering, Professor, Nizhyn Mykola Gogol State University, 2, Graftska Str., Nizhyn, Ukraine, 16602; +38 (097) 319-13-43; kazachkov.iv@ndu.edu.ua; ORCID: 0000-0001-9645-563X

Nesterenko O. V. — D. Sc. in Engineering, Professor, International European University, 42, Akademika Glushkova Ave., Kyiv, Ukraine, 03187; +38 (097) 757-27-96; oleksandr_nesterenko@ieu.edu.ua; ORCID: 0000-0001-5329-889X

Fedorov V. V. — PhD in Physics and Mathematics, International European University, 42, Akademika Glushkova Ave., Kyiv, Ukraine, 03187; +38 (073) 666-09-99; volodymyr.fedorov@ieu.edu.ua; ORCID: 0009-0004-2901-3646

Yatsuk P. P. — PhD in Engineering, International European University, 42, Akademika Glushkova Ave., Kyiv, Ukraine, 03187; +38 (050) 441-05-05; petro_yatsuk@ieu.edu.ua; ORCID: 0009-0002-7124-4849

Надійшла до редакції 17.01.2026

Прийнята до друку 17.02.2026



<https://doi.org/10.35668/2520-6524-2026-1-10>

UDC 621.396.676 (045)

A. V. VISHNEVSKY, PhD in Engineering, Associate Professor

ANTENNA DATABASE FOR AIRCRAFT ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY PROBLEMS 3D-to-2D GEOMETRY TRANSFORMATION TECHNIQUE

Abstract. This paper proposes a 3D-to-2D geometry transformation algorithm that significantly decreases the number of computational operations and, as a result, the computation time required for solving complex electromagnetic compatibility problems. The transformation algorithm consists of three steps. In the first step, a matrix of resulting 2D models is formed from the initial 3D problem. The second step consists of synthesizing the solution of the initial 3D problem by sifting out unnecessary elements of the solution image matrix while replacing them at the same time with zeros. Finally, the third step implies the researcher's return to the initial 3D model, but this time with a decision made about the EMC problem solution, derived from the solution image matrix elements. This decision is built on their comparison with the results obtained with the help of an experimental method, performed on a real object or a real object's 3D model. Only those elements that are in good agreement with the experimental method results are included in the final decision formulation. A hypothetical aircraft example of electromagnetic compatibility problem computation is given, realized with the help of the finite element method. A corresponding aircraft antenna database has been created.

Keywords: electromagnetic compatibility, finite elements method, fractal, database.

INTRODUCTION

Numerical solution of 3D electromagnetic compatibility (EMC) problems can still be challenging even today. Even with the fast computers that modern scientists dealing with numerical methods use around the world, it is often still really hard to build a precise 3D finite element model (FEM) that can be processed using appropriate engineering software for the computation of complex 3D electromagnetic problems, such as FEKO [1] (**Fig. 1**) and others.

So, a question arises: how to get rid of this “modeling jam” while preserving the main object’s geometry for FEM processing and at the same time overcoming those huge matrices, sometimes consisting of hundreds of thousands or even millions of elements, with their inevitable and trivial factorization crashes that occur during inversion when attempting to obtain the desired solution to an EMC problem.

RELEVANCE OF THE TOPIC

New ways of solving electromagnetic compatibility (EMC) problems are always welcome in the international scientific community today, especially in the field of aircraft EMC, since this branch is developing so fast. This is why the topic of the research is relevant. Also, the use of the proposed database for the systematization of information about the desirable places for antenna installation is needed, because it helps to greatly facilitate antenna placement at the aircraft design stage.

The goal of the paper — to implementation a novel 3D-to-2D geometry transformation technique for the preliminary assessment of desirable places for aircraft antenna installation with the help of the finite element method, together with the development of a specialized MySQL database — has been achieved.

RELATED WORKS

An approach is proposed based on the well-known phenomenon of the fractal structure of nature [2]. So, if a computationally demanding 3D electromagnetic model can be changed at once into an easily operated 2D clone without losing credibility and at least satisfactory verification of the solution of the task under consideration, it will give a great push to FEM research, especially in PC simulation research, compared to experimental investigation techniques. How to do this? Well, the answer seems to be obvious: of course, by slicing the initial 3D model [3] into a number of 2D models that could be understood as some “fractals” of the initial complex aircraft topology. The numerical model was realized with the help of COMSOL Multiphysics®, as, for example, in [4]. The validity of the research results has been proved in [5]. The main condition for numerical FEM modeling of electrodynamic structures has been satisfied in this research for all operating frequencies: the length of a model element is always kept at least 10 times less than the wavelength. Modeling instruments (FEKO and COMSOL®) [1; 6] have been tested on many different multidisc-

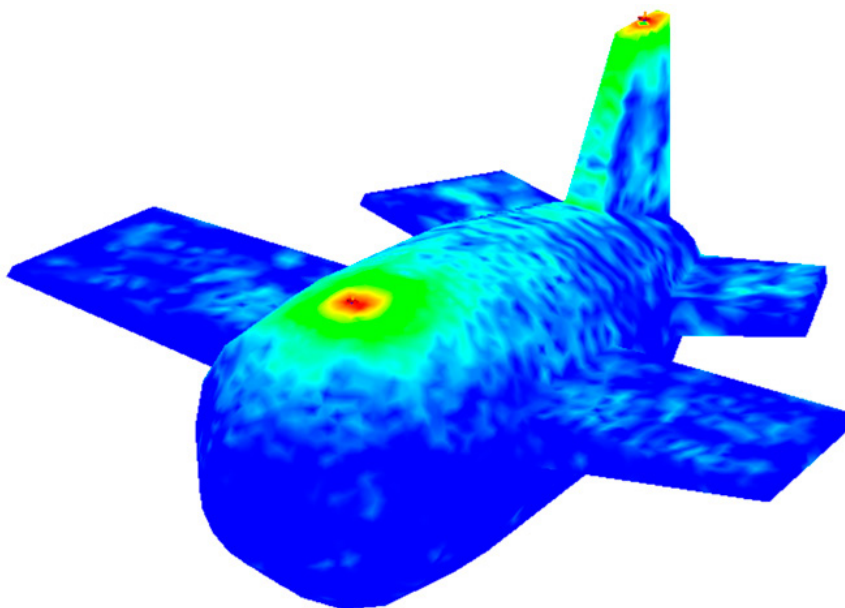


Fig. 1. Hypothetical aircraft model (3D geometry) with two wire antennas installed and the induced currents on it (FEKO)

plinary applied physics problems, which provides additional evidence of their reliability. Several recent works about fractal antennas are referenced in [7–9].

Working equation. As we mainly concentrate our efforts on TE electromagnetic (EM) waves, it is clear from [4–6] that our working differential equation in partial derivatives for describing the physical processes in this model is

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times E) - (\varepsilon_r - j\sigma / \omega \varepsilon_0) k_0^2 E = 0 \quad (1)$$

μ_r — relative magnetic permeability; E — electric field intensity at the monitoring point (V/m); ε_r — relative dielectric permittivity; σ — conductivity of a proxy element, (Sm/m); ω — angular frequency of oscillations, (Rad/s); $\varepsilon_0 = 10^{-9} / 36\pi$ — electric constant, (F/m); $k_0 = 2\pi/\lambda$ — wave number; λ — wavelength of oscillations, (m).

The partial differential equation in partial derivatives (1) is solved, in our case, by Comsol® software using the FEM method.

3D-to-2D geometry transformation technique

Step 1. The procedures may differ, taking into account the peculiarities of the FEM software code and design used, and the peculiarities of the task being investigated. A bunch of such 2D fractals of the initial 3D model (I3DM) should be considered as a matrix of resulting 2D models (R2DM) elements, as follows:

$$Z = \begin{pmatrix} \chi_{xy,1} & \chi_{xy,\dots} & \chi_{xy,M} \\ \chi_{xz,1} & \chi_{xz,\dots} & \chi_{xz,M} \\ \chi_{yz,1} & \chi_{yz,\dots} & \chi_{yz,M} \end{pmatrix} \quad (2)$$

In (2) $\chi_{yz,k}$ contain information not only about the 2D topology and geometry of the k -th (of M) 2D model having been sliced along the xy -plane, but also all the initial data needed for the problem being solved, like positioning and radiation characteristics of a radiative antenna, the boundary conditions, the FEM grid with all the coordinates, etc. Here xy , xy , yz are the three main planes in the Cartesian coordinates system, along which the slicing technique should be performed; M — any positive integer number, defined by the modeler and being guided by practical necessity and advisability of the modeling problem. Custom projections can also be applied for a particular problem, too.

A researcher should treat all or some number of these R2DMs, which can be described as using some FEM technique operator for application to obtain the solution matrix while keeping the results obtained — it is the solution image matrix (SIM) (calculated on a PC using a chosen

FEM technique). The whole simulation process should be described as follows:

$$X \cdot Q = Y. \quad (3)$$

When the analysis of (3) is done, now a researcher should implement step two of this technique, also referred here as FST (fractal slicing technique).

Step 2. It consists of synthesizing the solution of the initial 3D problem solution by sifting out unnecessary or doubtful SIM elements replacing them at the same time with zeros. It’s an intuitive, heuristic process, and may be the most complicated step, because the decisions taken about the positive or negative values of the corresponding SIM elements (seeds) ought to be based on the judgment of an experimentalist, and, unfortunately this “human factor” cannot be completely eliminated.

Finally, after completing the second FST step, one must perform the third and the last step.

Step 3. This step implies the researcher’s return to the I3DM but now with a logical decision made about the EMC problem solution derived from the SIM seeds. This decision is built on a comparison of the SIM elements to the results obtained with the help of an experimental method (EM) performed on a real object or, at least, a real object’s 3D model. Only those elements that comply well with the EM results are included in the decision formulation. The decision is simply the rule:

$$\mathfrak{R} = \begin{pmatrix} Q_{xy,1} \wedge EM_{xz,1} & \dots & Q_{xy,M} \wedge EM_{xy,M} \\ \dots & \dots & \dots \\ Q_{yz,1} \wedge EM_{yz,1} & \dots & Q_{yz,M} \wedge EM_{yz,M} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

where $Q_{nm,M} \wedge EM_{nm,M} = 1$ if they comply, and $=-1$ when they don’t. PC modeling is taken as good (there is a convergence of solution), if and only if in (4) $\mathfrak{R}_{ij} > 0$. With this FST kept in mind, let’s proceed now to it’s practical realization for a EMC problem consisting in placing antennas on aircraft’s fuselage.

Proxy model. The 2D finite element (FEM) model of a hypothetical aircraft treated in this research is depicted in **Fig. 2**. It contains 32,256 triangular elements. The number of elements here is reduced to 2,016 for the reason of better wire-grid mesh visibility.

The numerical model was realized with the help of Comsol Multiphysics®, as for example in [3]. The validity of the research results has been proved in [4]. The main condition for numerical FEM modeling of electrodynamic structures has been satisfied in this research for all operating frequencies: the length of a model element is always kept at least 10 times less than λ . The modeling

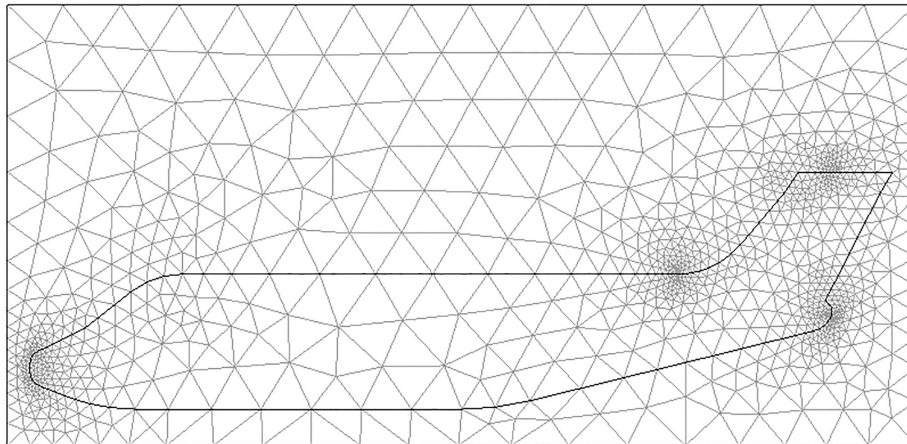


Fig. 2. FEM model of a hypothetical aircraft (2D geometry)

instrument (Comsol®) has been tested on many different multidiscipline applied physics problems [5], what makes an additional proof.

Boundary conditions. Perfect electric conductor boundary conditions were used on all the edges joining the aircraft fuselage and air space domains. At the edges where the plane TE wave is outgoing from the structure of the FEM model, scattering boundary conditions were used with the magnitude of the electric field $E_m = 0 \text{ V/m}$.

Research. In **fig. 3** the electric field (z-component) radiation pattern for a point keel antenna working at 200 MHz is presented.

We place an isotropic point antenna with current $I_0 = .1A$ on the keel of an yz-fractal slice of a hypothetical aircraft (**without yet committing ourselves to a more practical model, which can**

be done comparatively easily later). It appears to be nothing more than just a 2D fractal of the initial 3D aircraft’s FEM model (like in [2] and [3], not shown in the paper for lack of actual need). So, in our case the initial R2DM matrix will consist of only one element: a sloce in the yz-th plane, cut directly through the middle of the fuselage:

$$X = \langle \chi_{yz,1} \rangle \tag{5}$$

SIM matrix, obtained by applying the differential operator Q (3) to the problem described by X (5) will contain only one element: $Y = \langle Y_{yz,1} \rangle$. This is the simplest possible case. Let us say that the EM (for $EM_{yz,1}$) has resulted itself in the real placing of the pair of antennas on an aircraft, that has a *similar* (to the aircraft we treat) design, size, antenna operating frequencies, radiated powers

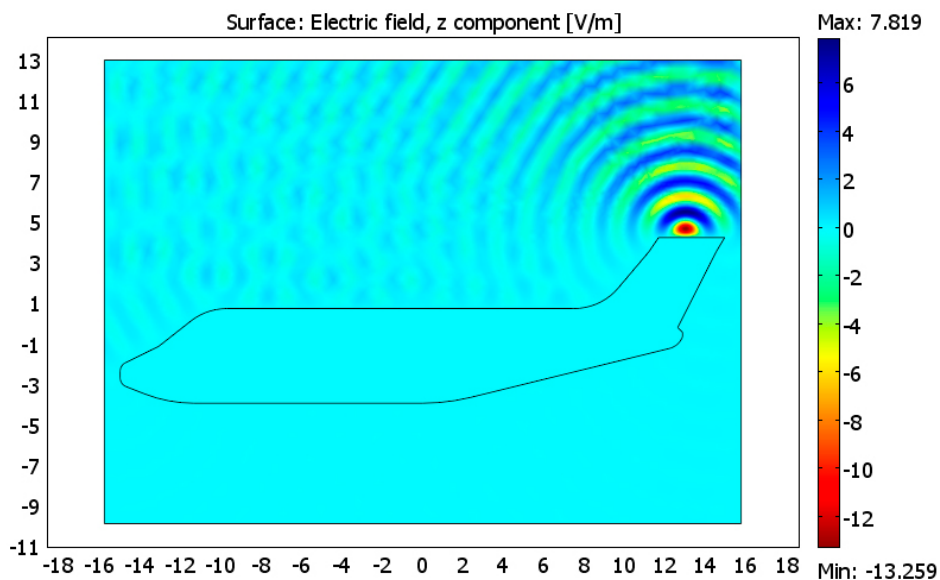


Fig. 3. Radiation pattern at 200 MHz

and directional characteristics to the aircraft under consideration. Then, by applying the rule $\mathfrak{R}_{yz} = Y_{yz,1} \wedge EM_{yz,1}$ (4) we will determine the placing: if $\mathfrak{R}_{yz} = 1$, then a positive decision is made about the possibility of installing the antennas at the desired or predicted spots on the fuselage; on the contrary, if $\mathfrak{R}_{yz} = 0$ (the FST and EM do not comply), then **no custom installation is advised** to the aircraft's constructor:

a) 100 MHz Having applied FST to this problem (in the case of a 100 MHz operating frequency of a point radiative antenna placed on the aircraft's keel), we've obtained the results shown below for the z-component of the normalized surface current density distribution on the 2D FEM model's fuselage (**fig. 4, a**);

b) 120 MHz (the same configuration and the same current in the radiating keel antenna). Having used FST for this problem, we've found the results for the current densities, generated by the keel's radiating antenna, shown in **fig. 4, b**;

c) 150 MHz (same model and current). After analyzing the problem with FST, we've obtained

a theoretically predictable and understandable corresponding graph (**fig. 4, c**);

d) 200 MHz (the same configuration and the same current). Having handled this problem with FST, we've found the following results for the z-component of the normalized surface current density, generated by the keel's isotropic point antenna (**fig.4, d**).

Database. After identifying the optimal locations for antenna installation, we create an antennas database to store the relevant information (**fig. 5**). The database contains five fields. The first field stores the antenna ID (**id**). The second one stores the antenna name (**ant_name**). The third field contains information about antenna type (**ant_type**). The fourth field includes information about the antenna's frequency (**freq**). Finally, the last field describes the recommended x-position of an antenna to be installed (**x**) and includes information about the x coordinate — for the case of a 2D problem, or x, y, and z coordinates for antennas installed in a 3D model. This database helps a lot to systematize information about the antennas

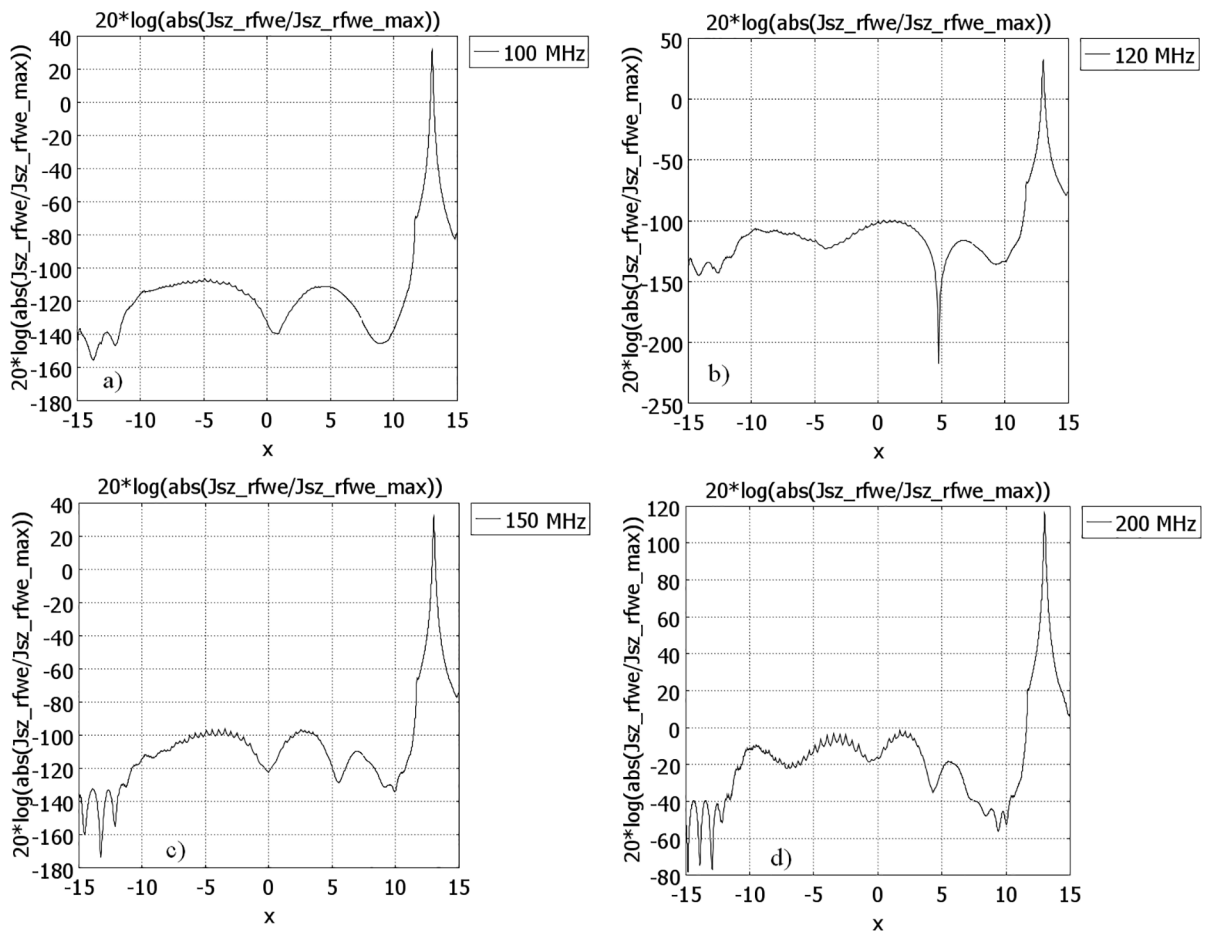


Fig. 4. Normalized current densities (z-component) on upper edge of fuselage, dB at 100 MHz (a), 120 MHz (b), 150 MHz (c), 200 MHz (d) along x axis, m

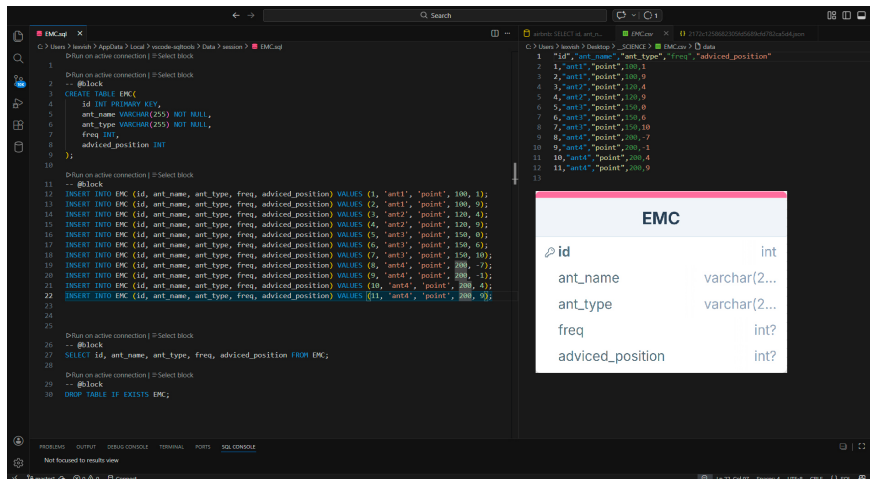


Fig. 5. Database: SQL, CSV file (made in VS Code), DrawSQL.app visualization

placement on the body of an aircraft, because a real aircraft may contain dozens of antennas, so there is a lot of data to be stored in a useful form.

CONCLUSION

From **fig. 4,a** it can be seen that for 100 MHz it's undesirable to put a second antenna in any places between -10,0 m and -2 m; 2,5 m and 7 m; the best places to mount a second antenna are 1 m and 9 m. For 120 MHz (**fig. 4,b**) bad places for installing it are between -9,0 m and -4 m; -3,0 m and 4 m; the best places are -4 m and 9 m, and especially 4,8 m, where normalized currents are experiencing a 100 dB difference (!) from the second best spot. For 150 MHz (**fig. 4,c**) it's unwise to set any antennas between -7 m and -2 m; 2 m and 4 m. This is so because the fuselage currents induced by the keel antenna radiation are the highest in these regions. So, they will produce the highest electromagnetic fields around the fuselage and this will result in a deterioration of the EMC situation in the Fresnel zone (close to the aircraft fuselage), if any allocation of a second antenna takes place. The best places are 0 m, 6 m, and 10 m where the surface currents are the lowest. For 200 MHz (**fig. 4,d**) the recommended places for antenna installation are -7 m, -1 m, 4 m and 9 m.

The FST algorithm helps to overcome numerical calculation difficulties encountered in realistic 3D FEM models of aircraft, helicopters, and other multiple-antenna carrying vehicles. It establishes the rules of constructing equivalent 2D models of such systems, and, after doing so, gives the techniques for making the final decision about the antenna installation spots on the airplane's fuselage. This technique can save a lot of money at the stage of aircraft construction.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. FEKO [Electronic resource]. — Access mode: <https://altair.com/feko>.
2. *Mittra R.* Computer Techniques for Electromagnetics / R. Mittra. — Oxford, New York : Pergamon Press, 1973. — 403 p.
3. *Vishnevsky A. V.* 2D photonic crystal filter with dewdrop-petal structure / A. V. Vishnevsky // Proceedings o 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON, Crakow, Poland, 9–11 May, 2016). — Crakow, 2016. — P. 1–3.
4. *Vishnevsky A. V.* Radiation Of a Current-Conductive 2D Object of a Complex Shape [Electronic resource] / A. V. Vishnevsky // Proceedings of IEEE Microwaves, radar and remote sensing symposium (MRRS-2011, Kyiv, August 25–27, 2011). — Kyiv, 2011. — P. 135–138. — Access mode: <https://www.proceedings.com/content/012/012961webtoc.pdf>.
5. COMSOL [Electronic resource]. — Access mode: www.comsol.com.
6. *Garu P.* Design and Analysis of a PDLC-Based Reconfigurable Hilbert Fractal Antenna for Large and Fine THz Frequency Tuning / P. Garu, W. C. Wang // Micromachines. — 2022. — 13 (6). — 964. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi13060964>.
7. *Venneri F.* Fractal Metasurfaces and Antennas: An Overview for Advanced Applications in Wireless Communications / F. Venneri, S. Costanzo, A. Borgia // Applied Sciences. — 2024. — 14 (7). — 2843. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14072843>.
8. *Kim J.* Ultra-Wideband Double-Pentagonal Fractal Antenna for C-, X-, Ku- and K-Band Wireless Applications / J. Kim, T. Jang, S. Lim // Micromachines. — 2025. — 16 (11). — 1237. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi16111237>.

REFERENCES

1. FEKO. Retrieved from: <https://altair.com/feko>.
2. Mittra, R. (1973). Computer Techniques for Electromagnetics. Oxford, New York, 403 p.
3. Vishnevsky, A. V. (2016). 2D photonic crystal filter with dewdrop-petal structure. *Proceedings o 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON)* (Crakow, Poland, May 9-11, 2016). Crakow, P. 1-3.
4. Vishnevsky, A. V. (2011). Radiation Of a Current-Conductive 2D Object of a Complex Shape. *Proceedings*

- of *IEEE Microwaves, radar and remote sensing symposium (MRRS-2011)* (Kyiv, August 25-27, 2011). Kyiv, P.135-138. Retrieved from: <https://www.proceedings.com/content/012/012961webtoc.pdf>.
5. COMSOL. Retrieved from: www.comsol.com.
6. Garu, P., & Wang, W. C. (2022). Design and Analysis of a PDLC-Based Reconfigurable Hilbert Fractal Antenna for Large and Fine THz Frequency Tuning. *Micromachines*, 13(6), 964. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi13060964>.
7. Venneri, F., Costanzo, S., & Borgia, A. (2024). Fractal Metasurfaces and Antennas: An Overview for Advanced Applications in Wireless Communications. *Applied Sciences*, 14 (7), 2843. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14072843>.
8. Kim, J., Jang, T., & Lim, S. (2025). Ultra-Wideband Double-Pentagonal Fractal Antenna for C-, X-, Ku- and K-Band Wireless Applications. *Micromachines*, 16 (11), 1237. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi16111237>.

О. В. ВИШНІВСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц.

БАЗА ДАНИХ АНТЕН ДЛЯ ТЕХНІКИ 3D-2D ПЕРЕТВОРЕННЯ ГЕОМЕТРІЇ В ЗАДАЧАХ Авіаційної ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ

Резюме. У статті запропоновано алгоритм перетворення 3D-геометрії в 2D, що дає змогу значно зменшити кількість обчислювальних операцій і, як наслідок, час обчислення для розв'язання складних задач електромагнітної сумісності. Алгоритм перетворення передбачає три кроки. На першому кроці формується матриця результативних 2D-моделей, створених на основі початкової 3D-задачі. Другий крок полягає в синтезі початкового 3D-розв'язку задачі шляхом відсіювання непотрібних елементів 2D-матриці моделей розв'язку SIM, з одночасною заміною їх нулями. Третій крок передбачає повернення дослідника до початкової 3D-моделі, але цього разу з рішенням щодо розв'язку задачі EMC, отриманим на основі сідів матриці моделей розв'язку. Це рішення будується на їх порівнянні з результатами, отриманими за допомогою експериментального методу, виконаного на натурному об'єкті або його 3D-моделі. До остаточного формулювання рішення буде включено лише ті значення, які добре відповідають результатам експериментального методу. Наведено гіпотетичний приклад обчислення задачі електромагнітної сумісності літака, реалізований за допомогою методу скінченних елементів. Створено відповідну базу даних.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, метод скінченних елементів, фрактал, база даних.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Вишнівський Олександр Володимирович — канд. техн. наук, доц., Державний торговельно-економічний університет, вул. Кіото, 19, м. Київ, Україна, 02156; a.vishnevsky@ukr.net; ORCID: 0000-0002-0510-7283

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРА

Vishnevsky A. V. — PhD in Engineering, Associate Professor, State University of Trade and Economics, 19, Kioto Str., Kyiv, Ukraine, 02156; a.vishnevsky@ukr.net; ORCID: 0000-0002-0510-7283

Надійшла до редакції 05.03.2026

Прийнята до друку 17.03.2026



В. І. СУЧКОВ, аспірант

МЕТОДИ ПОПЕРЕДНЬОГО ОБРОБЛЕННЯ РЕНТГЕН-ЗНІМКІВ ГРУДНОЇ КЛІТИНИ В ЗАДАЧІ КЛАСИФІКАЦІЇ

Резюме. У статті розглянуто застосування методів попереднього оброблення рентгенівських знімків грудної клітини в задачі автоматизованої класифікації медичних зображень. Попереднє оброблення є важливим етапом підготовки даних, оскільки характеристики вхідних зображень можуть суттєво впливати на ефективність навчання моделей штучного інтелекту та якість аналізу медичних зображень. У дослідженні проаналізовано різні підходи до попереднього оброблення зображень у задачі класифікації рентгенівських знімків за такими класами: COVID-19, пневмонія та відсутність захворювання. Зокрема розглянуто застосування фільтра Гауса, медіанного фільтра та методу адаптивного вирівнювання гістограми з обмеженням контрасту (CLAHE), які використовуються відповідно для згладжування шуму, збереження контурів і підвищення локального контрасту зображень. Результати дослідження підтверджують, що застосування методів попереднього оброблення підвищує ефективність класифікації рентгенівських зображень. Метод адаптивного вирівнювання гістограми з обмеженням контрасту продемонстрував найкращі результати класифікації під час проведених експериментів.

Ключові слова: згортоква нейронна мережа, попереднє оброблення даних, датасет, розпізнавання образів, штучний інтелект.

ВСТУП

У статті досліджено застосування методів штучного інтелекту та розпізнавання образів для класифікації рентгенівських знімків легень за такими класами: COVID-19, пневмонія та відсутність захворювання.

Стан дихальної системи при захворюваннях легень оцінюється за допомогою аналізу рентгенівських знімків і КТ-зображень, що є важливим етапом діагностики та контролю лікування пацієнтів. Пандемія COVID-19, що розпочалася у 2020 р., стимулювала розроблення нових інструментів класифікації захворювань для підвищення ефективності діагностики та лікування.

Аналіз рентгенівських знімків і КТ-зображень легень є важливим засобом діагностики відповідних захворювань. Проте якість діагностики залежить від обсягу даних, завантаженості персоналу тощо. Застосування комп'ютерного оброблення може підвищити якість та швидкість опрацювання медичних даних.

У багатьох працях попереднє оброблення використовується як допоміжний етап підготовки даних перед навчанням нейронної мережі. У нашому дослідженні основна увага приділяється порівняльному аналізу впливу різних методів попереднього оброблення рентгенівських зображень на результати класифікації. Робота є продовженням дослідження, представленого у [1].

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Для розв'язання проблеми своєчасної та точної діагностики захворювань легень важливою є інтеграція обчислювальних методів, які демонструють високу ефективність під час оброблення даних. У статті розглянуто проблему оброблення даних, які використовуються як датасет для нейронної мережі, а також запропоновано перелік методів попереднього оброблення, що можуть покращити їхню якість.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Значна кількість сучасних досліджень спрямована на автоматичну класифікацію таких захворювань, як COVID-19 та пневмонія, на основі рентгенівських зображень або КТ-зображень грудної клітини з використанням згорткових нейронних мереж.

Важливою задачею в контексті класифікації знімків легень є класифікація різних захворювань. У дослідженні [2] було реалізовано нейронну мережу CoroNet, що досягла 95 % точності тестування в задачі класифікації за ознаками: COVID-19, пневмонія, нормальні випадки. У дослідженні використовувалися датасети [3] та [4].

Для покращення якості рентгенівських або КТ-зображень грудної клітини перед аналізом застосовуються різні методи попереднього

оброблення, зокрема фільтр Гауса [5] та медіанна фільтрація (median filtering) для зменшення шуму [6], а також адаптивне вирівнювання гістограми з обмеженням контрасту (CLAHE) для підсилення локального контрасту [7].

У дослідженні [8] було окреслено задачі використання частотних ознак текстури сегментованих зображень, сформованих на основі матриць суміжності відтінків сірого (Gray Level Co-occurrence Matrix, GLCM). Джерела даних у дослідженні представлені у вигляді КТ-зображень легень. Побудована авторами згортова нейронна мережа з використанням частотних ознак текстури має загальну точність класифікації зображень за типами захворювань 83 %.

У праці [9] автори запропонували модель попереднього оброблення під назвою GAN (Generative Adversarial Network) з глибоким трансферним навчанням. Для дослідження було використано датасет "COVID-19 Image Data Collection" [3]. Попереднє оброблення було реалізовано засобами моделі, описаної вище. Для навчання було використано моделі ResNet18, AlexNet, GoogleNet. Модель ResNet18 показала точність 80,6 % (класифікація COVID-19, пневмонія, нормальні випадки, бактеріальна пневмонія), модель AlexNet показала точність 85,2 % (класифікація COVID-19, нормальні випадки, бактеріальна пневмонія).

У статті [10] було представлено методологію класифікації зображень за наявністю захворювання COVID-19. У межах зазначеного дослідження розроблено гібридну модель для класифікації та сегментації COVID-19 за КТ-зображеннями. Попереднє оброблення зображень передбачало фільтрацію шуму із застосуванням фільтра Гауса та коригування контрасту зображень. Модель досягла точності 95,88 %.

Варто зазначити, що оброблення КТ-зображень здебільшого дає якісніші результати, аніж оброблення рентгенівських знімків. У праці [11] було здійснено детальний аналіз, що підтверджує ефективність КТ-діагностики в порівнянні з рентген-діагностикою. Проте рентген-діагностика має свої переваги, зокрема вищу швидкість, меншу шкідливість, доступність (особливо в країнах, що розвиваються).

Аналіз сучасних досліджень показує, що попереднє оброблення медичних зображень є важливим етапом під час застосування методів штучного інтелекту для задач класифікації. Проте у багатьох працях попереднє оброблення використовується лише як допоміжний етап підготовки даних. У пропонованій статті досліджено вплив різних методів попереднього оброблення рентгенівських зображень грудної клітини на результати їхньої класифікації.

Мета статті полягає в здійсненні порівняльного аналізу методів попереднього оброблення зображень легень та оцінюванні їхнього впливу на ефективність класифікації.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для класифікації зображень легень використовується згортова нейронна мережа (Convolutional Neural Network або CNN). Згортова нейронна мережа (ЗНМ) є одним із важливих методів глибокого навчання в галузі комп'ютерного зору, що допомагає розв'язувати багато задач розпізнавання образів, зокрема і в аналізі медичних зображень для їхньої класифікації. Згортова нейронна мережа автоматично вилучає ознаки із вхідних зображень і навчається поступово розпізнавати їхні особливості: від простих текстурних елементів на ранніх шарах до складних об'єктів на глибших рівнях мережі.

Датасет. У дослідженні використовуються рентгенівські зображення з декількох загальнодоступних датасетів. Датасет "COVID-19 Image Data Collection" [3] містить рентгенівські зображення, які належать до класів: COVID-19, вірусна пневмонія та бактеріальна пневмонія. Додатково рентгенівські зображення бактеріальної, вірусної пневмонії та зображення без ознак захворювання отримано з репозиторію "Chest X-Ray Images (Pneumonia)" [4].

Робочий датасет, використаний у поточному дослідженні, базується на датасеті, що застосовувався в дослідженні [1]. Робоча вибірка містила таку кількість рентгенівських зображень за класами: 392 зображення COVID, 392 зображення без захворювань та 370 зображень пневмонії (бактеріальної та вірусної без урахування COVID). Дані для навчання мають однаковий розподіл (301 зображення на клас). Зображення, що залишилися, використовуються для тестування моделі.

Попереднє оброблення. Першим етапом оброблення зображень є фільтрація шуму із застосуванням фільтра Гауса до вихідного зображення у відтінках сірого з ядром 5×5.

Фільтр Гауса застосовується для згладжування зображення та зменшення високочастотного шуму. Водночас дрібні деталі на зображенні можуть частково розмиватися. Застосовано фільтр з ядром 5×5 пікселів. Приклад застосування відображено на **рис. 1**.

Медіанний фільтр є методом оброблення зображень, що замінює значення пікселя медіаною значень у його околі, що дає змогу зменшувати імпульсний шум зі збереженням меж об'єктів. Застосовано фільтр з ядром 5×5 пікселів. Приклад застосування відображено на **рис. 2**.

Метод адаптивного вирівнювання гістограми з обмеженням контрасту (CLAHE) збільшує локальний контраст, що дає змогу зробити структури (легені, ребра тощо) на зображенні виразнішими. До зображення застосовано сітку розміром 8×8. Приклад застосування відображено на **рис. 3**.

Тренування та тестування нейронної мережі. Після виконання попереднього оброблення зображення з робочого датасету використовуються для навчання згорткової нейронної мережі, архітектуру якої наведено в праці [1]. У процесі навчання модель аналізує рентгенівські зображення та поступово навчається розрізняти їх за відповідними класами: COVID-19, пневмонія та відсутність захворювання.

З метою дослідження впливу попереднього оброблення на результати класифікації було

проведено серію експериментів із застосуванням вищезазначених методів оброблення зображень, серед яких: фільтр Гауса, медіанний фільтр і метод адаптивного вирівнювання гістограми з обмеженням контрасту (CLAHE). Причому архітектура нейронної мережі та склад робочого датасету залишалися незмінними.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Нами було проведено класифікацію рентгенівських зображень за трьома класами (COVID-19, пневмонія, відсутність захворювання) окремо для кожного з методів попереднього оброблення зображень та обчислено середнє значення отриманих метрик точності.

Підрахунок метрик проводився за такими формулами:



Рис. 1. Застосування фільтрації Гауса



Рис. 2. Застосування медіанного фільтра

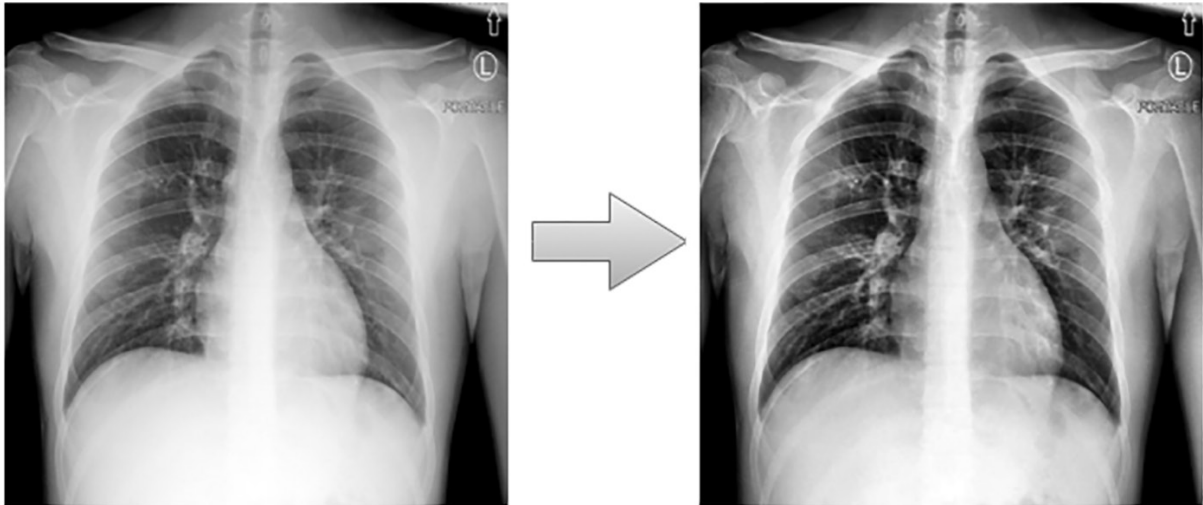


Рис. 3. Застосування методу CLAHE

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \quad (1)$$

де *Accuracy* — точність класифікації.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (2)$$

де *Precision* — точність (прогностична цінність позитивного результату).

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (3)$$

де *Recall* — чутливість.

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP}, \quad (4)$$

де *Specificity* — специфічність.

$$F1 = \frac{2TP}{2TP + FP + FN}, \quad (5)$$

де *F1* — *F1*-міра.

Значення *TP* (істинно позитивні), *TN* (істинно негативні), *FP* (хибно позитивні), *FN* (хибно негативні) оцінюють результати класифікації моделі.

Експеримент виконано для оригінального переліку зображень та окремо для переліку зображень, до яких було застосовано процедуру попереднього оброблення. Результати обчислення метрик для вказаних експериментів наведено в **табл. 1**.

Використання зображень без попереднього оброблення демонструє точність класифікації 92,86 %. Застосування фільтра Гауса підвищує точність класифікації до 95,24 %, зменшуючи наявність високочастотного шуму та забезпечуючи більш стабільне виділення структурних ознак. Медіанна фільтрація забезпечує точність 93,25 %, що відповідає незначному приросту точності. Цей метод орієнтований на усунення імпульсного шуму, що не є поширеним для рентгенівських зображень грудної клітини. Метод адаптивного вирівнювання гістограми з обмеженням контрасту (CLAHE) забезпечив точність 97,22 %. Підвищення ефективності класифікації під час використання

Таблиця 1

Результати обчислення

Метод	Accuracy, %	Precision, %	Recall, %	Specificity, %	F1, %
Оригінальне зображення (без оброблення)	92,86	93,12	92,19	96,35	92,51
Фільтр Гауса	95,24	95,02	94,93	97,64	94,97
Медіанна фільтрація	93,25	93,07	92,88	96,63	92,97
CLAHE (адаптивне вирівнювання гістограми з обмеженням контрасту)	97,22	97,12	97,20	98,62	97,15

методу CLAHE пов'язане зі збільшенням локального контрасту, що покращує виділення текстурних та анатомічних структур легеневої тканини.

ВИСНОВКИ

У статті проведено експериментальне дослідження впливу різних методів попереднього оброблення рентгенівських знімків грудної клітини на результати класифікації за допомогою згорткової нейронної мережі.

Отримані результати показали, що застосування попереднього оброблення дає змогу покращити показники класифікації в порівнянні з використанням оригінальних зображень без оброблення. Зокрема застосування фільтра Гауса забезпечило помітне підвищення точності класифікації, тоді як медіанна фільтрація продемонструвала незначне покращення. Найкращі результати серед досліджених методів продемонстрував метод адаптивного вирівнювання гістограми з обмеженням контрасту, що забезпечив максимальні значення показників точності класифікації. Це вказує на доцільність використання методів вирівнювання контрасту для підвищення ефективності класифікації рентгенівських зображень.

Отримані результати підтверджують важливість етапу попереднього оброблення в задачах аналізу медичних зображень та можуть бути використані для подальшого вдосконалення систем автоматичної діагностики. Перспективним напрямом подальших досліджень є аналіз впливу інших методів попереднього оброблення та використання більш складних архітектур нейронних мереж.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сучков В. І. Згорткова нейронна мережа для класифікації рентген-знімків грудної клітини / В. І. Сучков, А. О. Пашко // Журнал обчислювальної та прикладної математики. — 2025. — № 2. — С. 77–86. DOI: 10.17721/2706-9699.2025.2.06.
2. Khan A. I. CoroNet: A deep neural network for detection and diagnosis of COVID-19 from chest x-ray images / A. I. Khan, J. L. Shah, M. M. Bhat // *Comput Methods Programs Biomed.* — 2020. — No. 196. — 105581. — PMID: PMC7274128. DOI: 10.1016/j.cmpb.2020.105581
3. COVID-19 image data collection: Prospective predictions are the future / J. P. Cohen, P. Morrison, L. Dao, K. Roth, T. Duong, M. Ghassem // *Journal of Machine Learning for Biomedical Imaging.* — 2020. — No. 1. — P. 1–38. DOI: 10.59275/j.melba.2020-48g7.
4. Mooney P. Chest X-ray images (pneumonia) [Electronic resource] / P. Mooney. — 2018. — Access mode: <https://kaggle.com/datasets/paultimothymooney/chest-xray-pneumonia>.
5. COVID-19 Detection and Diagnosis Model on CT Scans Based on AI Techniques / M.-A. Zolya, C. Baltag, D.-V. Bratu, S. Coman, S.-A. Moraru //

6. Bioengineering. — 2024. — No. 11 (1). — 79. DOI: <https://doi.org/10.3390/bioengineering11010079>.
6. Detection and classification of lung diseases for pneumonia and COVID-19 using machine and deep learning techniques / S. Goyal, R. Singh // *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing.* — 2023. — No. 14. — P. 3239–3259. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03464-7>.
7. El Houby E. M. F. COVID-19 detection from chest X-ray images using transfer learning / E. M. F. El Houby // *Scientific reports.* — 2024. — No. 14 (1). — 11639. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61693-0>.
8. Класифікація уражень легень при COVID-19 на основі текстурних ознак та згорткової нейронної мережі / О. Б. Давидько, А. О. Ладік, В. Б. Максименко та ін. // *Биомедична інженерія і технологія.* — 2021. — № 6. — С. 19–28.
9. Within the Lack of Chest COVID-19 X-ray Dataset: A Novel Detection Model Based on GAN and Deep Transfer Learning / M. Loey, F. Smarandache, N. E. Khalifa // *Symmetry.* — 2020. — No. 12 (4). — P. 651. DOI: 10.3390/sym12040651.
10. Detecting SARS-CoV-2 in CT Scans Using Vision Transformer and Graph Neural Network / K. Amuda, A. Wakilim, T. Amoo et al. // *Algorithms.* — 2025. — No. 18 (7). — P. 413. DOI: 10.3390/a18070413.
11. Diagnostic accuracy of X-ray versus CT in COVID-19: a propensity-matched database study / A. Borakati, A. Perera, J. Johnson, T. Sood // *BMJ Open.* — 2020. — No. 6;10 (11). — e042946. DOI: 10.1136/bmjopen-2020-042946.

REFERENCES

1. Suchkov, V. I., & Pashko, A. O. (2025). Zghortkova neironna merezha dlia klasyfikatsii renthen-znimkiv hruudnoi klityny [Convolutional neural network for classification of chest X-ray images]. *Zhurnal obchysliuvainoi ta prykladnoi matematyky* [Journal of Computational and Applied Mathematics], 2, 77-86. DOI: 10.17721/2706-9699.2025.2.06. [in Ukr.].
2. Khan, A. I., Shah, J. L., & Bhat, M. M. (2020). CoroNet: A deep neural network for detection and diagnosis of COVID-19 from chest x-ray images. *Comput Methods Programs Biomed.* 196, 105581. PMID: PMC7274128. DOI: 10.1016/j.cmpb.2020.105581
3. Cohen, J. P., Morrison, P., Dao, L., Roth, K., Duong, T., & Ghassem, M. (2020). COVID-19 image data collection: Prospective predictions are the future. *Journal of Machine Learning for Biomedical Imaging*, 1, 1-38. DOI: 10.59275/j.melba.2020-48g7
4. Mooney, P. (2018). Chest X-ray images (pneumonia). Retrieved from: <https://kaggle.com/datasets/paultimothymooney/chest-xray-pneumonia>.
5. Zolya, M.-A., Baltag, C., Bratu, D.-V., Coman, S., & Moraru, S.-A. (2024). COVID-19 Detection and Diagnosis Model on CT Scans Based on AI Techniques. *Bioengineering*, 11 (1), 79. DOI: <https://doi.org/10.3390/bioengineering11010079>.
6. Goyal, S., & Singh, R. (2023). Detection and classification of lung diseases for pneumonia and COVID-19 using machine and deep learning techniques. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 14, 3239-3259. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03464-7>.
7. El Houby E. M. F. (2024). COVID-19 detection from chest X-ray images using transfer learning. *Scientific reports*, 14 (1), 11639. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61693-0>.
8. Davydko, O. B., Ladik, A. O., Maksymenko, V. B., Lynnyk, M. I., Pavlov, O. V., & Nastenko, Ye. A. (2021).

- Klasyfikatsiia urazhen lehen pry COVID-19 na osnovi teksturnykh oznak ta zghortkovoї neuronnoi merezhi [Classification of lung lesion during COVID-19 by texture features and convolutional neural network]. *Biomedychna inzheneriia i tekhnolohiia* [Biomedical engineering and technology], 6, 19-28. [in Ukr.].
9. Loey, M., Smarandache, F., & M. Khalifa, N. E. (2020). Within the Lack of Chest COVID-19 X-ray Dataset: A Novel Detection Model Based on GAN and Deep Transfer Learning. *Symmetry*. 12 (4). 651. DOI: 10.3390/sym12040651.
 10. Amuda, K., Wakili, A., Amoo, T., Agbetu, L., Wang, Q., & Feng, J. (2025). Detecting SARS-CoV-2 in CT Scans Using Vision Transformer and Graph Neural Network. *Algorithms*, 18 (7), 413. DOI: 10.3390/a18070413.
 11. Amuda, K., Wakili, A., Amoo, T., Agbetu, L., Wang, Q., & Feng, J. (2025). Diagnostic accuracy of X-ray versus CT in COVID-19: a propensity-matched database study. *BMJ Open*, 6;10 (11). e042946. DOI: 10.1136/bmjopen-2020-042946.

V. I. SUCHKOV, Postgraduate Student

METHODS OF PREPROCESSING CHEST X-RAY IMAGES FOR CLASSIFICATION TASKS

Abstract. *The article examines the application of chest X-ray image preprocessing methods in the task of automated classification of medical images. Preprocessing is an important stage of data preparation, since the characteristics of input images can significantly affect the efficiency of training artificial intelligence models and the quality of medical image analysis. The study analyzes various approaches to image preprocessing in the task of classifying X-ray images into the following classes: COVID-19, pneumonia, and no disease. In particular, the application of the Gaussian filter, median filter, and contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) method is considered. These methods are used, respectively, for noise smoothing, contour preservation, and enhancement of local image contrast. The results of the study confirm that the application of preprocessing methods improves the effectiveness of chest X-ray image classification. The contrast limited adaptive histogram equalization method demonstrated the best classification results in the experiments conducted.*

Keywords: *convolutional neural network, data preprocessing, dataset, pattern recognition, artificial intelligence.*

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРА

Сучков Валентин Іванович — аспірант, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, просп. Академіка Глушкова 4-д, м. Київ, Україна, 02000; valentysuchkov@gmail.com; ORCID: 0009-0006-7773-0660

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Suchkov V. I. — Postgraduate Student, Taras Shevchenko National University of Kyiv, 4-d, Akademika Hlushkova Ave., Kyiv, Ukraine, 02000; valentysuchkov@gmail.com; ORCID: 0009-0006-7773-0660

Надійшла до редакції 04.03.2026

Прийнята до друку 16.03.2026



УМОВИ ПУБЛІКАЦІЇ У ЖУРНАЛІ

Вимоги до змісту та оформлення статей

Розглядаються статті обсягом у середньому 15–25 тисяч знаків. У поданому матеріалі обов'язково мають бути вказані:

- УДК;
- назва (не більше 7–10 слів);
- резюме обсягом не менше 1800 знаків, включаючи ключові слова — 5–10 слів або словосполучень. Резюме подається двома мовами (українська, англійська);
- список використаних джерел — десять і більше джерел, також подається бібліографічний опис англійською мовою (References);
- інформація про авторів. Має бути вказано: прізвище, ім'я, по батькові повністю, місце роботи та посада або назва навчального закладу (для студентів), робоча адреса, робочий телефон, e-mail усіх авторів; номер ORCID або ResearcherID. Для транслітерації імен власних користуйтеся **Постановою Кабінету Міністрів № 55 від 27 січня 2010 р. “Про впорядкування транслітерації українсько-го алфавіту латиницею”**. Інформація про авторів подається двома мовами (українська, англійська).

Стаття повинна відповідати **вимогам до написання наукових досліджень**, що може бути відображено в таких рубриках:

- вступ;
- постановка проблеми (мета дослідження);
- аналіз використаних публікацій;
- виклад основного матеріалу;
- висновки.

Технічні вимоги до оформлення

Стаття пишеться в текстовому редакторі Word: тип файлу статті — .doc; шрифт — Times New Roman; розмір шрифту (кегель) — 14; міжрядковий інтервал — 1,5. Використовуються лапки (“ ”), апостроф відповідає шрифту Times New Roman ('); для позначення тире використовується знак короткого тире (–), а не дефісу (-) і не довгого тире (—).

Рисунки, графіки, діаграми мають бути читабельними, контрастними, варто уникати блідих кольорів. Оскільки друк журналу чорно-білий, краще робити рисунки, графіки, діаграми чорно-білими чи з відтінками сірого кольору або з використанням штрихування.

Дані, представлені в таблицях, графіках тощо, не повинні дублювати результати, описані в статті. На таблиці, формули, рисунки мають бути посилання в тексті — в круглих дужках (напр.: **рис. 1, табл. 2**). Розміри ілюстрацій не повинні перевищувати розміри друкованої сторінки журналу. Усі позначення мають відповідати діючим ДСТУ.

Таблиці створюються в редакторі Word шрифтом Times New Roman, 9 розміром (кеглем). Таблиці мають бути пронумеровані (напр.: Таблиця 1) та мати назву, що вказується перед таблицею по центру.

Рисунки повинні мати послідовну нумерацію та назву, що вказується під графічним зображенням (напр.: **Рис. 1. ...**). Діаграми та графіки створюються в програмі Excel шрифтом Times New Roman, 10 розміром (кеглем) та вставляються у текст. Фотографічні зображення потрібно готувати в графічному редакторі Adobe Photoshop або йому подібному (формати файлів — .tif, .bmp, .psd, .jpg). Щільність таких рисунків повинна бути не менше 300 dpi (пікселів на дюйм).

Формули в тексті статті пишуться за допомогою редактора формул — Microsoft Equation та вставляються. Не можна частину формули писати в текстовому вигляді, а частину — в редакторі формул. Розміри шрифтів приймаються за умовчанням редактора формул, їх не можна змінювати (не розтягувати і не стискати), вставляти в таблиці. Формули в статті мають бути пронумеровані. Номер ставиться справа від формули в круглих дужках. Якщо формула займає кілька рядків, то її номер наводиться в останньому рядку.

Список використаних джерел складається відповідно до чинних стандартів з бібліотечної та видавничої справи, міжнародних і державного стандартів, зокрема ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 “Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання”. У статті обов'язково мають бути посилання на використані джерела, вказані в квадратних дужках.

- гарантувати, що результати дослідження, викладені в рукописі, є самостійною й оригінальною роботою;
- у разі використання фрагментів чужих робіт та/або запозичення тверджень інших авторів у статті повинні бути оформлені відповідні бібліографічні посилання з обов'язковим зазначенням автора і першоджерела;
- надмірні запозичення, а також плагіат у будь-яких формах, включаючи неоформлені цитати, перефразування або присвоєння прав на результати чужих досліджень є неетичними і неприйнятними діями;
- представляти в журнал оригінальний рукопис, який не був відправлений в інший журнал і не перебуває зараз на розгляді, не був опублікованим. Недотримання цього принципу розцінюється як грубе порушення етики публікацій і дає підставу для зняття статті з рецензування;
- гарантувати правильний склад списку співавторів роботи.

Літературний редактор — **А.О. Ласкова-Ярмоленко**

Верстка — **А.Є. Мельник**

Підписано до друку 31.03.2026 р. Тираж 100 прим. Формат 60×84 1/8.

Умов. друк. арк. 13,5. Обл.-вид. арк. 15,2. Зам. № 01.

Верстка та друк номера — ДНУ “Український інститут науково-технічної експертизи та інформації”

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців
серія ДК № 5332 від 12.04.2017 р.