

РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-354-364](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-354-364)

УДК 621.3.08, 629.735.3

**Анатолій Леонідович Приступа¹, Євгеній Миколайович Ятченко²,
Анатолій Сергійович Ревко³, Тетяна Володимирівна Кулько⁴**

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

Email: anatoliy.prystupa@stu.cn.ua **ORCID** <https://orcid.org/0000-0001-9412-2698>

ResearcherID: F-5507-2014. **SCOPUS Author ID:** 57190807222

²аспірант кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: yevhenii.yatchenko@gmail.com **ORCID:** 0009-0000-5900-0572

Scopus author ID 59273801700

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки

Національний Університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: asrmeister@stu.cn.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6818-2961>

ResearcherID: ABA-7094-2021 **Scopus Author ID:** 57188714850

⁴кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій

Національний Університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: gortv@stu.cn.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2734-5300>

ResearcherID: F-5520-2016 **Scopus Author ID:** 57201904162

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МУЛЬТИКОПТЕРНИХ ДРОНІВ

У роботі розглянуто питання розробки апаратного забезпечення системи контролю параметрів електрозабезпечення мультикоптерних безпілотних літальних апаратів. Проаналізовано підходи до вимірювання струму в силових колах, зокрема порівняно датчики на ефекті Холла та шунтові резистори. Обґрунтовано вибір елементної бази для поканального моніторингу параметрів чотирьох двигунів мультикоптера: датчиків струму ACS758 на ефекті Холла та прецизійних моніторів напруги INA226 з інтерфейсом I²C. Запропоновано модульну архітектуру системи моніторингу на базі одноплатного комп'ютера NVIDIA Jetson Nano з інтеграцією з польотним контролером Pixhawk 6C через протокол MAVLink. Розроблено схему організації шини I²C для підключення вимірювальних модулів. Результати дослідження можуть бути використані при розробці систем діагностики та контролю балансу навантаження безпілотних літальних апаратів.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; система електрозабезпечення; моніторинг параметрів; датчик.

Рис.: 3. Бібл.: 22.

Актуальність дослідження. У наш час мультикоптерні безпілотні літальні апарати (БПЛА) широко застосовуються як у цивільній [1], так і у військовій [2] сферах. Вони набули широкого застосування та допомагають вирішувати різні задачі: фото/відеозйомка, моніторинг ліній електропередач, доставка вантажів, фермерство та останнім часом навіть виконання військових завдань. В умовах російсько-української війни БПЛА стали одним з основних інструментів ведення бойових дій та застосовуються з різною метою, що зумовлює підвищення вимоги до надійності й ефективності їхньої системи електрозабезпечення. Акумуляторні батареї, що застосовуються в сучасних дронах, мають обмежений термін служби, схильні до деградації і саморозряду та можуть становити небезпеку при неправильній експлуатації. Непередбачений розряд чи вихід із ладу таких батарей під час польоту призводить до аварійної посадки або навіть втрати апарату, а перегрів чи перезаряд можуть спричинити загоряння чи вибух.

Тому розробка ефективної системи контролю параметрів електрозабезпечення є актуальним науково-технічним завданням, вирішення якого дозволить підвищити безпеку польотів таких дронів, подовжити термін експлуатації акумуляторних батарей та оптимізувати використання електроенергії в бортових системах дрону загалом.

Постановка проблеми. Стандартні системи керування батареями (Battery Management System, BMS), що застосовуються в комерційних мультикоптерах, зазвичай обмежуються базовими функціями захисту: контроль мінімальної та максимальної напруги комірок, захист від перевантаження по струму та контроль температури [3; 4]. Такі системи не забезпечують точної оцінки залишкової ємності батареї, не враховують вплив температури та струму навантаження на доступну енергію, не здатні прогнозувати залишковий час польоту та не відстежують деградацію батареї протягом її життєвого циклу [5; 6].

Окрему категорію становлять БПЛА, що експлуатуються без вбудованої BMS. Така конфігурація є типовою для FPV-дронів та тактичних безпілотників, де критичними факторами є мінімізація ваги та запобігання раптовому відключенню живлення [7; 8]. Стандартна BMS при досягненні порогу мінімальної напруги комірки (приблизно 2,5 В) автоматично розриває коло живлення, що призводить до миттєвої втрати керування апаратом у польоті [9]. Для військових та спортивних застосувань таке примусове відключення є неприйнятним, тому оператори свідомо використовують батареї без захисних плат, покладаючись на телеметрію польотного контролера або власний досвід [7]. Такий підхід суттєво підвищує ризик глибокого розряду батареї, її пошкодження та скорочення терміну служби [8].

Особливо гостро ця проблема постає для БПЛА, що експлуатуються в складних умовах: при низьких або високих температурах навколишнього середовища [10], при значних коливаннях навантаження та при використанні акумуляторів з різним ступенем зношеності [11; 12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання побудови систем моніторингу електричних параметрів БПЛА охоплює кілька напрямів досліджень.

Для вимірювання струму в силових колах застосовують два основні підходи: датчики на ефекті Холла та шунтові резистори [13]. Порівняльний аналіз показує, що датчики Холла (серії ACS7xx) забезпечують гальванічну ізоляцію вимірювального кола від силового, практично нульові втрати потужності та компактні розміри, тоді як шунтові рішення мають вищу точність при низьких струмах, але потребують додаткових засобів ізоляції та розсіюють потужність у вигляді тепла [13; 19]. Для застосувань з високими струмами (понад 20 А), характерними для силових кіл мультикоптерів, датчики на ефекті Холла є більш доцільним вибором завдяки відсутності теплових втрат та спрощенню конструкції [13].

Для прецизійного вимірювання напруги широко використовуються спеціалізовані мікросхеми з цифровим інтерфейсом, зокрема INA226 та INA219 виробництва Texas Instruments [18]. Ці мікросхеми забезпечують високу роздільну здатність (до 16 біт), низьку похибку вимірювання та можливість підключення кількох пристроїв до однієї шини I²C, що спрощує побудову багатоканальних систем моніторингу [14; 18].

Інтеграція систем моніторингу з польотними контролерами здійснюється переважно через протокол MAVLink (Micro Air Vehicle Link), який підтримує передачу даних про стан батареї, напругу живлення та споживану потужність у реальному часі [15]. MAVLink є стандартом де-факто для відкритих автопілотів ArduPilot та PX4, забезпечуючи двосторонній обмін телеметрією та командами керування [15; 16].

Сучасні дослідження в галузі авіоніки БПЛА підкреслюють важливість застосування одноплатних комп'ютерів, таких як NVIDIA Jetson, для збору та обробки даних від множини датчиків завдяки їх компактності, низькому енергоспоживанню та підтримці різноманітних інтерфейсів (I²C, SPI, UART) [14].

Окремим напрямком є дослідження поканального моніторингу енергоспоживання мультикоптерів, що дозволяє контролювати баланс навантаження між двигунами та виявляти аномалії в роботі окремих приводів [17]. Однак більшість існуючих рішень обмежуються вимірюванням загального струму споживання батареї, що не забезпечує достатньої інформації для діагностики стану окремих каналів силової системи.

Метою цієї статті є розробка та обґрунтування апаратної архітектури системи моніторингу параметрів силових кіл мультикоптерного дрона, що забезпечує вимірювання струму та напруги в каналах двигунів з інтеграцією в існуючу систему керування на базі мікрокомп'ютера NVIDIA Jetson Nano та польотного контролера Pixhawk 6C.

Виклад основного матеріалу.

Загальна архітектура системи моніторингу. Запропонована система контролю параметрів електрозабезпечення мультикоптерного дрона побудована за модульним принципом і складається з двох основних підсистем представлена на рис. 1:

1. підсистема вимірювання параметрів силових кіл;
2. підсистема збору та обробки даних.

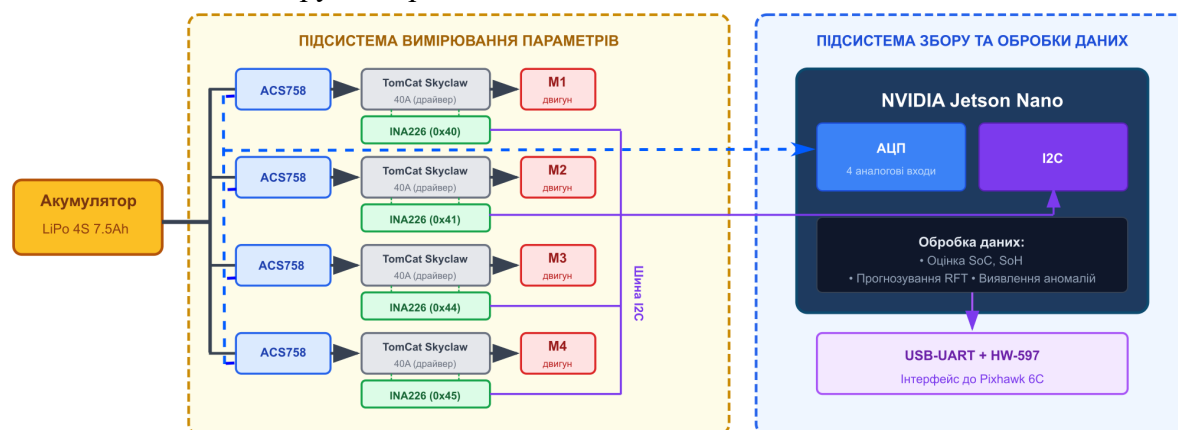


Рис. 1. Запропонована система контролю параметрів електрозабезпечення мультикоптерного дрона

Джерело: розроблено авторами.

Підсистема вимірювання параметрів забезпечує отримання первинної інформації про електричні величини в силових колах чотирьох двигунів мультикоптера. Для кожного каналу двигуна передбачено вимірювання струму споживання та напруги живлення, що дозволяє визначати миттєву потужність і контролювати баланс навантаження між двигунами.

Підсистема збору та обробки даних побудована на базі одноплатного комп'ютера NVIDIA Jetson Nano. Вибір даної платформи обумовлений тим, що вона широко використовується в сучасних мультикоптерних системах для керування польотним контролером, збору телеметричної інформації та її опрацювання за інтелектуальними алгоритмами, у тому числі із застосуванням технологій штучного інтелекту. Наявність апаратної шини I2C на платі Jetson Nano дозволила безпосередньо підключити датчики напруги INA226, а для оцифрування аналогових сигналів від датчиків струму ACS758 використано зовнішній АЦП ADS1115, який також підключено до шини I2C. Така конфігурація забезпечує компактне апаратне рішення з мінімальною кількістю з'єднувальних провідників.

Для інтеграції з польотним контролером Pixhawk 6C передбачено інтерфейс USB-UART з конвертером логічних рівнів HW-597, що забезпечує обмін даними через протокол MAVLink.

Вибір та обґрунтування елементної бази. Зовнішній вигляд обраних датчиків приведений на рис. 2.

Схему електричну принципову бортової електроніки мультикоптера наведено на рис. 3.

На схемі представлено силову частину та керування, включаючи елементи системи моніторингу параметрів електрозабезпечення (давачі струму ACS758, модулі A13 – A16, давачі напруги, струму та потужності INA226, модулі A4 та A7, АЦП ADS1115, модуль A8) у складі цілісної системи авіоніки дрона.

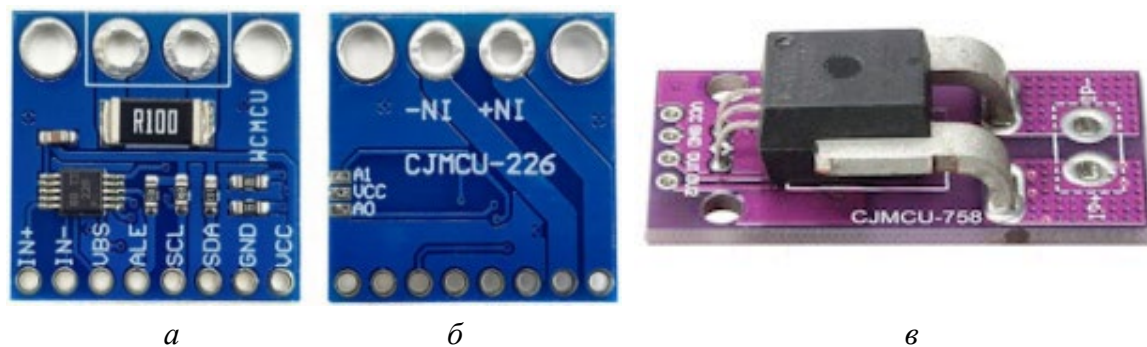


Рис. 2. Вимірювальні модулі: а, б – на базі INA226 [18]; в – датчик струму ACS758 [19]

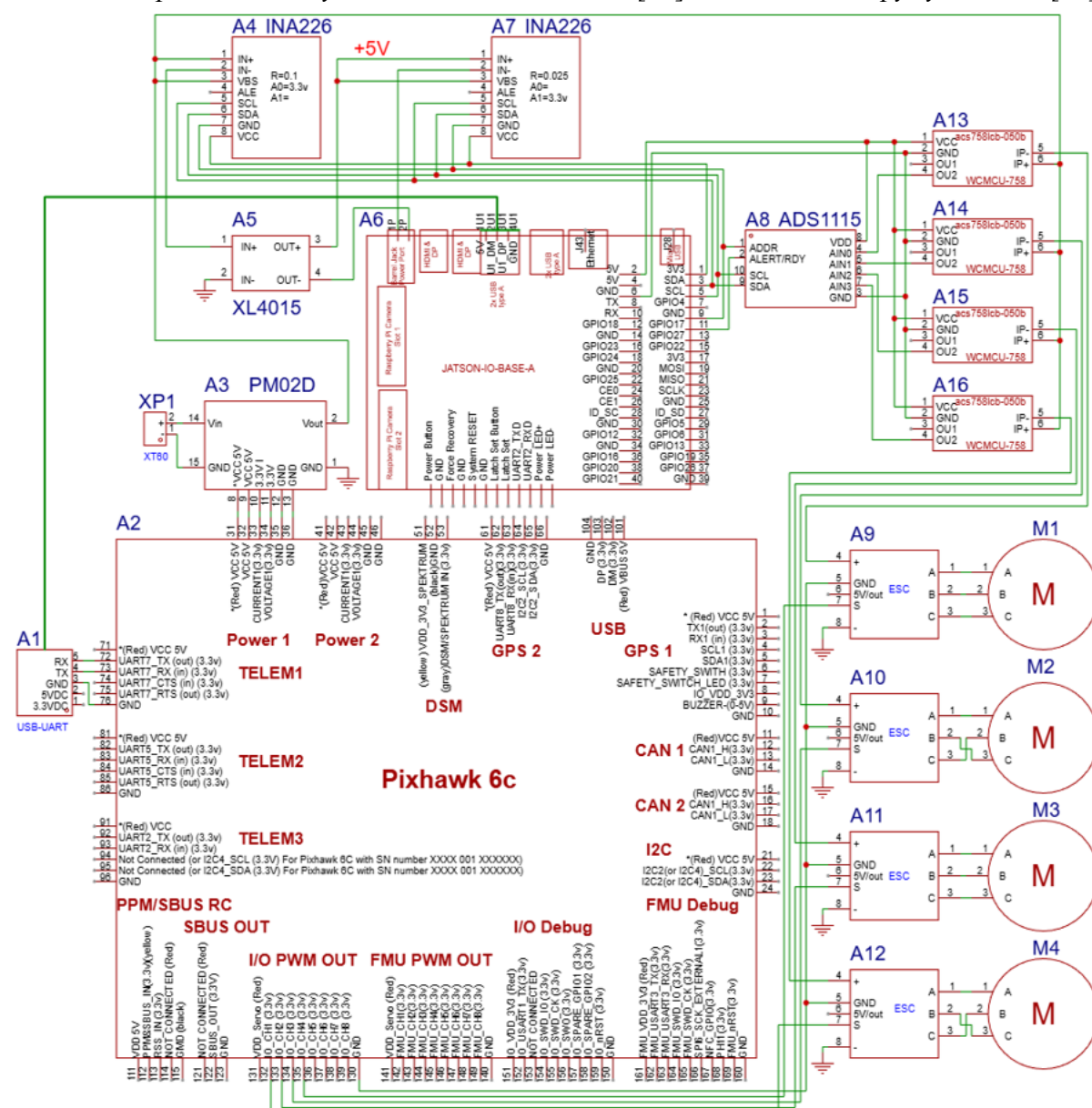


Рис. 3. Схема електрична принципова бортової електроніки мультикоптерного дрона
Джерело: розроблено авторами.

Датчики струму ACS758. Для вимірювання струму споживання двигунів обрано датчики ACS758 на ефекті Холла з діапазоном вимірювання до 50 А. Принцип роботи таких датчиків базується на явищі виникнення поперечної різниці потенціалів у провіднику зі струмом, розміщеному в магнітному полі. Струм, що протікає через силовий провідник, створює магнітне поле, яке реєструється елементом Холла та перетворюється у пропорційний вихідний сигнал напруги.

Основні характеристики датчиків струму ACS758:

- діапазон вимірювання: від 0 до 50 А;
- вихідний сигнал: аналогова напруга;
- чутливість: 40 мВ/А;
- напруга живлення: від 3,0 до 5,5 В;
- гальванічна ізоляція силового та вимірювального кіл.

Вибір датчиків ACS758 на ефекті Холла обумовлений такими перевагами порівняно з шунтовими датчиками: відсутність втрат потужності в силовому колі, гальванічна ізоляція, широкий діапазон вимірювання та можливість вимірювання як постійного, так і змінного струму. Діапазон 50 А обрано з урахуванням максимального струму споживання двигунів мультикоптера з запасом на пікові навантаження при маневруванні. Існує варіант такого ж датчика з максимальним струмом 100 А.

Датчики напруги INA226. Для вимірювання напруги в кожному каналі двигуна та іншого навантаження бортової системи застосовано спеціалізовані мікросхеми INA226 виробництва Texas Instruments. INA226 є прецизійним монітором напруги з цифровим інтерфейсом I²C, що дозволяє вимірювати напругу на вході драйвера двигуна.

Основні характеристики INA226:

1. діапазон вимірювання напруги: від 0 до 36 В;
2. роздільна здатність АЦП: 16 біт;
3. максимальна похибка вимірювання: $\pm 0,1\%$;
4. інтерфейс: I²C з програмованою адресою (16 можливих адрес);
5. частота вибірки: до 2,5 кГц;
6. напруга живлення: від 2,7 В до 5,5 В.

Перевагами INA226 є висока точність вимірювання, можливість програмного налаштування параметрів (час інтегрування, режим усереднення) та підтримка до 16 пристроїв на одній шині I²C. Це дозволяє побудувати компактну систему моніторингу з мінімальною кількістю провідників.

Порівняльний аналіз елементної бази. У таблицях 1 та 2 наведено порівняння характеристик обраних компонентів з альтернативними рішеннями.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика датчиків струму

Параметр	ACS758	ACS712	Шунт та АЦП
Діапазон струму	0–50 А	0–30 А	0–100 А
Втрати потужності	Відсутні	Відсутні	0,1–0,5 Вт
Гальванічна ізоляція	Так	Так	Ні
Точність	$\pm 1,5\%$	$\pm 1,5\%$	$\pm 0,5\%$
Вихідний сигнал	Аналоговий	Аналоговий	Цифровий

Таблиця 2 – Порівняльна характеристика датчиків напруги

Параметр	INA226	INA219	Дільник напруги та АЦП
Роздільна здатність	16 біт	12 біт	10–12 біт
Точність	$\pm 0,1\%$	$\pm 0,5\%$	$\pm 1\text{--}2\%$
Інтерфейс	I ² C	I ² C	Аналоговий
Кількість адрес I ² C	16	4	—

Підключення датчиків. Кожен канал вимірювання складається з датчика струму ACS758. Датчик струму встановлюється в розрив силового проводу між акумуляторною батареєю та драйвером двигуна TomCat Skyclaw 40A. Аналоговий вихід датчика струму підключається до АЦП ADS1115, який підключено до NVIDIA Jetson Nano через шину I²C. Модуль INA226 підключається паралельно до силового кола для вимірювання напруги на вході всіх драйверів двигунів, а виводи датчика напруги підключено також до шини I²C. Ще один модуль INA226 встановлено в колах 5В для вимірювання напруги живлення низьковольтних споживачів (NVIDIA Jetson Nano, Pixhawk 6с).

Організація шини I²C. Модулі INA226 підключені до спільної шини I²C. Для забезпечення унікальної адреси кожного модуля використовується комбінація станів виводів A0 та A1, які можуть бути підключені до GND, VCC або залишені непідключеними. Обрана схема адресації наведена в табл. 3.

Таблиця 3 – Адресація модулів INA226 та ACS758 на шині I²C

Пристрій	Двигун	A1	A0	Адреса I2C (7-біт)
INA226 1	M1	GND	GND	0x40
INA226 2	M2	GND	VCC	0x41
ADS1115	АЦП (4× ACS758)	GND	-	0x48

АЦП ADS1115 має 4 аналогові входи, що дозволяє оцифровувати сигнали від усіх чотирьох датчиків струму ACS758 за допомогою одного модуля. Таким чином, на шині I²C розміщено 5 пристроїв із унікальними адресами.

Розташування датчиків у силовому колі. Структура силового кола мультикоптера має таку конфігурацію: акумуляторна батарея через датчики струму ACS758 підключена до чотирьох драйверів двигунів TomCat Skyclaw 40A, що керують безколекторними двигунами. Датчики струму встановлені в розрив силового проводу між акумулятором та входом драйвера. Таке розташування дозволяє вимірювати повний струм споживання кожного каналу, включаючи втрати в драйвері двигуна. Датчики напруги INA226 вимірюють напругу безпосередньо на вході драйвера, що дає можливість контролювати падіння напруги на з'єднувальних проводах та датчиках струму.

Підключення до Jetson Nano. Одноплатний комп'ютер NVIDIA Jetson Nano має 40-контактний роз'єм GPIO, сумісний з Raspberry Pi, який забезпечує доступ до інтерфейсів I²C, SPI, UART та GPIO. Для підключення датчиків використовується шина I²C (контакти 3 та 5 роз'єму GPIO), яка підтримує напругу логічних рівнів 3,3 В.

Протокол MAVLink та структура потоків даних. MAVLink (Micro Air Vehicle Link) – це легкий протокол обміну повідомленнями, розроблений для комунікації між компонентами безпілотних систем. Протокол забезпечує двосторонній обмін даними з контролем цілісності та підтвердженням доставки.

Через інтерфейс MAVLink система моніторингу отримує від польотного контролера такі дані:

- 1) повідомлення BATTERY_STATUS (ID 147): загальна напруга батареї, залишковий заряд, струм споживання, температура;
- 2) повідомлення SYS_STATUS (ID 1): напруга батареї, залишок заряду у відсотках (SoC);
- 3) повідомлення POWER_STATUS (ID 125): напруга на шинах живлення 5 В та 3,3 В.

Дані від датчиків струму (через АЦП ADS1115) та модулів INA226 надходять до Jetson Nano через інтерфейс I²C з періодом опитування 100 мс. Одночасно через MAVLink надходить інформація від вбудованого датчика живлення Pixhawk 6С. Обчислювальний модуль на базі Jetson Nano здійснює первинну обробку даних, обчислення похідних параметрів (сумарна потужність, баланс навантаження) та формує пакети даних для передачі на наземну станцію керування.

Аналіз обмежень запропонованої системи. Запропонована апаратна архітектура має ряд обмежень, які необхідно враховувати при практичній реалізації системи моніторингу.

Обмеження шини I²C. Стандартний режим I²C (100 кГц), типовий для зовнішніх шин систем на базі PiXhawk [14], забезпечує сумарний час циклу опитування п'яти пристроїв на рівні від 15 мс до 20 мс, що є прийнятним для періоду 100 мс, але залишає обмежений запас для обробки помилок. В умовах вібрацій та імпульсних завад від ESC можливі збої передачі даних. Для підвищення надійності рекомендується використання Fast Mode (400 кГц), який підтримується обома типами вимірювальних мікросхем [18; 22], та екранованих провідників довжиною не більше 30 см.

Похибки вимірювального каналу. Сумарна похибка каналу вимірювання струму складається з кількох компонентів: зміщення нуля ACS758 (± 120 мА), температурний дрейф чутливості ($\pm 0,06$ %/°C), нелінійність ($\pm 1,5$ %) [13, 19] та похибка квантування ADS1115 (± 3 мА при діапазоні $\pm 4,096$ В) [22]. З урахуванням діапазону робочих температур від -10°C до $+50^{\circ}\text{C}$ [10; 11] сумарна похибка без калібрування оцінюється на рівні від 3% до 5%, що потребує індивідуальної калібрувальної процедури для кожного каналу. Канал вимірювання напруги на базі INA226 (похибка $\pm 0,1$ %, 16 біт) [18] є суттєво точнішим.

Вплив електромагнітних завад. Датчики Холла принципово чутливі до зовнішніх магнітних полів [13], а безколекторні двигуни та ESC є потужними джерелами електромагнітних завад на борту БПЛА [20]. Попри наявність внутрішнього екрану в ACS758 [19], рекомендується розміщувати датчики на відстані щонайменше 5 см від двигунів та застосовувати програмну фільтрацію (ковзне середнє або фільтр Калмана) для придушення імпульсних завад.

Додаткова вага. Орієнтовна маса системи моніторингу складає від 67 г до 77 г (4 модулі ACS758, 4 модулі INA226, АЦП ADS1115, конвертер HW-597 та кабелі), що становить менше 3 % злітної ваги мультикоптера класу від 3 кг до 5 кг. Для легких FPV-дронів (500–800 г), що експлуатуються без BMS [7; 8], таке навантаження може бути критичним. Додаткове енергоспоживання (150–250 мВт) є незначним порівняно із загальним споживанням силової системи [17].

Надійність. Спільна шина I²C створює єдину точку відмови: зависання одного пристрою блокує зв'язок з усіма іншими. Для підвищення відмовостійкості доцільно застосувати мультиплексор TCA9548A [21] з функцією апаратного скидання, програмний тайм-аут з автоматичним відновленням шини та перехід у деградований режим при відмові окремих каналів з повідомленням оператора через MAVLink [15; 16].

Масштабованість. Архітектура оптимізована для квадрокоптера. Масштабування на 6–8 двигунів обмежується 4 аналоговими входами ADS1115 [22] та потребує додаткових модулів АЦП або переходу на інтерфейс SPI [14].

Попри зазначені обмеження, більшість з них можуть бути компенсовані програмно (фільтрація, калібрування, контроль відмов) або конструктивно (екранування, оптимізація розміщення компонентів). Кількісна оцінка впливу зазначених факторів є предметом експериментальних досліджень у реальних умовах польоту.

Висновки. У роботі розроблено та обґрунтовано апаратну архітектуру системи моніторингу параметрів силових кіл мультикоптерного дрона. Основні результати дослідження:

1. Запропоновано модульну архітектуру системи контролю параметрів електрозабезпечення, що складається з підсистеми вимірювання параметрів силових кіл та підсистеми збору й обробки даних на базі одноплатного комп'ютера NVIDIA Jetson Nano.

2. Обґрунтовано вибір датчиків струму ACS758 на ефекті Холла для вимірювання струму споживання двигунів. Порівняльний аналіз показав, що для застосувань з високими струмами (до 100 А) датчики Холла є більш доцільним рішенням порівняно з шунтовими завдяки гальванічній ізоляції, відсутності втрат потужності та компактним розмірам.

3. Для прецизійного вимірювання напруги обрано мікросхеми INA226 з роздільною здатністю 16 біт та похибкою $\pm 0,1\%$, що забезпечують високу точність вимірювання та можливість підключення до 16 пристроїв на одній шині I²C.

4. Розроблено схему організації шини I²C з унікальною адресацією п'яти пристроїв (чотири модулі INA226 та АЦП ADS1115), що забезпечує поканальний моніторинг чотирьох силових кіл двигунів з мінімальною кількістю з'єднувальних провідників.

5. Забезпечено інтеграцію системи моніторингу з польотним контролером Pixhawk 6С через протокол MAVLink, що дозволяє отримувати додаткові дані телеметрії та передавати інформацію на наземну станцію керування.

Запропонована система забезпечує вимірювання струму та напруги в кожному каналі двигуна, що дозволяє визначати миттєву потужність споживання та контролювати баланс навантаження між двигунами. На відміну від типових рішень, що обмежуються вимірюванням загального струму батареї, поканальний моніторинг створює передумови для раннього виявлення аномалій у роботі окремих складових дрона.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці алгоритмічного забезпечення для оцінки рівня заряду (SoC) та стану здоров'я (SoH) акумуляторної батареї на основі даних поканального моніторингу, а також у проведенні експериментальних досліджень точності та надійності запропонованої системи в реальних умовах польоту.

Список використаних джерел

1. UAV applications for monitoring and management of civil infrastructures. (2025). *Infrastructures*, 10(5), 106. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10050106>.
2. Drone wars: Developments in drone swarm technology. (2025, January 21). *Defense Security Monitor*. <https://dsm.forecastinternational.com/2025/01/21/drone-wars-developments-in-drone-swarm-technology>.
3. Zhao, T., Zhang, Y., Wang, M., Feng, W., Cao, S., & Wang, G. (2025). A critical review on the battery system reliability of drone systems. *Drones*, 9(8), 539. <https://doi.org/10.3390/drones9080539>.
4. Alrayes, F. S., Alotaibi, S. S., Alghamdi, K. K., Alqahtani, F., & Hamza, M. A. (2023). A machine learning-based battery management system for state-of-charge prediction and state-of-health estimation for unmanned aerial vehicles. *Journal of Energy Storage*, 66, 107380. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107380>.
5. Cao, X., & Liu, L. (2025). A multi-timescale method for state of charge estimation for lithium-ion batteries in electric UAVs based on battery model and data-driven fusion. *Drones*, 9(4), 247. <https://doi.org/10.3390/drones9040247>.
6. Kulkarni, C., Hogge, E., & Quach, C. (2018). Remaining flying time prediction implementing battery prognostics framework for electric UAV's (Report No. 20180004466). NASA Technical Reports Server. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20180004466/downloads/20180004466.pdf>.
7. How does a drone battery management system work. (2024). *Grepow Blog*. <https://www.grepow.com/blog/what-is-a-drone-battery-management-system.html>.
8. FPV drones and military use. (2025). *Drone Industry Insights*. <https://droneii.com/military-fpv-drones>.
9. Liang, O. (2025). Using LiPo batteries for FPV drones: Beginner's guide. *Oscar Liang Blog*. <https://oscarliang.com/lipo-battery-guide/>
10. Luo, H., Wang, Y., Feng, Y.-H., Fan, X.-Y., Han, X., & Wang, P.-F. (2022). Lithium-ion batteries under low-temperature environment: Challenges and prospects. *Materials*, 15(22), 8166. <https://doi.org/10.3390/ma15228166>.
11. Li, N., Liu, X., Yu, B., Li, L., Xu, J., & Tan, Q. (2021). Study on the environmental adaptability of lithium-ion battery powered UAV under extreme temperature conditions. *Energy*, 217, 119374. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119481>.
12. Luan, Z., Qin, Y., Hu, B., Zhao, W., & Wang, C. (2023). Estimation of state of charge for hybrid unmanned aerial vehicle Li-ion power battery for considering rapid temperature change. *Journal of Energy Storage*, 55(Part C), 105718. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106479>.

13. Allegro MicroSystems. (2024). Comparing parameters of shunt-based and hall current sensing (Application Note AN296301). https://www.allegromicro.com/-/media/files/application-notes/an296301_shunt-vs-hall.pdf.
14. Osmani, K., & Schulz, D. (2024). Comprehensive investigation of unmanned aerial vehicles (UAVs): An in-depth analysis of avionics systems. *Sensors*, 24(10), 3064. <https://doi.org/10.3390/s24103064>.
15. Koubâa, A., Allouch, A., Alajlan, M., Javed, Y., Belghith, A., & Khalgui, M. (2019). Micro air vehicle link (MAVLink) in a nutshell: A survey. *IEEE Access*, 7, 87658–87680. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924410>.
16. Allouch, A., Cheikhrouhou, O., Koubâa, A., Khalgui, M., & Abbes, T. (2019). MAVSec: Securing the MAVLink protocol for Ardupilot/PX4 unmanned aerial systems. In *Proceedings of the 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)* (pp. 621–628). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IWCMC.2019.8766667>.
17. Fronza, I., Corral, L., & Pastorelli, M. (2017). Monitoring multicopters energy consumption. In *Proceedings of the ACM Conference on Computer Science in Cars Symposium (CSCS'17)*. ACM. <https://doi.org/10.1145/3131726.3131730>.
18. Texas Instruments. (2015). INA226: High-side or low-side measurement, bi-directional current and power monitor with I2C compatible interface [Datasheet]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina226.pdf>.
19. Allegro MicroSystems. (2020). ACS758xCB: Thermally enhanced, fully integrated, hall-effect-based linear current sensor IC with 100 $\mu\Omega$ current conductor [Datasheet]. <https://www.allegromicro.com/~/-/media/Files/Datasheets/ACS758-Datasheet.ashx>.
20. Wang, J., Yuan, Z., Wu, Z., & Gao, C. (2024). Strong electromagnetic interference and protection in UAVs. *Electronics*, 13(2), 393. <https://doi.org/10.3390/electronics13020393>.
21. Texas Instruments. (2019). TCA9548A: Low-voltage 8-channel I2C switch with reset [Datasheet]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tca9548a.pdf>.
22. Texas Instruments. (2018). ADS111x: Ultra-small, low-power, I2C-compatible, 860-SPS, 16-bit ADCs with internal reference, oscillator, and programmable comparator [Datasheet]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>.

References

1. UAV applications for monitoring and management of civil infrastructures. (2025). *Infrastructures*, 10(5), 106. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10050106>.
2. Drone wars: Developments in drone swarm technology. (2025, January 21). *Defense Security Monitor*. <https://dsm.forecastinternational.com/2025/01/21/drone-wars-developments-in-drone-swarm-technology>.
3. Zhao, T., Zhang, Y., Wang, M., Feng, W., Cao, S., & Wang, G. (2025). A critical review on the battery system reliability of drone systems. *Drones*, 9(8), 539. <https://doi.org/10.3390/drones9080539>.
4. Alrayes, F. S., Alotaibi, S. S., Alghamdi, K. K., Alqahtani, F., & Hamza, M. A. (2023). A machine learning-based battery management system for state-of-charge prediction and state-of-health estimation for unmanned aerial vehicles. *Journal of Energy Storage*, 66, 107380. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107380>.
5. Cao, X., & Liu, L. (2025). A multi-timescale method for state of charge estimation for lithium-ion batteries in electric UAVs based on battery model and data-driven fusion. *Drones*, 9(4), 247. <https://doi.org/10.3390/drones9040247>.
6. Kulkarni, C., Hogge, E., & Quach, C. (2018). Remaining flying time prediction implementing battery prognostics framework for electric UAV's (Report No. 20180004466). NASA Technical Reports Server. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20180004466/downloads/20180004466.pdf>.
7. How does a drone battery management system work. (2024). *Grepow Blog*. <https://www.grepow.com/blog/what-is-a-drone-battery-management-system.html>.
8. FPV drones and military use. (2025). *Drone Industry Insights*. <https://droneii.com/military-fpv-drones>.
9. Liang, O. (2025). Using LiPo batteries for FPV drones: Beginner's guide. *Oscar Liang Blog*. <https://oscarliang.com/lipo-battery-guide/>

10. Luo, H., Wang, Y., Feng, Y.-H., Fan, X.-Y., Han, X., & Wang, P.-F. (2022). Lithium-ion batteries under low-temperature environment: Challenges and prospects. *Materials*, 15(22), 8166. <https://doi.org/10.3390/ma15228166>.
11. Li, N., Liu, X., Yu, B., Li, L., Xu, J., & Tan, Q. (2021). Study on the environmental adaptability of lithium-ion battery powered UAV under extreme temperature conditions. *Energy*, 217, 119374. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119481>.
12. Luan, Z., Qin, Y., Hu, B., Zhao, W., & Wang, C. (2023). Estimation of state of charge for hybrid unmanned aerial vehicle Li-ion power battery for considering rapid temperature change. *Journal of Energy Storage*, 55(Part C), 105718. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106479>.
13. Allegro MicroSystems. (2024). Comparing parameters of shunt-based and hall current sensing (Application Note AN296301). https://www.allegromicro.com/-/media/files/application-notes/an296301_shunt-vs-hall.pdf.
14. Osmani, K., & Schulz, D. (2024). Comprehensive investigation of unmanned aerial vehicles (UAVs): An in-depth analysis of avionics systems. *Sensors*, 24(10), 3064. <https://doi.org/10.3390/s24103064>.
15. Koubâa, A., Allouch, A., Alajlan, M., Javed, Y., Belghith, A., & Khalgui, M. (2019). Micro air vehicle link (MAVLink) in a nutshell: A survey. *IEEE Access*, 7, 87658–87680. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924410>.
16. Allouch, A., Cheikhrouhou, O., Koubâa, A., Khalgui, M., & Abbes, T. (2019). MAVSec: Securing the MAVLink protocol for Ardupilot/PX4 unmanned aerial systems. In *Proceedings of the 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)* (pp. 621–628). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IWCMC.2019.8766667>.
17. Fronza, I., Corral, L., & Pastorelli, M. (2017). Monitoring multicopters energy consumption. In *Proceedings of the ACM Conference on Computer Science in Cars Symposium (CSCS'17)*. ACM. <https://doi.org/10.1145/3131726.3131730>.
18. Texas Instruments. (2015). INA226: High-side or low-side measurement, bi-directional current and power monitor with I2C compatible interface [Datasheet]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina226.pdf>.
19. Allegro MicroSystems. (2020). ACS758xCB: Thermally enhanced, fully integrated, hall-effect-based linear current sensor IC with 100 $\mu\Omega$ current conductor [Datasheet]. <https://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS758-Datasheet.ashx>.
20. Wang, J., Yuan, Z., Wu, Z., & Gao, C. (2024). Strong electromagnetic interference and protection in UAVs. *Electronics*, 13(2), 393. <https://doi.org/10.3390/electronics13020393>.
21. Texas Instruments. (2019). TCA9548A: Low-voltage 8-channel I2C switch with reset [Datasheet]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tca9548a.pdf>.
22. Texas Instruments. (2018). ADS111x: Ultra-small, low-power, I2C-compatible, 860-SPS, 16-bit ADCs with internal reference, oscillator, and programmable comparator [Datasheet]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>.

Дата першого надходження статті до видання: 30.22.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.12.2025

UDC 621.3.08, 629.735.3

**Anatolii Prystupa¹, Yevhenii Yatchenko²,
Anatolii Revko³, Tetiana Kulko⁴**

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Electrical Engineering and Information and Measurement Technologies Department

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

Email: anatoliy.prystupa@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9412-2698>

ResearcherID: F-5507-2014. SCOPUS Author ID: 57190807222

²PhD student at the Electrical Engineering and Information and Measurement Technologies Department

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: yevhenii.yatchenko@gmail.com. ORCID: 0009-0000-5900-0572, Scopus author ID 59273801700

³PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: asrmeister@stu.cn.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6818-2961>

ResearcherID: ABA-7094-2021 **Scopus Author ID:** 57188714850

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Electrical Engineering and Information and Measurement Technologies Department

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: gortv@stu.cn.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2734-5300>

ResearcherID: F-5520-2016 **Scopus Author ID:** 57201904162

CONTROL OF ELECTRICAL PARAMETERS OF MULTICOPTER DRONES

Multicopter unmanned aerial vehicles (UAVs) are widely used in both civilian and military applications, including aerial photography, power line monitoring, cargo delivery, agriculture, and combat operations. The reliability and efficiency of their power supply systems are critical for safe operation. Battery failures during flight, such as unexpected discharge or overheating, can lead to emergency landings, loss of the vehicle, or even fire and explosion hazards. Standard battery management systems (BMS) used in commercial multicopters are limited to basic protection functions and do not provide accurate residual capacity estimation, remaining flight time prediction, or battery degradation tracking. A separate category includes UAVs operating without built-in BMS, which is typical for FPV drones and tactical unmanned systems where weight minimization and prevention of sudden power cutoff are critical factors. Therefore, the development of an effective power supply parameter monitoring system is a relevant scientific and technical task.

Existing monitoring solutions are typically limited to measuring the total battery current and voltage, without providing per-channel analysis of individual motor power circuits. This approach does not allow early detection of anomalies in individual drive systems, load imbalance between motors, or degradation of specific power circuit components. The problem is particularly acute for UAVs operating under extreme conditions: low or high ambient temperatures, significant load fluctuations, and batteries with varying degrees of wear.

The research objective is to develop and substantiate the hardware architecture of a power circuit parameter monitoring system for a multicopter drone that provides current and voltage measurement in individual motor channels with integration into the existing control system based on the NVIDIA Jetson Nano single-board computer and the Pixhawk 6C flight controller. Achieving this objective will enable early detection of anomalies in individual power circuits, improve flight safety, and extend battery service life through informed energy management.

A modular monitoring system architecture consisting of two main subsystems has been proposed: a power circuit parameter measurement subsystem and a data acquisition and processing subsystem. ACS758 Hall effect current sensors have been selected for motor current measurement, providing galvanic isolation, no power losses in the power circuit, and a measurement range of up to 50 A. For precision voltage measurement, INA226 integrated circuits with 16-bit ADC resolution and $\pm 0.1\%$ accuracy have been chosen, supporting up to 16 devices on a single I2C bus. An I2C bus organization scheme with unique addressing of five devices (four INA226 modules and an ADS1115 ADC) has been developed, enabling per-channel monitoring of four motor power circuits. Integration with the Pixhawk 6C flight controller is provided via the MAVLink protocol through a USB-UART interface with an HW-597 logic level converter. A comparative analysis of the selected components against alternative solutions has been performed, and system limitations including I2C bus constraints, measurement channel errors, electromagnetic interference effects, and scalability considerations have been discussed.

The developed hardware architecture represents a novel approach to per-channel power monitoring in multicopter UAVs, addressing the gap between basic BMS functionality and the requirements of advanced diagnostics. The proposed system provides current and voltage measurement in each motor channel, enabling determination of instantaneous power consumption and load balance monitoring between motors. Unlike typical solutions limited to total battery current measurement, per-channel monitoring creates prerequisites for early detection of anomalies in individual drone components. The practical significance lies in the ability to detect motor or ESC degradation at an early stage, prevent in-flight failures, and optimize battery usage patterns — directly fulfilling the stated research objective of improving flight safety and extending battery life. Future research directions include the development of algorithmic support for estimating state of charge (SoC) and state of health (SoH) of the battery based on per-channel monitoring data, as well as experimental studies of the proposed system accuracy and reliability under real flight conditions.

Keywords: unmanned aerial vehicle; power supply system; parameter monitoring; sensor.

Fig.: 3. **References:** 22.

**Дмитро Станіславович Захарченко¹, Ярослав Михайлович Сила²,
Сергій Анатолійович Степенко³**

¹молодший науковий співробітник

Центр протимінної діяльності Міністерства оборони України (Чернігів, Україна)

науковий співробітник

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: dimazakhar@gmail.com

²аспірант кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: jaroslav.sila4@gmail.com

³кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: serhii.stepenko@stu.cn.ua

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ДЛЯ БУДІВЕЛЬ З НУЛЬОВИМ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ НА ОСНОВІ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ТА НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

У статті висвітлено дослідження методології забезпечення електроживлення на основі відновлюваних джерел енергії для будівель з нульовим та майже нульовим енергоспоживанням. У межах цієї роботи розглянуто основні принципи та технології використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), а також переваги та виклики, пов'язані із впровадженням таких систем. Крім того, проаналізовано приклади успішних проєктів, що демонструють ефективність та потенціал NZEB.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії; методологія забезпечення електроживлення; нульове енергоспоживання; потенціал NZEB; енергетична галузь; накопичувачі електроенергії; технології відновлюваної енергетики; електрична мережа.

Рис.: 3. Табл.: 1 Бібл.: 47.

Актуальність теми дослідження. Сучасний світ стикається з безліччю проблем та викликів, одним з яких є глобальне потепління і виснаження природних ресурсів Землі. Тому пошук альтернативних джерел енергії для покращення цієї ситуації є актуальною темою.

Громадські будівлі та споруди відповідають за 40 % від загального споживання енергії та 30...35 % викидів парникових газів. За останні два десятиліття зросла стурбованість щодо невідновлюваних джерел енергії, таких як вугілля, нафта та природний газ. Вони сприяють значним викидам парникових газів, що безпосередньо впливає на кліматичні зміни. Ці фактори спонукали європейських політиків, регулювальні органи та інститути встановити дати досягнення нульового енергоспоживання та пропагувати ідею пасивних будівель, будівель з нульовим викидом вуглецю і будівель з нульовим енергоспоживанням (Net Zero Energy Buildings, NZEB). Так, з 2020 року всі нові будівлі та споруди у ЄС мають відповідати вимогам «будинків з майже нульовим енергоспоживанням» nZEB (nearly Zero Energy Building). Ці вимоги будуть посилені до «будівель з нульовим викидом», починаючи з 2028 року для нових будівель, що належать державним органам, і з 2030 року – для всіх нових будівель [1].

Постановка проблеми. На сьогодні, без перебільшення, велику значущість для людства має розвиток відновлювальної енергетики, оскільки горючі корисні копалини, які являють собою основу виробництва енергії на початку ХХІ ст., мають здатність вичерпуватись, що й станеться вже в недалекому майбутньому. Непогана альтернатива для людства – це сталий розвиток, концепція, завдяки якій у суспільстві навчилися б розумно використовувати та споживати ресурси, що можуть невдовзі зникнути.

Будівля з майже нульовим енергоспоживанням визначається як будівля з дуже високими енергетичними характеристиками, і ця енергія повинна покриватися з відновлюваних джерел, що виробляються на місці або поблизу. Принципи визначення nZEB повинні враховувати всі фінансові, правові, технічні й екологічні аспекти та відповідати сучасним і майбутнім викликам та перевагам.

Вплив зміни клімату та цін на енергоносії спонукає зацікавлені сторони до оптимізації використання енергії в будівлях із метою зменшення її споживання. Завдяки впровадженню енергоефективних стратегій реконструкції також буде зменшено залежність від відновлюваної енергії, що виробляється з непаливних джерел енергії на місці та за його межами.

При досягненні мінімального навантаження на будівлю, ефективно обладнання та системи будуть містити енергоефективне освітлення, системи управління електричним освітленням, високопродуктивну систему ОВКВ (опалення, вентиляції та кондиціонування). Решту потреб в енергії можна буде задовольнити за допомогою технологій відновлюваної енергії, таких як фотоелектричні елементи (PV), сонячні електростанції (СЕС) та сонячні водонагрівачі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Європейський Союз посідає лідерську позицію щодо розроблення і впровадження технологій відновлюваної енергетики [2]. У 2009 році набула чинності Директива про відновлювані джерела енергії (2009/28/ЕС) [3], аби забезпечити сталий розвиток та раціональне ресурсовикористання. Впровадження основних її принципів дозволило досягти поступового зростання у використанні відновлювальних джерел енергії [4]. Задля подолання енергетичної бідності та забезпечення статусу ЄС як «кліматично нейтрального» об'єднання виникла потреба перегляду, що й було зроблено у 2018 році з обраним напрямом на скорочення викидів [5].

Надзвичайно важливим для України, на думку С.О. Кудрі, є застосування ВДЕ для побутових потреб. Передусім це пов'язано з дефіцитом енергії, негативними тенденціями сьогодення в галузі енергетичної системи та незадовільним станом навколишнього середовища. Задля покращення стану довкілля і зменшення ризиків для здоров'я населення варто ефективно використовувати енергію відновлюваних джерел, що також сприятиме сталому енергозабезпеченню [6].

Як зазначають С. О. Кудря, О. О. Рєпкін та Л. В. Яценко, можливість накопичувати велику кількість електроенергії протягом значних термінів її зберігання може сприяти сьгодні створенню водневої енергетичної інфраструктури, складниками якої є обладнання на основі ВДЕ (відновлювальних джерел енергії). Між іншим, уже розроблено концепцію Дорожньої карти розвитку водневої енергетики України на період до 2035 року в Інституті відновлюваної енергетики НАН [7].

У роботі О. Глушка, Н. Лисенко та С. Степенка та ін. «Огляд кращих інноваторів в енергетиці, що впливають на розвиток відновлюваної енергетики» зроблено аналіз новаторів та висвітлено їхній внесок щодо переходу до відновлюваної енергетики. Крім того, наголошено на важливості розвитку ВДЕ, що матиме вагомий крок щодо просування відповідного напрямку в майбутньому. Найголовніші тенденції, як зазначають учені, це: водень і водневі технології, декарбонізація, енергія вітру та сонця, цифрові рішення [8].

Науковці О. Городній, С. Бойко, І. Касаткіна обґрунтували закономірність запровадження до структури автономної системи електропостачання на основі вітроенергетичного комплексу ланки з метою зарядження акумуляторних батарей. До того ж вони запропонували структуру вітроенергетичного комплексу для зарядження акумуляторних батарей, якщо не буде можливості під'єднуватись до централізованого електропостачання [9].

Актуальність сучасних систем автоматизованого контролю і керування мікрокліматом приміщень висвітлено у статті В. Лобова та Л. Єфіменко. Крім того, вчені звернули увагу на неправильні алгоритми роботи або порушення режимів технічного обладнання, що призводить до відхилення від стандартних метеорологічних умов у приміщенні [10].

На переконання Джекі Де Бурки, спеціально відібрані екологічні будівельні матеріали зроблені в такий спосіб, аби бути енергоефективними і сприяти зменшенню споживання енергії в будівельних спорудах. Зазвичай вони мають хороші ізоляційні властивості, щоб підтримувати сприятливу температуру в будівлі, при цьому зменшуючи необхідність в охолодженні й опаленні. Це, своєю чергою, має позитивний бік – зменшення потреби у викопному паливі та зниження вартості за електроенергію [11].

Голова Асоціації енергоаудиторів України В. Литвин порушує нагальне питання щодо підвищення енергетичної ефективності в українських будівлях, яке є чи не одним з головних, зважаючи на дефіцит енергоносіїв у зв'язку зі знищенням сьогодні енергетичних об'єктів росією під час нищівних ударів. Він зауважує на важливості будівництва різноманітних будівель з пілотним спрямуванням, які мають необхідні заходи й елементи, призначені для будівель nZEB. Подібні будівлі можна брати до уваги як навчально-демонстраційні, що дозволить краще зорієнтуватися в підборі комбінації заходів, враховуючи при цьому важливий показник – вартість/ефективність.

Сьогодні особливо вагомо – це схвалити національні стандарти і вимоги до будівель з близьким до нульового енергоспоживання, а також ретельно підготувати норми, якими будуть послуговуватись надалі в будівельній індустрії. При цьому важливі вимоги не тільки до інженерних систем та конструкцій, а й до самої експлуатації будівель. До того ж варто впроваджувати системи верифікації відповідності будівлі до nZEB, аналізуючи фактичне річне споживання енергії. Це, найімовірніше, матиме сенс, аби стимулювати забудовників, власників і сервісні компанії для досягнення мети – енергонезалежності будівель [12].

Метою статті є дослідження методології забезпечення електроживлення на основі відновлюваних джерел енергії для будівель з нульовим та майже нульовим енергоспоживанням. У рамках цієї розвідки будуть розглянуті основні принципи та технології використання ВДЕ, а також переваги та виклики, пов'язані із впровадженням таких систем. Окрім того, буде проаналізовано приклади успішних проєктів, що демонструють ефективність та потенціал nZEB.

Виклад основного матеріалу. Передусім з'ясуємо, що являє собою відновлювана енергетика. Це енергетична сфера, яка спеціалізується на одержанні і використанні енергії завдяки відновлюваним джерелам енергії. До них належать періодичні чи сталі потоки енергії, які поширюються в природі та обмежені тільки стабільністю Землі: природна теплова енергія, вітер, променева енергія Сонця, гідроенергія тощо.

Так, 21 % світового енергоспоживання у 2013 році було забезпечено саме з відновлюваних джерел енергії [13]. У перспективі, до 2040 року вже є плани до 40 % світової електроенергії виробляти із відновлюваних джерел, а в Україні – до 2035 року збільшити використання ВДЕ з 4 до 25 % [14].

До основних технологій відновлюваної енергетики належать:

- вітроенергетика;
- гідроенергетика;
- сонячна енергетика;

(на сьогодні наявні три типи сонячних теплоелектростанцій:

- *баитовий* – з центральним приймачем-парогенератором, на поверхні якого зосереджується сонячне випромінювання від плоских дзеркалгеліостатів;
- *параболічний (лотковий)* – розміщуються у фокусі параболоциліндричних концентраторів вакуумні приймачі-труби з теплоносієм;
- *тарілковий* – розташовується у фокусі параболічного тарілкового дзеркала приймач сонячної енергії з робочою рідиною);
- сонячна теплоенергетика (сонячна енергія широко застосовується для теплопостачання, зокрема з гарячим водопостачанням та опаленням, а також для холодопостачання, висушування і кондиціювання повітря);

– геотермальна енергетика (геотермальна енергетика – це промислове одержання енергії, зокрема електроенергії, з термальних підземних вод та гарячих джерел; основне джерело – постійний потік теплоти з розжарених надр, направлений до поверхні Землі) [15];

– біопаливо, біоенергетика (біомаса – органічні речовини, що утворюються в рослинах внаслідок фотосинтезу та можуть бути застосовані для одержання енергії; поширені такі технології використання біомаси в біоенергетиці, як: пряме спалювання (фізичний метод), газифікація, виробництво спиртів і масел для отримання моторного палива, піроліз (хімічні методи), анаеробна ферментація з утворенням метану (мікробіологічний метод) [16].

На сьогодні будівлі з майже нульовим енергоспоживанням мають особливо важливе значення, оскільки під час воєнного стану часті вимкнення електроенергії вимагають рішучих дій та розв'язання нагальних питань. Тож розглянемо практичне визначення nZEB, яке має такі характеристики:

– Бути чітким у своїх цілях і термінах, щоб уникнути непорозуміння і невдач у впровадженні.

– Бути технічно та фінансово здійсненним.

– Щоб бути достатньо гнучкими та адаптованими до місцевих кліматичних умов, будівельні традиції.

– Спиратися на існуючі стандарти та практики енергоефективності.

– Дозволити та навіть сприяти відкритій конкуренції між різними технологіями.

– Бути амбітним з точки зору впливу на навколишнє середовище та розроблятися як відкрита концепція, здатна йти в ногу з розвитком технологій.

– Розроблятися на основі широкої згоди основних зацікавлених сторін (політиків, проєктувальників, промисловості, інвесторів, користувачів тощо).

– Надихати та стимулювати бажання швидшого впровадження [17].

Будівля з майже нульовим енергоспоживанням має на меті досягнення балансу між виробництвом енергії та її споживанням шляхом зменшення втрат та підвищення ефективності існуючих систем. Виробляти таку ж кількість енергії з меншою кількістю природних ресурсів та отримувати ту саму послугу з меншою кількістю енергії. Цей процес включатиме:

а) перетворення будівлі на енергоефективну шляхом зменшення споживання енергії за рахунок використання огорожувальних конструкцій, в саме фасаду, стін, вікон та плит перекриття даху, стелі та підлоги. Це може вимагати інвестицій у вікна та двері, а також утеплення стін та даху;

б) усунення використання викопного палива, яке використовується існуючими неефективними системами та обладнанням (ОВКВ та освітлення тощо);

в) забезпечення відновлюваної енергії на місці та коли це можливо [17].

Майже нульова або дуже мала кількість енергії, що потрібна, може бути вироблена на місці (в рамках схеми нетто-обліку) або в найближчій зоні (в рамках схеми віртуального нетто-обліку). Отже, nZEB підключені до електричних мереж, використовуючи їх як резервну систему для забезпечення балансу потужності. Аналітично, надлишкова електрика, що вводиться в мережу (під час низьких інтервалів споживання енергії будівлі), може бути використана під час низького виробництва енергії [18].

Дійсно, вивчаючи коефіцієнт самоспоживання житлових будівель південної Європи (будівлі з установками PV в рамках схеми нетто-обліку), можна зробити висновок, що середній коефіцієнт самоспоживання таких будівель коливається між 30 і 35%. Отже, майже нульове або дуже низьке споживання енергії слід вивчати з огляду на енергетичні транзакції з електричними мережами [19].

Розглянемо технічні особливості систем енергозабезпечення будівель з нульовим енергоспоживанням та особливості застосування відновлювальних джерел при їх застосуванні для енергозабезпечення будівель з нульовим енергоспоживанням.

Архітектурно-технічні передумови створення nZEB:

а) Оптимізація архітектурної форми [20; 21]:

1. орієнтація будівлі відповідно до сонячної активності;
2. мінімізація тепловтрат за допомогою компактної форми;
3. використання природного освітлення;
4. сонцезахисні елементи (навісні фасади, жалюзі, бриз-бреки).

б) Високоефективна теплова оболонка:

1. товста теплоізоляція стін, даху, підлоги ($U \leq 0.15-0.20 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$);
2. три- та чотиришарові енергозберігаючі склопакети;
3. мінімізація містків холоду;
4. застосування паро- й повітронепроникних шарів;
5. використання тепловідбивних покриттів.

Технічні системи енергозабезпечення в ZEB [22]:

I. Системи виробництва енергії:

1. Сонячні електростанції (СЕС) є найпоширенішим джерелом енергії у nZEB. Переваги: модульність, доступність, просте обслуговування. Види сонячних панелей: монокристалічні, полікристалічні, тонкоплівкові. За методом встановлення найбільш популярними є інтеграція у дах і фасад (BIPV).

2. Сонячні колектори часто застосовують для гарячого водопостачання та систем опалення через накопичувачі тепла. Вони є ефективними у весняно-осінній сезон.

3. Теплові насоси (повітря – повітря, повітря – вода, геотермальні) забезпечують високий COP (3–5), часто є основним джерелом опалення/охолодження. Геотермальні системи є більш стабільними, але дорожчими в монтажі у порівнянні з тепловими насосами.

4. Вітрогенератори малої потужності застосовуються рідше через залежність від місцевих умов, є доцільними в сільській та замиській місцевості.

5. Системи зберігання енергії показують високу ефективність та доцільність у складі nZEB, найчастіше застосовують акумуляторні батареї (LiFePO₄, нікель-марганець-кобальтові NMC), геліоакумулятори тепла та інтелектуальні теплові буфери.

II. Системи управління енергією:

1. Системи керування накопичувачами електроенергії (BMS) проводить моніторинг у режимі реального часу, прогнозує прогнозування виробництва енергії PV, проводить автоматичне балансування навантажень, адаптивне управління вентиляцією, освітленням, опаленням тощо.

2. Модуль «розумний будинок» включає в себе датчики присутності, сенсорний контроль мікроклімату, віддалене управління та оптимізація за графіками для максимальної ефективності використання наявних енергоресурсів.

III. Системи HVAC (опалення, вентиляція, кондиціонування):

1. Механічна вентиляція з рекуперацією тепла (коефіцієнт рекуперації 85–95%) зменшує тепловтрати на вентиляцію до 4–5 разів.

2. Низькотемпературні системи опалення включають у себе теплі підлоги, стелі, стінові панелі, забезпечують оптимальну роботу в комбінації з тепловими насосами.

3. Пасивні системи охолодження включають у себе системи нічного провітрювання, використання теплоємності внутрішніх конструкцій (бетон, камінь), зеленого даху.

Енергоефективність та зменшення споживання:

а) Світлодіодні системи освітлення в комплекті з датчиками руху та освітленості, можливістю безступінчатого регулювання яскравості освітлення.

б) Енергоефективна побутова техніка (A+++)

в) Використання відпрацьованої енергії, а саме рекуперація тепла стічної води, повторне використання тепла кондиціонерів та холодильників тощо.

Інтелектуальне планування енергобалансів: для досягнення нульового балансу річні графіки мають бути максимально вирівняні, тобто повинно відбуватись сезонне планування енергопотоків [23]:

а) літній профіцит електроенергії зберігається в акумуляторах або передається в мережу;

б) взимку дефіцит компенсується оптимальною роботою теплового насоса та тепловими буферами;

Переваги систем енергозабезпечення nZEB [24]:

- а) мінімальні експлуатаційні витрати;
- б) зменшення залежності від централізованих мереж;
- в) суттєве скорочення викидів CO₂;
- г) стабільний внутрішній мікроклімат;
- д) підвищення вартості нерухомості.

Виклики та обмеження nZEB:

- а) високий обсяг початкових інвестицій;
- б) залежність від кліматичних умов (особливо для PV);
- в) потреба у великій площі для розміщення сонячних панелей;
- г) складність проектування та інтеграції систем;
- д) необхідність спеціалізованого технічного обслуговування.

Окремої уваги заслуговують системи накопичення енергії у складі систем енергозабезпечення будівель із нульовим енергоспоживанням.

1. Роль та значення акумуляторних систем у nZEB [25]:

У будівлях з нульовим енергоспоживанням акумулятори виконують критично важливі функції:

- Балансування енергопотоків між виробництвом та споживанням.
- Компенсація нерівномірності генерації.
- Стабілізація мікромережі.
- Забезпечення автономності.
- Вирівнювання сезонних дисбалансів.

2. Основні типи акумуляторів, що використовуються для даних завдань:

2.1. Літій-залізо-фосфатні LiFePO₄ (LFP). Переваги: довговічність, безпека, ефективність. Недоліки: нижча щільність енергії [26,27].

2.2. Нікель-марганець-кобальтові (NMC). Переваги: компактність, високий струм. Недоліки: менший ресурс, більша пожежонебезпека.

2.3. Літій-титан-оксидні (LTO). Переваги: надвисокий ресурс, робота у широкому температурному діапазоні. Недоліки: висока ціна.

2.4. Свинцево-кислотні акумулятори (AGM/GEL). Переваги: низька ціна. Недоліки: малий ресурс, низький ККД.

2.5. Проточні батареї (VRFB). Переваги: великий ресурс, безпека. Недоліки: габарити, висока вартість.

3. Технічні параметри [28]:

- Ємність: 10...30 кВт·год для приватних будинків.
- Потужність: 3-15 кВт у побутових системах.
- ККД: LFP – 94...97 %, NMC — 92...95 %.
- DoD: LFP до 95 %.
- Термін служби: LFP – 10...20 років.

4. Архітектура систем. Компоненти: акумуляторний блок, EMS, BMS, інвертор, контролери, система охолодження [29].

5. Режим роботи:

- Денний: накопичення енергії.
- Нічний: живлення від батарей.
- Стабілізація мережі.
- Резервне живлення.

6. Алгоритми керування:

- Прогнозування генерації.
- Оптимізація заряду/розряду.

- Побудова оптимального енергобалансу.

7. Вимоги до безпеки [30]:

- Контроль температури.

- Вентиляція.

- Пожежні системи.

8. Економіка [31]:

- Вартість: LFP – 300...600 \$/кВт·год.

- Окупність: 6...12 років.

9. Перспективи:

- Гібридні системи тепло + електрика.

- Водневе зберігання.

- Твердотільні батареї.

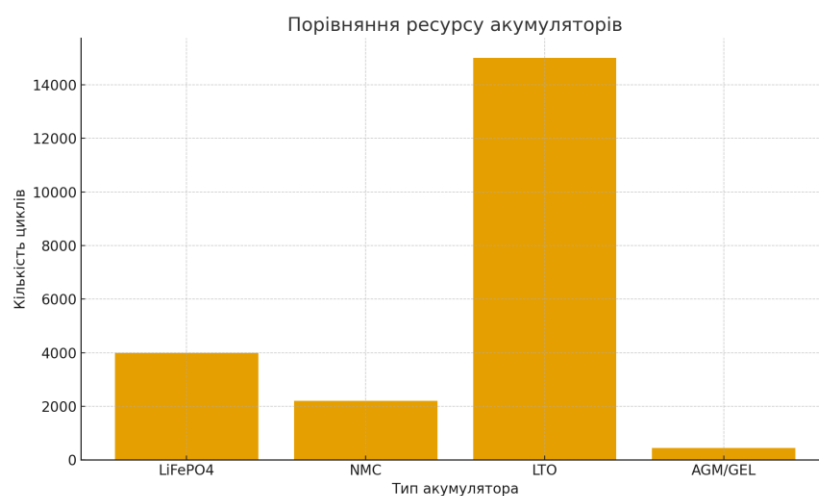


Рис. 1. Графік порівняння ресурсу акумуляторів [32; 33]

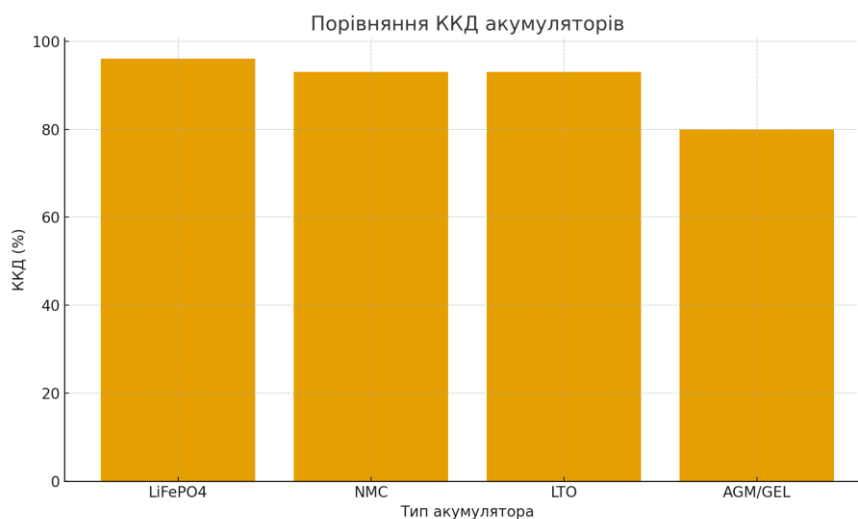


Рис. 2. Графік порівняння ККД акумуляторів [32, 33]

Таблиця 1 – Порівняльна таблиця акумуляторів [34]

Тип	Цикли (ресурс)	ККД (%)	DoD (%)	Вартість (\$/кВт·год)
LiFePO4	3000–7000	94–97	90–95	300–600
NMC	1500–3000	92–95	85–90	350–700
LTO	10000–20000	90–95	90–95	900–1500
AGM/GEL	300–600	75–85	50–70	150–250

Акумулятори є ключем до ефективності та автономності Zero Energy Buildings.

З огляду на розробку енергоефективних конструкцій, посилення [23,35] надають огляд критеріїв проєктування будівель, які можуть зменшити теплове та охолоджувальне навантаження житлових будинків. Ці критерії базуються на орієнтації будівель, формі, системі оболонки, пасивних механізмах опалення та охолодження, затінення та скління. Ці роботи досліджують оптимальні стійкі і енергоефективні варіанти проєктування будівель. Заходи з енергетичної ефективності та встановлення технологій ВДЕ для будівель, призначених для перетворення на nZEB, досліджуються в [36], з використанням квазідинамічних інструментів та моделей симуляції. У [37] представлені принципи інтегрованого проєктування та технології розумних будівель (разом з методологіями енергетичної ефективності та інноваційними техніками), підкреслюючи, що інтеграція розумних технологій вимагає цілісного підходу, який враховує всі аспекти сталого розвитку з ранніх етапів проєктування будівлі, щоб повністю скористатися перевагами процесу та можливостями, які пропонують розумні мережі.

Що стосується LCCA (оцінка витрат на життєвий цикл), то у специфічній літературі є багато випадків досліджень. Серед них, у [38] представлена базова методологія LCCA, що акцентує увагу на аналізі теперішньої вартості компонентів системи, з метою розрахунку загальних витрат на володіння протягом її життєвого циклу, включаючи витрати на придбання, установку, експлуатацію та обслуговування. LCCA пропонується для системи енергії на основі СЕС та акумулятора в житловому будинку в Індії, використовуючи аналітичні вирази для розрахунку періоду окупності.

У роботі [39] представлено порівняння LCC п'яти альтернативних систем опалення, а саме GDHS, котлів на природному газі, котлів на пелетах, GCHP та технологій вугільних котлів, у чотирьох кліматичних зонах Туреччини.

До прикладу, дослідження, описане в [17], зосереджується на впровадженні концепції колективного самоспоживання nZEB шляхом використання СЕС та геотермальних енергетичних систем у багатоквартирному житловому будинку. Представлена концепція nZEB базується на високій продуктивності енергії систем СЕС у країнах Середземномор'я. Крім того, була обрана центральна геотермальна енергетична система для забезпечення як опалення, так і охолодження потреб багатоквартирного житлового будинку, завдяки технологічній зрілості цих систем, а також їхній високій ефективності. У цьому випадку дослідження враховується розрахунок споживання енергії решти приладів, тобто електричне споживання будівлі до встановлення ГТН (геотермального теплового насоса). Що стосується інших електричних приладів, то зазначається, що вони становлять приблизно 20...25 % річного споживання енергії. З цієї причини ці компоненти споживання енергії не повинні бути проігноровані в подальшому аналізі. Загальна площа кожного житла вважається 150 м². Враховуючи, що висота стелі приблизно 3,2 м, загальний об'єм опалювального та охолоджувального простору будівлі дорівнює 2880 м³. Крім того, будівля орієнтована на південний схід і розташована в міській зоні.

Як альтернативне рішення, замість геотермальної енергетичної системи можуть бути встановлені сонячні теплові панелі. Хоча сонячні теплові панелі можуть зменшити необхідний розмір ГТН, для спрощення цей сценарій не розглядається. Отже, в цій статті обрано випадок дослідження поверхневої геотермальної енергетичної системи. Вона складається з ГТ (геотермального теплообмінника) у вертикальному розташуванні, щоб займати якомога менше простору для установки. Підземна тепла енергія постачається до будівлі за допомогою вискоелективних ГС (гідравлічних систем).

Крім того, використовуються Енергетичні служби (електричні та теплові) для покращення ефективності nZEB. Схематична діаграма запропонованої гнучкої системи nZEB представлена на рис. 3 [17].

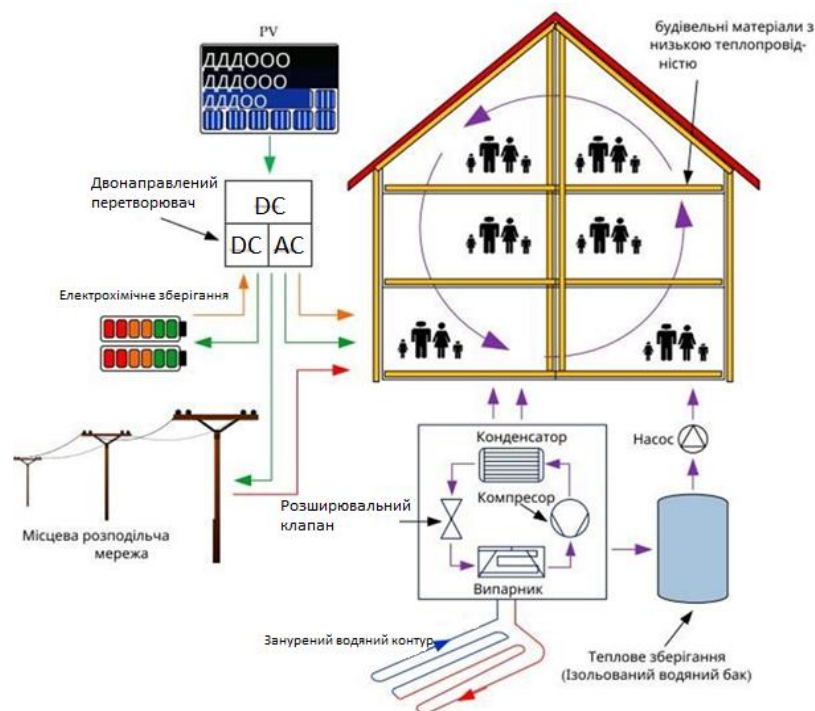


Рис. 3. Схематична діаграма запропонованої концепції nZEB [17]

У статті [17] запропоновано ефективне поєднання технологій ВДЕ, встановлених на типовому багатоквартирному житловому будинку в міському середовищі, зосереджуючи увагу на Середземномор'ї. Ця гібридна енергетична система складається із СЕС та геотермального блоку, щоб задовольнити вимоги до електричних, теплових та охолоджувальних навантажень. Крім того, була повністю проаналізована методологія розрахунку енергетичних служб для теплових/охолоджувальних та електричних навантажень, так що вся система була спроектована з урахуванням концепції nZEB. Технологія, що використовує геотермальну енергію, є дуже ефективною та екологічно чистою. Однак необхідно мати відповідний накопичувач тепла, щоб задовольнити відхилення теплового навантаження. У цій статті накопичувач теплової енергії був спроектований так, щоб покривати максимальні потреби навантаження в будь-яку пору року. Це є значною проблемою, оскільки основний геотермальний блок може балансувати лише середнє річне теплове/охолоджувальне навантаження. Об'єм накопичувача тепла повинен бути ретельно спроектований, щоб його можна було встановити під землею.

Що стосується ЕЕСУ (електрична енергетична одиниця зберігання), була представлена оптимальна методологія для їх розрахунку, враховуючи відповідні енергетичні транзакції з електричною мережею. Важливість встановлення ЕЕСУ полягає в тому, що чим більша потужність ЕЕСУ, тим менше енергетичних транзакцій з електричною мережею спостерігається. У цьому контексті запропонована методологія розмірності сприяє уникненню негативного впливу на роботу електричної мережі (такого як зворотний потік енергії, підвищення напруги, помилкове спрацьовування захисних заходів тощо) внаслідок збільшення проникнення житлових систем СЕС у той же фідер.

Отже, для забезпечення роботи електричної мережі та уникнення обмеження роботи для одиниць ВДЕ передбачається масове встановлення ЕЕСУ як в електричній мережі, так і в будівлях. Тому аналіз енергетичних транзакцій між будівлями з майже нульовим споживанням енергії та електричною мережею, а також оптимальний розмір ЕЕСУ, представлені в цій роботі, є надзвичайно важливими для розподільчих системних операторів та політиків, надаючи цінні оцінки щодо необхідності програм субсидій для трансформації nZEB, а також впливу на мережу через коливний профіль виробництва СЕС.

Що ж являє собою складова творення сталого розвитку світової спільноти? Це перелусім енергоефективність, яка об'єднує практично всі сфери економіки. Якщо розглядати енергетичну ефективність у будівництві, то йдеться про всі етапи створення будівлі – від обговорення майбутнього проєкту, власне будівництва й аж до експлуатації будівлі. Загалом енергоефективність – це про злагоджений механізм, який вимагає постійної реакції на ризики та моніторингу [40].

Сьогодні питання щодо потреби зменшення залежності від викопного палива є дуже актуальним та вимагає негайного розв'язання. Країни-члени ЄС [41] у 2020 році здійснили аналіз енергоспоживання, з'ясувавши, що домогосподарства, як сектори економіки, є найбільш залежними від енергії.

У роботі [42] проаналізовано дії Європейського Союзу стосовно розроблення різноманітних моделей проєктування активних та з майже нульовим споживанням енергії будівель. Крім того, наведено оцінку передових енергоефективних технологій та матеріалів (приміром, інтегровані фотоелектричні системи і розумне скло) з розрахунком існуючої будівлі, яка побудована за принципом nZEB, що застосовує ВДЕ в обсязі, що значно перевищує енергетичну потребу. Інтегрований проєкт огорожувальних конструкцій та систем, який запропонований авторами, створює надлишок енергії, який можливо при цьому віддати в мережу.

До узгодження мінімальних вимог до огорожувальних конструкцій в Італії приватний житловий будинок, побудований у 2013 році на півночі країни, проєктувався як висоенергоефективний. Джерелом енергії житлового будинку [35; 42], згідно з проєктом будівництва, є автономна теплоелектроцентраль. До її складу входить тепловий насос «повітря – вода» з електричним живленням (корисна теплова потужність 13,1 кВт), що відповідає як за підготовку гарячої води, так і кондиціювання повітря взимку з підключенням «теплої» підлоги. Наявні відновлювальні джерела енергії – фотоелектричні панелі (79,5 м²) та геліосистема (6,6 м²), що «покривають» 94 % споживання енергії.

Докладний підхід щодо оцінювання стану енергоефективності nZEB житлового фонду показав автор [43], в якому головна увага приділена новому будівництву в країнах Східної Європи: Румунії, Хорватії, Естонії, Чехії, Болгарії, Польщі, Словаччині, Литві та Латвії. Використовуючи національні публікації та законодавчі акти кожної з представлених країн, автор [43] створив чек-лист (спільно з 14 національними експертами) оцінки відповідності побудови нових будівель таким параметрам:

- коефіцієнти перетворення первинної енергії;
- вимоги теплового комфорту;
- політика у сфері ВДЕ (державне заохочення, тарифні умови);
- динаміка використання теплових насосів домогосподарствами;
- вимоги до огорожувальних конструкцій;
- темпи будівництва житлових будівель;
- порогове значення енергоефективності будівлі.

Застосування енергії, створеної відновлювальними джерелами енергії, є значущим фактором впливу зіставлення нової та/або реконструкції існуючої будівлі як такої, споживання енергії якою близьке до нуля. Для прикладу, у [44] зроблено оцінювання параметрів огорожувальних конструкцій і систем відновлювальної енергетики з моделюванням алгоритму багатокритеріальної оптимізації NSGA – II для різних кліматичних умов Туреччини. Це дало можливість імітувати навантаження на охолодження будівлі та опалення.

Методологія, запропонована в роботі [44], могла б застосовуватись як загальний підхід проєктування будівель з майже нульовим споживанням енергії – від попереднього етапу будівництва до будівництва для досягнення nZEB і оцінювання впливу мінімальних кліматичних змін на використання ВДЕ. При цьому варто враховувати кількісну частку покриття енергії за рахунок відновлювальних джерел та відсутність стандартизованого підходу.

Дослідження [45] також є оцінкою впливу кліматичних змін на характеристики будівель з майже нульовим енергоспоживанням (nZEB) та стійкості з погляду енергобалансу. Автори доводять, роблячи аналіз будівлі, розташованій на півдні Італії з середземноморським кліматом, що в таких кліматичних умовах зменшення потреби в опаленні може компенсувати збільшення потреби в охолодженні. Так, за найгіршого кліматичного сценарію, величина чистої первинної енергії може змінитися з 25,4 до 19,5 кВт·год/м²/рік із рівнем власного споживання 85 %. Однак у разі досягнення навесні робочої температури вище 30 °C будівля може перегріватись. Це створить потребу більш частого використання охолодження та дисбаланс «виробництво – використання» енергії у перехідний період.

Безумовно, запропоновані рішення потребують значних грошових інвестицій, тому для домогосподарств практична модернізація будівель рівня nZEB є досить коштовною. Відповідно до [46], країни Європи використовують програми заохочення домовласників у будівництві будівель із майже нульовим споживанням енергії. Наявний проєкт Housing 4.0 Energy досліджує розвиток доступних будинків з нульовим енергоспоживанням у трьох країнах: Бельгії, Нідерландах та Ірландії. Для прикладу, політика Нідерландів щодо питання розвитку nZEB спрямована на людей із середнім і нижче середнього рівнями доходів. Некомерційні соціальні агентства з оренди у фламандській схемі надають будинки групам з низькими доходами. В Ірландії місцева влада надає соціальне житло заявникам, які перебувають у списках очікування. У такий спосіб результати запропонованих урядом схем створюють екологічну, соціальну та економічну стійкість для домогосподарств із середнім та/або нижче середнього доходом, надаючи енергоефективні, комфортні та доступні будинки. Автори [46] запропонували бізнес-моделі схем, які допоможуть масштабувати доступні будинки з нульовим або близьким до нуля енергоспоживанням в інших країнах.

Приклади успішних проєктів у світі

Центр Буллітта в Сіетлі, штат Вашингтон, – комерційна офісна будівля, яка генерує стільки ж енергії, скільки споживає. Це проєкт будівлі з нульовим енергоспоживанням, який містить велику сонячну батарею, систему збору дощової води та елементи енергоефективного дизайну, такі як потрійні склопакети та суперізоляційні стіни.

Центр підтримки досліджень у Голдені, штат Колорадо, – це будівля з нульовим енергоспоживанням, яка слугує штаб-квартирою Національної лабораторії відновлюваної енергії. Він має такі енергоефективні конструктивні особливості, як добре ізольовані огороження будівлі, ефективні системи освітлення та велику сонячну батарею, яка забезпечує більш ніж достатньо енергії для задоволення енергетичних потреб будівлі.

Центр інтерактивних досліджень сталого розвитку (CIRS) – це будівля з нульовим енергоспоживанням в Університеті Британської Колумбії у Ванкувері, Канада. Він має низку енергоефективних конструктивних особливостей, зокрема, геотермальне опалення та охолодження, зелений дах і систему збору дощової води. У будівлі також є інноваційна система природної вентиляції, яка допомагає регулювати температуру в будівлі та покращувати якість повітря в приміщенні [47].

Висновки. Сьогодні для нашої країни серед головних завдань є створення науково-технічної бази відновлюваної енергетики, яка б поступово замінила традиційні методи отримання енергії на практично невичерпні екологічно чисті відновлювані джерела енергії. Тому варто шукати перспективні шляхи розвитку техніки та технологій на основі використання енергії відновлюваних джерел, що дасть Україні гарантію енергетичної безпеки.

На жаль, низький рівень довіри до державної політики щодо стимулювання розвитку відновлюваної енергетики України є основним стримувальним фактором. Передусім відсутні плани щодо довгострокового розвитку після 2030 року енергетичного вітчизняного сектору. Останні зміни також мають негативний вплив – скасування податкових пільг для ВДЕ, збільшення вартості приєднання до електромереж та зменшення розміру «зелених» тарифів.

Які ж шляхи розв'язання порушеного нами питання? На нашу думку, необхідно проводити ефективну комунікаційну роботу з місцевими органами самоуправління з наданням економічних, соціальних і екологічних переваг проєктам відновлюваної енергетики. Крім того, варто розробляти інформаційно-освітні програми з метою пояснення переваг і можливостей освоєння енергії ВДЕ, надання інформації щодо оцінки технічного потенціалу різних видів ВДЕ у регіонах України.

У сьогоденнішніх реаліях пошук та розробка методології забезпечення електроживлення на основі відновлюваних джерел енергії для будівель з нульовим енергоспоживанням є актуальною та надважливою темою. Описана методологія дає розуміння щодо складності та проблематики проєктування будівель з нульовим енергоспоживанням. Однак незважаючи на це, переймаючи європейський досвід проєктування, зведення та експлуатації будівель, ми повинні розвивати і впроваджувати будівництво споруд з низьким рівнем енергоспоживання в українській енергетичній сфері.

У роботі розглянуто види відновлюваних джерел енергії, основні принципи й технології використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), методологію забезпечення електроживлення для будівель з нульовим енергоспоживанням, а також переваги та виклики, пов'язані із впровадженням таких систем. Окрім того, проаналізовано приклади успішних проєктів, що демонструють ефективність та потенціал nZEB.

Принципи визначення nZEB повинні враховувати всі фінансові, правові, технічні, екологічні аспекти та відповідати сучасним і майбутнім викликам та перевагам. Відповідне та практичне визначення nZEB повинно бути чітким у своїх цілях і термінах, технічно та фінансово здійсненним, достатньо гнучким та адаптованим до місцевих кліматичних умов, спиратися на чинні стандарти і практики енергоефективності.

Таким чином, нами заплановано надалі розглядати питання щодо розробки моделей проєктування активних та з майже нульовим споживанням енергії будівель, шукати нові підходи в методології забезпечення енергоживлення на основі відновлюваних джерел енергії для будівель з нульовим енергоспоживанням. Крім того, будемо враховувати впровадження європейських nZEB та успішних проєктів у цій сфері, які мають позитивне загальне покращення визначень будівель з майже нульовим споживанням енергії, розглядати різноманітні технології та рівні енергоефективності, що можуть бути досягнені і в умовах України, у тому числі завдяки схожості клімату окремих регіонів України з країнами Європи.

Поточне дослідження проводиться в межах проєкту науково-дослідної роботи молодих вчених №ДР 0123U100975 за підтримки МОН України.

Список використаних джерел

1. European Commission. (n.d.). *Nearly-zero energy and zero-emission buildings*. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-and-zero-emission-buildings_en.
2. Publications Office of the European Union. (2021). *EU's global leadership in renewables: Final synthesis report*. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/publication/8a9b9147-3aeb-11ed-9c68-01aa75ed71a1/language-en>.
3. European Parliament & Council of the European Union. (2009). *Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources*. *Official Journal of the European Union*, L 140, 16–62. <https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:en:PDF>.
4. European Commission. (n.d.). *Renewable energy directive*. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en.
5. European Parliament & Council of the European Union. (2018). *Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast)*. *Official Journal of the European Union*, L 328, 82–209. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001>.

6. Кудря, С. О. (ред.). (2020). *Відновлювані джерела енергії: монографія*. Інститут відновлюваної енергетики НАН України.
7. Кудря, С. О., Рєпкін, О. О., Яценко, Л. В., Ткаленко, М. Д., & Шинкаренко, Л. Я. (2019). *Концепція дорожньої карти розвитку водневої енергетики України на період до 2035 року. Відновлювана енергетика, (4), 22–28.*
8. Глушко, О., Лисенко, Н., Новик, К., Стала, Р., Варадзин, З., & Степенко, С. (2024). *Огляд краєвих інноваторів в енергетиці, що впливають на розвиток відновлюваної енергетики. Технічні науки та технології, (1), 274–284.* [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-274-284](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-274-284).
9. Бойко, С., Городній, О., Касаткіна, І., Долударева, Я., & Вершняк, Л. (2021). *Вітровоенергетичний комплекс для зарядження акумуляторних батарей. Технічні науки та технології, (4), 156–162.* [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4\(22\)-156-162](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4(22)-156-162).
10. Лобов, В., Єфіменко, Л., Бойко, С., & Городній, О. (2022). *Методика проектування системи керування мікроклімату в приміщенні. Технічні науки та технології, (1), 172–183.* [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-1\(27\)-172-183](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-1(27)-172-183).
11. Constructive Voices. (n.d.). Будівлі з нульовим енергоспоживанням. <https://constructive-voices.com/uk/інноваційні-«зелені»-будівельні-матеріали%2C-що-відкривають-шлях-до-сталого-будівництва>.
12. Литвин, В. (2024, 24 вересня). Будівлі з нульовим енергоспоживанням: чи допоможе це подолати енергетичну кризу. *Економічна правда*. <https://www.epravda.com.ua/columns/2024/09/24/719699>.
13. REN21. (2014). Renewables 2014 global status report. https://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full_report_low_res.pdf.
14. Разумков Центр. (n.d.). Орієнтири розвитку альтернативної енергетики України до 2030 р. <https://web.archive.org/web/20210123123722/https://razumkov.org.ua/statti/orientyryrozvytku-alternatyvnoi-energetyky-ukrainy-do-2030r>.
15. Energetika.in.ua. (n.d.). Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. <http://energetika.in.ua/ua/books/book-5/part-1/section-2/2-8>.
16. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». (n.d.). Відновлювана енергетика та системи розосередженої генерації. <https://ep.kpi.ua/index.php/uk/node/24>.
17. Traboulsi, S. R., & Lamouchi, A. (2023, 6 вересня). Manual for building energy refurbishment into nearly zero energy buildings (nZEB). GreenBuilding Consortium. <https://www.enicbmed.eu/sites/default/files/202401/O5.4%20MPC%20Manual.pdf>.
18. Kotarela, F., Kyritsis, A., & Papanikolaou, N. (2020). On the implementation of the nearly zero energy building concept for jointly acting renewables self-consumers in Mediterranean climate conditions. *Energies, 13, 1032.* https://www.researchgate.net/publication/339501991_On_the_Implementation_of_the_Nearly_Zero_Energy_Building_Concept_for_Jointly_Acting_Renewables_SelfConsumers_in_Mediterranean_Climate_Conditions.
19. Kyritsis, A., Mathas, E., Antonucci, D., Grottko, M., & Tselepis, S. (2016). *Energy improvement of office buildings in Southern Europe. Energy and Buildings, 123, 17–33.* <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.032>.
20. Європейський парламент і Рада Європейського Союзу. (2018). Директива (ЄС) 2018/844 про енергетичну ефективність будівель (вносить зміни до Директив 2010/31/ЄС та 2012/27/ЄС). <https://www.legislation.gov.uk/eudr/2018/844>.
21. Європейська комісія. (2018). *Energy performance of buildings – Directive (EU) 2018/844 (EPBD)*. EU Publications.
22. Torcellini, P., Pless, S., Deru, M., & Crawley, D. (2006). *Zero energy buildings: A critical look at the definition*. National Renewable Energy Laboratory (NREL).
23. Feng, Y. (2004). *Thermal design standards for energy efficiency of residential buildings in hot summer/cold winter zones. Energy and Buildings, 36, 1309–1312.* <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.08.003>.
24. Kalogridou, S. (2014). *Solar energy engineering: Processes and systems* (2nd ed.). Academic Press.
25. Bürde, R., & Jäger, B. (2019). *Energy management systems for zero-energy buildings. Renewable Energy, 138, 1344–1356.*

- 26.Liu, K., Wei, Z., Han, X., Ouyang, M., Amine, K., & Chen, Z. (2019). *Overview of lithium-ion battery technology*. *Energy Storage Materials*, 20, 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2018.11.017>.
- 27.Hauer, A. (Ed.). (2021). *Thermal energy storage: Systems and applications* (3rd ed.). Wiley.
- 28.Parsons, J., et al. (2020). *Battery energy storage systems for renewable integration*. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(4), 3840–3851.
- 29.International Electrotechnical Commission. (2015). *IEC 61427-2:2015. Secondary cells and batteries for renewable energy storage – General requirements and methods of test*. IEC.
- 30.Lunz, B., & Sauer, D. U. (2015). Aging of lithium-ion batteries in electric vehicles and charging strategies for stationary energy storage. *Journal of Power Sources*, 279, 694–704. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.01.053>.
- 31.International Renewable Energy Agency. (2017). *Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030*. IRENA.
- 32.Tesla Energy. (2022). *Tesla Powerwall product specification sheet*. Tesla Inc.
- 33.BYD Company. (2023). *BYD Battery-Box: Technical data sheet for LFP home storage systems*.
- 34.Uddin, K., et al. (2021). *Techno-economic analysis of different energy storage technologies*. *Journal of Energy Storage*, 40, 102740. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102740>.
- 35.Pacheco, R., Ordóñez, J., & Martínez, G. (2012). *Energy efficient design of buildings: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3559–3573. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045>.
- 36.Kampelis, N., Gobakis, K., Vagias, V., Kolokotsa, D., Standardi, L., Isidori, D., Cristalli, C., Montagnino, F. M., Paredes, F., Muratore, P., et al. (2017). *Evaluation of the performance gap in industrial, residential and tertiary near-zero energy buildings*. *Energy and Buildings*, 148, 58–73. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.057>.
- 37.Karlessi, T., Kampelis, N., Kolokotsa, D., Santamouris, M., Standardi, L., Isidori, D., & Cristalli, C. (2017). *The concept of smart and nZEB buildings and the integrated design approach*. *Procedia Engineering*, 180, 1316–1325. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.294>.
- 38.Li, H., Qu, L., & Qiao, W. (2017). *Lifecycle cost analysis for wind power converters*. In *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)* (pp. 630–634). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EIT.2017.8053439>.
- 39.Ates, S. A. (2015). *Life cycle cost analysis: An evaluation of renewable heating systems in Turkey*. *Energy Exploration & Exploitation*, 33, 621–638. <https://doi.org/10.1260/0144-5987.33.4.621>.
- 40.Дешко, В. І., & Наумчук, О. С. (2023). *Аспекти використання nZEB-концепції для будівель у Центральній та Східній Європі. Технології та інжиніринг, (1), 1–12*. <https://jrn1.knutd.edu.ua/index.php/techeng/article/view/1181/1130>.
- 41.Європейська комісія. (n.d.). *Energy statistics – an overview*. Statistics Explained (Eurostat). https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Energy_statistics__an_overview#Final_energy_consumption.
- 42.Magrini, A., Lentini, G., Cuman, S., Bodrato, A., & Marenco, L. (2020). From nearly zero energy buildings (NZEB) to positive energy buildings (PEB): The next challenge – The most recent European trends with some notes on the energy analysis of a forerunner PEB example. *Developments in the Built Environment*, 3, 100019. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100019>.
- 43.Attia, S. (2022). *Data on residential nearly zero energy buildings (nZEB) design in Eastern Europe*. *Data in Brief*, 43, 108419. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108419>.
- 44.Acar, U., & Kaska, O. (2022). *Energy and economical optimal of nZEB design under different climate conditions of Türkiye*. *Journal of Building Engineering*, 105103. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105103>.
- 45.Ascione, F., De Masi, R. F., Gigante, A., & Vanoli, G. P. (2022). *Resilience to climate change of nearly zero energy buildings designed according to the EPBD recast: Monitoring, calibrated energy models and perspective simulations of a Mediterranean nZEB living lab*. *Energy and Buildings*, 262, 112004. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112004>.
- 46.Ebrahimigharehbaghi, S., der Heijden, H., & Elsinga, M. (2022). *Sustainable business model of affordable zero energy houses: Upscaling potentials*. *Journal of Cleaner Production*, 344, 130956. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130956>.
- 47.Novatr. (n.d.). *Net-zero buildings: Guiding the way ahead for sustainable architecture*. <https://www.novatr.com/blog/what-are-net-zero-buildings#3>.

References

1. European Commission. (n.d.). *Nearly-zero energy and zero-emission buildings*. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-and-zero-emission-buildings_en.
2. Publications Office of the European Union. (2021). EU's global leadership in renewables: Final synthesis report. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/publication/8a9b9147-3aeb-11ed-9c68-01aa75ed71a1/language-en>.
3. European Parliament & Council of the European Union. (2009). *Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources*. *Official Journal of the European Union*, L 140, 16–62. <https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:en:PDF>.
4. European Commission. (n.d.). Renewable energy directive. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en.
5. European Parliament & Council of the European Union. (2018). Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). *Official Journal of the European Union*, L 328, 82–209. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001>.
6. Kudria, S. O. (Ed.). (2020). Vidnovliuvani dzherela enerhii [Renewable energy sources]. *Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NAN Ukrainy*.
7. Kudrya, S. O., Repkin, O. O., Yatsenko, L. V., Tkalenko, M. D., Shynkarenko, L. I. (2019). Kontseptsia Dorozhnoi karty rozvytku vodnevoi enerhetyky Ukrainy na period do 2035 roku [The concept of the Roadmap for the development of hydrogen energy in Ukraine for the period up to 2035]. *Vidnovliuvana enerhetyka – Renewable energy*, (4(59)), 22–28.
8. Hlushko, O., Lysenko, N., Novyk, K., Stala, R., Varadzyn, Z., & Stepenko, S. (2024). Ohliad krashchykh innovatoriv v enerhetytsi, shcho vplyvaiut na rozvytok vidnovliuvanoi enerhetyky. [An overview of the best innovators in the energy sector who are influencing the development of renewable energy]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (1), 274–284. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-274-284](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-274-284).
9. Boiko S., Gorodny O., Kasatkina I., Doludarieva Y., & Vershniak L. (2021). Vitroenerhetychni kompleks dlia zariadzhennia akumulatorykh batarei [Wind power complex for loading of storage batteries]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (4(22)), 156–162. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4\(22\)-156-162](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4(22)-156-162).
10. Lobov V., Efimenko L., Boiko S., Gorodny O. (2022). Metodyka proiektuvannia systemy keruvannia mikroklimatu v prymishchenni. [Methodology for the indoor microclimate control system design]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii - Technical sciences and technologies*, (1(27)), 172–183. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-1\(27\)-172-183](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-1(27)-172-183).
11. Budivli z nulovym enerhospozhyvanniam [Buildings with zero energy consumption]. <https://constructive-voices.com/uk/інноваційні-«зелені»-будівельні-матеріали%20С-що-відкривають-шлях-до-сталого-будівництва/>.
12. Lytvyn, V. (2024). Budivli z nulovym enerhospozhyvanniam: chy dopomozhe tse podolaty enerhetychnu kryzu [Buildings with zero energy consumption: will it help to overcome the energy crisis]. *Ekonomichna Pravda – Economic truth*. <https://www.epravda.com.ua/columns/2024/09/24/719699>.
13. RENEWABLES 2014 Global status report. https://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf.
14. Razumkov Center. (n.d.). Oriientyry rozvytku alternatyvnoi enerhetyky Ukrainy do 2030 r. [Guidelines for the development of alternative energy in Ukraine until 2030]. <https://web.archive.org/web/20210123123722/https://razumkov.org.ua/statti/oriientyryrozvytku-alternatyvnoi-energetyky-ukrainy-do-2030r>.
15. Energetika.in.ua. (n.d.). Enerhetyka: istoriia, suchasnist i maibutnie [Energy: history, present and future]. <http://energetika.in.ua/ua/books/book-5/part-1/section-2/2-8>.
16. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy «Kyivskyi politekhnichnyi instytut imeni Ihoria Sikorskoho» [National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute']. (n.d.). *Vidnovliuvana enerhetyka ta systemy rozoseredzhenoi heneratsii – Renewable energy and distributed generation systems*. <https://ep.kpi.ua/index.php/uk/node/24>.

17. Traboulsi, S. R., & Lamouchi, A. (2023, 6 вересня). Manual for building energy refurbishment into nearly zero energy buildings (nZEB). GreenBuilding Consortium. <https://www.enicbc-med.eu/sites/default/files/202401/O5.4%20MPC%20Manual.pdf>.
18. Kotarela, F., Kyritsis, A., & Papanikolaou, N. (2020). On the implementation of the nearly zero energy building concept for jointly acting renewables self-consumers in Mediterranean climate conditions. *Energies*, 13, 1032. https://www.researchgate.net/publication/339501991_On_the_Implementation_of_the_Nearly_Zero_Energy_Building_Concept_for_Jointly_Acting_Renewables_SelfConsumers_in_Mediterranean_Climate_Conditions.
19. Kyritsis, A., Mathas, E., Antonucci, D., Grottko, M., & Tselepis, S. (2016). *Energy improvement of office buildings in Southern Europe*. *Energy and Buildings*, 123, 17–33. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.032>.
20. 2018/844. Directive on the energy performance of buildings. Replaces Directive 2010/31/EU and Directive 2012/27/EU; effective from 2018-05-30. Official edition. 2018. URL: <https://www.legislation.gov.uk/eudr/2018/844>
21. European Commission. Energy performance of buildings — Directive (EU) 2018/844 (EPBD). Brussels: EU Publications. (2018).
22. Torcellini, P., Pless, S., Deru, M., & Crawley, D. (2006). *Zero energy buildings: A critical look at the definition*. National Renewable Energy Laboratory (NREL).
23. Feng, Y. (2004). *Thermal design standards for energy efficiency of residential buildings in hot summer/cold winter zones*. *Energy and Buildings*, 36, 1309–1312. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.08.003>.
24. Kalogridou, S. (2014). *Solar energy engineering: Processes and systems* (2nd ed.). Academic Press.
25. Bürde, R., & Jäger, B. (2019). *Energy management systems for zero-energy buildings*. *Renewable Energy*, 138, 1344–1356.
26. Liu, K., Wei, Z., Han, X., Ouyang, M., Amine, K., & Chen, Z. (2019). *Overview of lithium-ion battery technology*. *Energy Storage Materials*, 20, 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2018.11.017>.
27. Hauer, A. (Ed.). (2021). *Thermal energy storage: Systems and applications* (3rd ed.). Wiley.
28. Parsons, J., et al. (2020). *Battery energy storage systems for renewable integration*. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(4), 3840–3851.
29. International Electrotechnical Commission. (2015). *IEC 61427-2:2015. Secondary cells and batteries for renewable energy storage – General requirements and methods of test*. IEC.
30. Lunz, B., & Sauer, D. U. (2015). Aging of lithium-ion batteries in electric vehicles and charging strategies for stationary energy storage. *Journal of Power Sources*, 279, 694–704. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.01.053>.
31. International Renewable Energy Agency. (2017). *Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030*. IRENA.
32. Tesla Energy. (2022). *Tesla Powerwall product specification sheet*. Tesla Inc.
33. BYD Company. (2023). *BYD Battery-Box: Technical data sheet for LFP home storage systems*.
34. Uddin, K., et al. (2021). *Techno-economic analysis of different energy storage technologies*. *Journal of Energy Storage*, 40, 102740. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102740>.
35. Pacheco, R., Ordóñez, J., & Martínez, G. (2012). *Energy efficient design of buildings: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3559–3573. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045>.
36. Kampelis, N., Gobakis, K., Vagias, V., Kolokotsa, D., Standardi, L., Isidori, D., Cristalli, C., Montagnino, F. M., Paredes, F., Muratore, P., et al. (2017). *Evaluation of the performance gap in industrial, residential and tertiary near-zero energy buildings*. *Energy and Buildings*, 148, 58–73. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.057>.
37. Karlessi, T., Kampelis, N., Kolokotsa, D., Santamouris, M., Standardi, L., Isidori, D., & Cristalli, C. (2017). *The concept of smart and nZEB buildings and the integrated design approach*. *Procedia Engineering*, 180, 1316–1325. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.294>.
38. Li, H., Qu, L., & Qiao, W. (2017). *Lifecycle cost analysis for wind power converters*. In *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)* (pp. 630–634). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EIT.2017.8053439>.
39. Ates, S. A. (2015). *Life cycle cost analysis: An evaluation of renewable heating systems in Turkey*. *Energy Exploration & Exploitation*, 33, 621–638. <https://doi.org/10.1260/0144-5987.33.4.621>.

40. Deshko, V. I., & Naumchuk, O. S. (2023). Aspekty vykorystannia nZEB-kontseptsii dlia budivel u Tsentralnii ta Skhidnii Yevropi. [Aspects of applying the nZEB concept to buildings in Central and Eastern Europe.] *Tehnologii ta inzhynirinh – Technologies and engineering*, (1), 1–12. <https://jrn1.knntd.edu.ua/index.php/techeng/article/view/1181/1130>.

41. The European Commission. (n.d.). Energy statistics – an overview. Statistics Explained (Eurostat). https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Energy_statistics__an_overview#Final_energy_consumption.

42. Magrini, A., Lentini, G., Cuman, S., Bodrato, A., & Marengo, L. (2020). From nearly zero energy buildings (NZEB) to positive energy buildings (PEB): The next challenge – The most recent European trends with some notes on the energy analysis of a forerunner PEB example. *Developments in the Built Environment*, 3, 100019. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100019>.

43. Attia, S. (2022). *Data on residential nearly zero energy buildings (nZEB) design in Eastern Europe. Data in Brief*, 43, 108419. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108419>

44. Acar, U., & Kaska, O. (2022). *Energy and economical optimal of nZEB design under different climate conditions of Türkiye. Journal of Building Engineering*, 105103. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105103>.

45. Ascione, F., De Masi, R. F., Gigante, A., & Vanoli, G. P. (2022). *Resilience to climate change of nearly zero energy buildings designed according to the EPBD recast: Monitoring, calibrated energy models and perspective simulations of a Mediterranean nZEB living lab. Energy and Buildings*, 262, 112004. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112004>.

46. Ebrahimigharehbaghi, S., der Heijden, H., & Elsinga, M. (2022). *Sustainable business model of affordable zero energy houses: Upscaling potentials. Journal of Cleaner Production*, 344, 130956. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130956>.

47. Novatr. (n.d.). Net-zero buildings: Guiding the way ahead for sustainable architecture. <https://www.novatr.com/blog/what-are-net-zero-buildings#3>.

Дата першого надходження статті до видання: 21.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.12.2025

UDC 621.311:620.9

Dmytro Zakharchenko¹, Jaroslav Syl², Serhii Stepenko³

¹Junior Researcher

Mine Action Center of the Ministry of Defense of Ukraine (Chernihiv, Ukraine)

Researcher

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: dimazakhar@gmail.com

²PhD student at the Department of Electrical Engineering, Information and Measurement Technologies, Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: jaroslav.sila4@gmail.com

³PhD, Associate Professor, Leading Researcher

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: serhii.stepenko@stu.cn.ua

POWER SUPPLY FOR ZERO-ENERGY BUILDINGS BASED ON AUTONOMOUS SYSTEMS WITH RENEWABLE SOURCES AND ELECTRICITY STORAGE SYSTEMS

The article covers the study of the methodology of providing electricity based on renewable energy sources for buildings with zero and almost zero energy consumption. It shows the importance of developing a methodology for modelling energy supply based on renewable energy sources. Within the framework of this work, the main principles and technologies of using renewable energy sources (RES), as well as the advantages and challenges associated with the implementation of these systems, are considered. The purpose of the article is to explore the methodology of providing power supply based on renewable energy sources for buildings with zero and almost zero energy consumption. In addition, examples of successful projects demonstrating the effectiveness and potential of NZEB were analyzed.

Keywords: renewable energy sources; methodology for providing electricity; zero energy consumption; NZEB potential; energy sector; electricity storage devices; renewable energy technologies; electrical network.

Fig.: 3. Table: 1. References: 47.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-382-413](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-382-413)

УДК 621.31:621.383

Тимофій Віталійович Якушкін¹, Роман Дмитрович Єршов²¹здобувач ступеня доктора філософії, молодший науковий співробітник кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: yakushkintima@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3432-9237>. SCOPUS Author ID: 57282689600²науковий співробітник, старший викладач кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: roman.d.vershov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0267-2906>

ResearcherID: H-1432-2016. SCOPUS Author ID: 57188719994

ОГЛЯД ДВОНАПРАВЛЕНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ З ШИРОКИМИ ДІАПАЗОНАМИ ВХІДНИХ ТА ВИХІДНИХ НАПРУГ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

У роботі виконано аналітичний огляд та класифікацію напівпровідникових двонаправлених перетворювачів постійної напруги, які є важливою складовою частиною автономних систем генерації електричної енергії на основі фотоелектричних перетворювачів. Розглянуто основні топології силової частини двонаправлених перетворювачів без гальванічної розв'язки між сторонами обміну енергією та з гальванічною розв'язкою за допомогою височастотного силового трансформатора. Сформульовано оригінальний підхід до вибору схеми резонансної ланки в складі резонансних ізолюваних двонаправлених перетворювачів. Розглянуто принципи та алгоритми, що лежать в основі побудови систем автоматичного керування двонаправленими перетворювачами, узагальнено переваги та недоліки основних підходів до керування та область їх застосування. Висвітлені базові засади побудови багатонаправлених/багатопортових перетворювачів, а також специфічні прийоми з'єднання елементів силової частини та керування для них. Окрема увага приділена питанням підвищення вхідної та вихідної напруги, циркулюючого струму та розширення діапазону перетворення шляхом застосування методів каскадування, а також процесу реверсування двонаправлених перетворювачів.

Ключові слова: автономні електричні мережі; автономні системи генерації; двонаправлені перетворювачі; напівпровідникові перетворювачі; перетворювачі постійної напруги; порівняльний аналіз; топології перетворювачів; реверсування перетворювача; системи автоматичного керування; фотоелектричні панелі.

Рис.: 18. Бібл.: 50.

Актуальність теми дослідження. Вже як кілька років, внаслідок терористичних дій рф проти мирного населення, Україна стикається з проблемою забезпечення громадян стабільним електроживленням. Наявність такої гострої проблеми спонукає розвивати альтернативну енергетику та шукати шляхи її швидкої інтеграції в пошкоджену електричну мережу країни. Дослідження та розвиток автономних систем генерації електричної енергії (АСГ-ЕЕ) може вирішити питання з відновленням енергетичної мережі країни, використовуючи енергію відновлюваних джерел енергії (ДжЕ) – сонця, потоків вітру та води.

На рис. 1 зображено архітектуру АСГ-ЕЕ [1; 2] на основі масиву фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) або, простіше, – сонячних панелей (англ. *Photovoltaic array*) у ролі основного відновлювального (альтернативного) ДжЕ. Масив акумуляторних батарей (М-АКБ, англ. *Battery array*) дозволяє забезпечити споживача електричною енергією у разі відсутності живлення від зовнішньої мережі та несприятливих погодних умов для її генерації. Перетворювач постійної напруги (англ. *DC/DC*), безпосередньо підключений до масиву ФЕП (М-ФЕП), відбирає з нього максимальну енергію завдяки алгоритму відстеження точки максимальної потужності ФЕП (англ. *MPPT*) [3] та забезпечує необхідним значенням напруги загальну ланку постійного струму (ЛПС, англ. *DC link bus*). Енергія із ЛПС використовується для живлення навантажень, що працюють як від постійної напруги – за допомогою перетворювача постійної напруги (*DC/DC Converter*), так і від змінної – за допомогою інвертора (*DC/AC Inverter*). Якщо запасена в ЛПС енергія зменшується, то напруга її просідає, в такому разі її поповнюють накопиченою в М-АКБ енергією, а у протилежному випадку – коли ЛПС має достатній рівень напруги, а М-АКБ ні, – то відбувається заряджання М-АКБ. Обидві ці функції покладені на проміжну ланку

між М-АКБ та ЛПС, спеціальний різновид перетворювача постійної напруги – двонаправлений перетворювач напруги (*Bidirectional DC/DC*), який і буде темою дослідження, описаного в цій роботі.

Ступінь автономності АСГ-ЕЕ визначається енергетичною ємністю (у Джоулях) її проміжного накопичувача енергії у вигляді М-АКБ, а також можливістю його швидкого та ефективного заряджання/розряджання від різних сторін обміну. До таких сторін обміну належать: М-ФЕП, ЛПС, інші накопичувачі енергії (АКБ, іоністори), зовнішня мережа змінного струму, дизель-генератор, а також DC- та AC-навантаження. У ідеалізованому випадку для взаємодії між кожною можливою парою сторін обміну застосовується напівпровідниковий двонаправлений перетворювач (ДНП), який забезпечує як заряджання, так і розряджання проміжного накопичувача енергії.

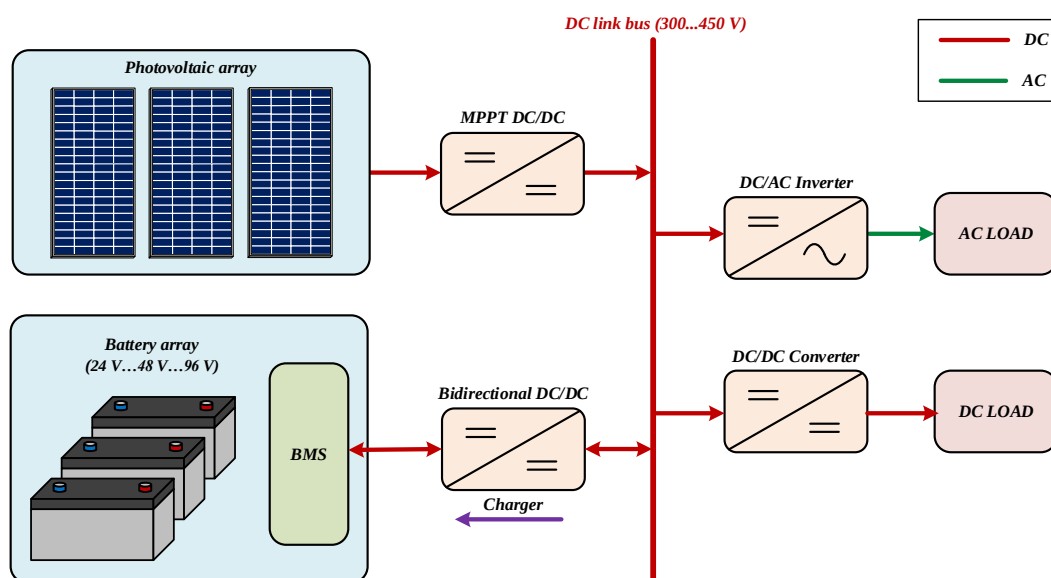


Рис. 1. Спрощена архітектура АСГ-ЕЕ на основі ФЕП

Джерело: розроблено авторами.

За наявності інтенсивного, але нестабільного потоку енергії та специфічних режимів роботи (наприклад, зарядка М-АКБ енергією, яка генерується М-ФЕП, та передача надлишку енергії в навантаження або мережу) доцільно використовувати багатонаправленні перетворювачі (БНП), які забезпечують енергетичний обмін між трьома або більше сторонами. Ці сторони можуть виступати як джерелами/накопичувачами, так і споживачами електричної енергії з різним характером струму (постійний/змінний). Варто зауважити, що ДНП не потрібно використовувати між тими сторонами обміну, що мають необоротний характер перетворення, очевидно, це М-ФЕП та дизель-генератори. Залежно від характеру протікання струму на сторонах обміну в АСГ-ЕЕ можуть бути встановлені наступні типи ДНП/БНП: AC-DC, DC-AC, DC-DC та AC-AC.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Оскільки розглядається АСГ-ЕЕ (рис. 1), у якій однією зі сторін обміну є М-АКБ з різною можливою кількістю послідовно каскадованих елементів (24 В...48 В...96 В) постійного струму, а іншою стороною обміну є ЛПС (300 В...450 В), сформована різною кількістю послідовно ввімкнених ФЕП, то постає задача в дослідженні особливостей та виборі оптимального рішення саме для ДНП типу DC-DC з широким діапазоном напруг перетворення.

Мета статті. В даній роботі буде проведено аналіз топологій напівпровідникових ДНП постійної напруги (ДНП-ПН) з широкими діапазонами вхідних та вихідних напруг. Результати аналізу допоможуть визначити архітектуру (топологію силової частини та

стратегію керування нею) ДНП-ПН, яка буде оптимальною між М-АКБ (48 В...96 В) та ЛПС (300 В...450 В) у складі автономної системи генерації електричної енергії на основі ФЕП потужністю до 5 кВт.

Виклад основного матеріалу.

1. Принцип роботи ДНП-ПН

Основна функція ДНП-ПН полягає в забезпеченні двосторонньої передачі енергії між сторонами обміну, якими в розглянутому випадку будуть М-АКБ та ЛПС, їхня напруга ніколи не змінює свій знак, лише амплітуду. ДНП-ПН можуть працювати в режимах як підвищення, так і пониження напруги, забезпечуючи тим самим заряджання та розряджання накопичувачів енергії, та стабілізацію напруги ЛПС. Далі буде розглянуто структурні схеми силових частин (СЧ) ДНП-ПН та визначено особливості їх роботи, а саме, за рахунок яких компонентів СЧ відбувається двонаправлене перетворення. Також буде визначено особливості роботи цих компонентів системи. Способи взаємного розташування компонентів СЧ (топології) ДНП-ПН на верхньому рівні доцільно класифікувати за критерієм наявності гальванічної розв'язки: *не ізолювані* та *ізолювані*.

2. Не ізолювані ДНП-ПН

Далі будуть розглянуті основні топології не ізолюваних ДНП-ПН. Буде визначено, в який спосіб топології ДНП-ПН отримуються з однонаправлених перетворювачів (ОНП) та як організовується та гарантується протікання струму в обидві сторони (від ЛПС до М-АКБ та від М-АКБ до ЛПС). Також буде зазначено, які переваги та недоліки має кожна топологія та їх типові застосування.

2.1. Каскадований понижуючий-підвищуючий ДНП-ПН

Найпростіші DC-DC перетворювачі, такі як понижуючий (англ. *Buck*), підвищуючий (англ. *Boost*) та понижуючий-підвищуючий (англ. *Buck-Boost*), не мають властивостей двонаправленого перетворення енергії через наявність напівпровідникових діодів в складі їх СЧ, які не дозволяють струму протікати в напрямку, зворотному до штатного напрямку перетворення [4]. Тим не менш, майже всі топології ОНП можна перетворити на двонаправлені. Розглянемо, в який спосіб можна отримати одну із поширених топологій не ізолюваних ДНП-ПН – понижуючо-підвищуючу мостову схему (рис. 2, д).

Спочатку треба отримати двонаправлені схеми з однонаправлених – понижуючої (рис. 2, а) та підвищуючої (рис. 2, б) схем. Принцип наступний: діод заміщується на транзисторний ключ, отримується синхронний понижуючий (рис. 2, в) та синхронний підвищуючий (рис. 2, г) ДНП-ПН. Такі схеми ще називають півмостовими. Обидва перетворювачі мають властивості підвищення та пониження напруги, але змінити прив'язку коефіцієнта перетворення до сторони перетворення неможливо. Як видно з рис. 2, в, режим пониження напруги можливий лише в напрямку від ЛПС до М-АКБ, а режим підвищення лише від М-АКБ до ЛПС, тобто, ДНП працюватиме лише за умови $V_{bus} > V_{bat}$. У випадку на рис. 2, г напруга з ЛПС підвищується до напруги на М-АКБ, а пониження відбувається тільки у зворотному напрямку, тобто ДНП працюватиме лише за умови $V_{bus} < V_{bat}$.

Вирішенням вищеописаної проблеми може стати каскадування синхронних півмостових понижуючого та підвищуючого ДНП-ПН на спільній накопичуючій індуктивності L , внаслідок чого формується схема мостового неінвертуючого понижуючо-підвищуючого ДНП-ПН (рис. 2, д), який за рахунок чотирьох ключів Q_1 – Q_4 забезпечує не тільки двонаправлене протікання струму у схемі, а зберігає властивості як підвищення, так і пониження напруги для обох сторін.

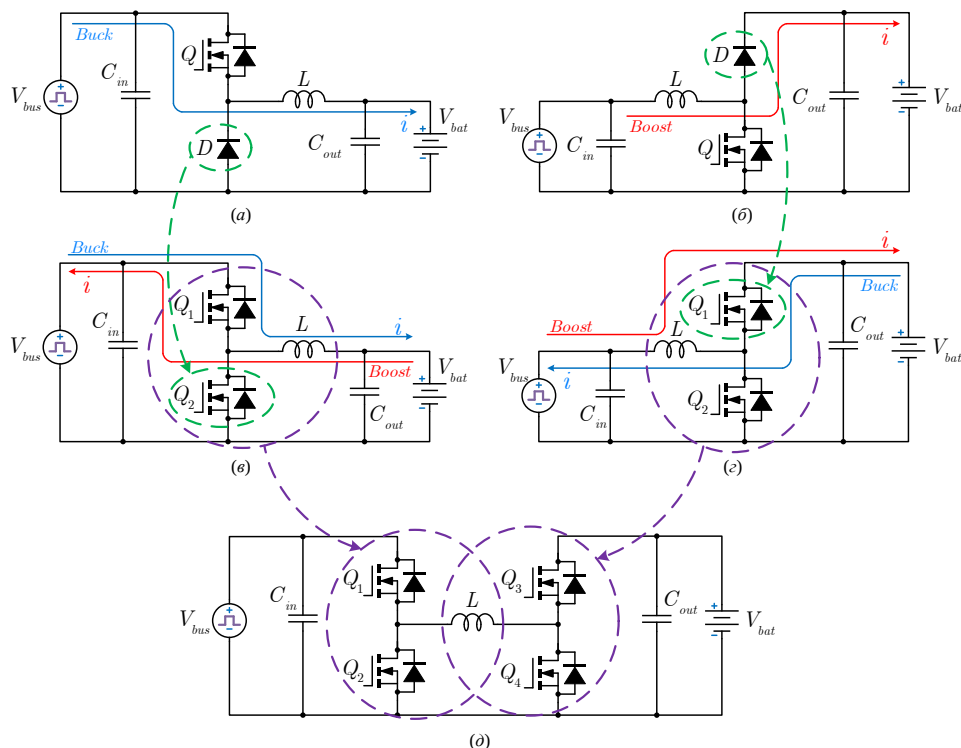


Рис. 2. Спосіб перетворення однонаправлених DC-DC перетворювачів у двонаправлені:

а – понижуючий ОНП-ПН; б – підвищуючий ОНП-ПН;

в – синхронний понижуючий ДНП-ПН; г – синхронний підвищуючий ДНП-ПН;

д – понижуючий-підвищуючий мостовий ДНП-ПН із чотирма ключами

Джерело: розроблено авторами.

Індуктивність L виконує роль накопичувача енергії та визначає динаміку зміни струму. Попри гнучкість та універсальність, головним недоліком схеми є наявність чотирьох ключів, два верхні з яких керуються відносно плаваючого рівня напруги, що значно ускладнює схемотехніку та алгоритм керування з жорстко визначеними комбінаціями керуючих сигналів для уникнення випадків короткого замикання. Наявність у ключах внутрішніх діодів збільшує втрати енергії від паразитних опорів та ємностей.

2.2. Інвертуючий понижуючий-підвищуючий ДНП-ПН

Інвертуючий понижуючий-підвищуючий ДНП-ПН (англ. *Buck-Boost Inverting*) (рис. 3) отримується з відповідного ОНП-ПН, шляхом заміщення діода D на транзисторний ключ Q_2 . У такій схемі, за рахунок керування двома ключами, з'являється можливість для протікання струму як з ЛПС до М-АКБ, так і у зворотному напрямку. Для протікання струму в напрямку від ЛПС до М-АКБ ключ Q_1 керується ШІМ-сигналом, а ключ Q_2 відкритий та пропускає струм далі для накопичення енергії в М-АКБ. У такому режимі схема працює як понижуючий ОНП, тобто, напруга з ЛПС понижується до необхідного значення напруги М-АКБ [5].

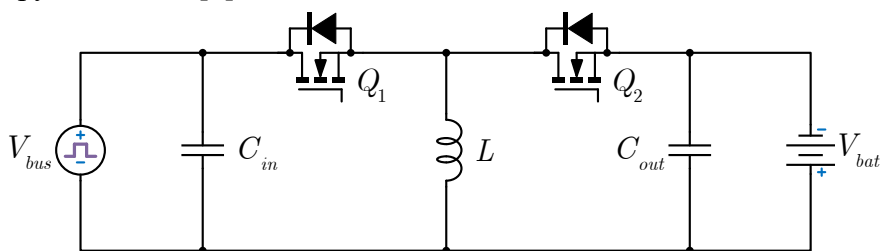


Рис. 3. Схема інвертуючого понижуючий-підвищуючий ДНП-ПН

Джерело: розроблено авторами.

Якщо оперувати ключами зворотнім чином: ключ Q_1 – відкритий, а ключ Q_2 – керується ШІМ-сигналом, то М-АКБ стає ДжЕ і струм протікає в бік ЛПС. За такого режиму комутації схема працює як підвищуючий ОНП, напруга з М-АКБ підвищується до необхідного значення напруги ЛПС. Через паралельний спосіб включення індуктивності L схема має інвертований вихід (полярність вихідної напруги протилежна до вхідної), що призводить до її обмеженого використання. Тим не менш, така особливість схеми корисна у системах балансування заряду окремих комірок АКБ шляхом перекачування енергії між ними.

2.3. Сук ДНП-ПН (рис. 4).

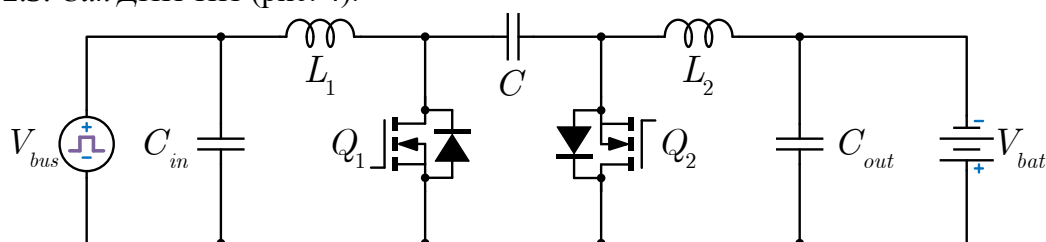


Рис. 4. Схема Сук ДНП-ПН

Джерело: розроблено авторами

Як можна побачити з рис. 4, це ще одна топологія, яка має інвертований вихід. Сук ДНП-ПН являє собою комбінацію послідовно з'єднаних підвищуючого та понижуючого перетворювачів з тією важливою особливістю, що розділяючий конденсатор C є накопичувачем енергії. Наявність розділяючого конденсатора призводить до того, що немає прямого шляху передачі енергії, передача відбувається тільки через перезарядження конденсатора C , що зменшує ефективність передачі енергії. Вихідна напруга може бути як вищою, так і нижчою за вхідну в обох напрямках перетворення. Вхідна та вихідна індуктивності у схемі L_1 та L_2 забезпечують режим неперервного струму та зменшують його пульсації. Індуктивності додатково можуть бути виконаними магнітно-зв'язаними для забезпечення менших вхідних та вихідних пульсацій струму. Через низький рівень пульсацій вихідного струму даний перетворювач порівняно з двома попередніми (інвертуючим та понижуючо-підвищуючим ДНП-ПН) є кращим варіантом для АСГ-ЕЕ, які містять іоністори як накопичувачі [7]. Незважаючи на те, що схема має інвертований вихід та не здатна до пропускання великих потужностей, все ж вона знаходить своє використання як балансер заряду комірок АКБ, у схемах для іоністорних батарей та для підтримки працездатності накопичувачів енергії [5].

Схема має три режими роботи: режим прямої передачі, режим зворотної передачі та змінний режим роботи. У випадку прямої передачі ключ Q_1 керується сигналом ШІМ, а ключ Q_2 відкритий і його діод працює як основний. В режимі зворотної передачі ключ Q_1 відкритий, а ключ Q_2 керується ШІМ-сигналом. В змінному режимі роботи ключ живлення та діод по черзі проводять струм під час циклу перемикавання, а результуючий напрямок передачі енергії залежить від середнього значення струмів на індуктивностях L_1 і L_2 [6]. Якщо середнє значення додатне, напрямок передачі здійснюється з боку V_{in} до боку V_{bat} , і навпаки.

2.4. SEPIC/ZETA ДНП-ПН

Для того, щоб вирішити проблему з інвертованим виходом в Сук ДНП-ПН, було створено SEPIC/ZETA ДНП-ПН шляхом обміну місцями елементів L_2 та Q_2 (рис. 5), що дозволило двічі інвертувати знак напруги й отримати не інвертований вихід. При прямому протіканні струму від ЛПС до М-АКБ перетворювач працює як SEPIC, у зворотному напрямку як ZETA. Як і в Сук ДНП-ПН, вихідна напруга може бути як вищою, так і нижчою за вхідну в обох напрямках перетворення.

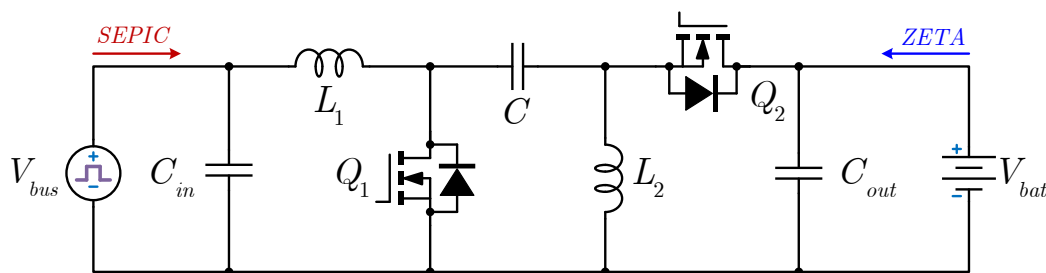


Рис. 5. Схема SEPIC/ZETA ДНП-ПН

Джерело: розроблено авторами.

Під час прямого режиму роботи SEPIC перетворювач працює як понижуюча схема: ключ Q_1 керується ШІМ, ключ Q_2 відкритий на час заряджання М-АКБ. У зворотному напрямку ZETA перетворювач працює на підвищення напруги: ключ Q_2 керується ШІМ, ключ Q_1 відкритий на час розряджання М-АКБ. Індуктивності L_1 та L_2 можуть бути виконаними магнітно-зв'язаними для зменшення пульсацій вхідного та вихідного струму.

2.5. ДНП-ПН з комутованою ємністю

ДНП-ПН по схемі з комутованою ємністю (англ. *Switched Capacitor*) знаходить своє використання у випадку, коли необхідно вбудувати перетворювач напруги в інтегральну мікросхему (ІМС), цьому сприяє відсутність індуктивностей та магнітних елементів. Структурно даний різновид ДНП-ПН побудований з конденсаторів та транзисторних ключів (рис. 6). Передача енергії здійснюється за рахунок циклічного перемикання груп конденсаторів між послідовним та паралельним з'єднанням між собою, а двонаправленість забезпечується зміною черговості перемикання ключів. Своєю чергою ІМС з таким ДНП-ПН мають значні проблеми такі, як: високі пульсації вхідного та вихідного струмів (через відсутність індуктивностей), що призводить до зростання рівня електромагнітних завад; обмежений топологією коефіцієнт перетворення напруги (визначається лише співвідношенням конфігурацій конденсаторів); слабка здатність до регулювання роботи схеми (складно балансувати напругу на конденсаторах). Більшість з цих проблем можна вирішити додавши схеми контролю за струмом та напругою, але це збільшить складність схеми та витрати. Даний перетворювач може бути використаний у складі ІМС для створення логічних рівнів інтерфейсів, балансування заряду комірок АКБ, живлення сенсорних вузлів, портативної електроніки.

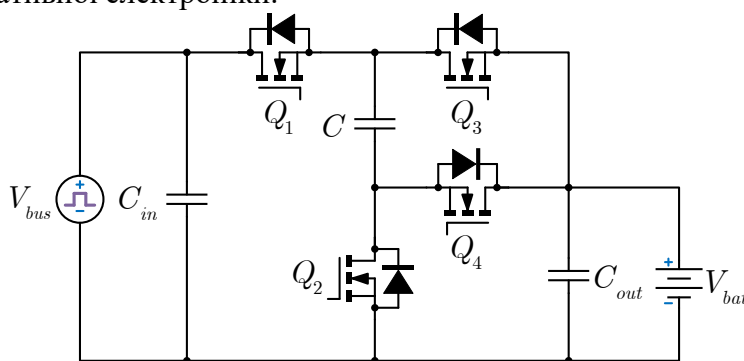


Рис. 6. Схема ДНП-ПН з комутованою ємністю

Джерело: розроблено авторами

2.6. ДНП-ПН з чергуванням фаз

Структура ДНП-ПН з чергуванням фаз (англ. *Interleaved*) передбачає паралельне поєднання двох або більше однотипних перетворювачів шляхом паралельного з'єднання їх накопичувальних індуктивностей. Наявність відносного фазового зсуву між сигналами

керування ($360^\circ/n$, де n – кількість паралельно з'єднаних перетворювачів) дозволяє зменшити сумарні пульсації струму, струмові навантаження на комутаційні елементи перетворювачів за допомогою різних методів шунтування (розділення струму I/n) [6]. До переваг можна віднести й вищий ККД, вищу масштабованість потужності та кращі теплові характеристики (менше втрат під час перемикання ключів). На рис. 7 зображено двофазний ДНП-ПН з чергуванням фаз. Як і у попередніх ДНП-ПН, які мали дві індуктивності у своєму складі, L_1 та L_2 можна виконати магнітно-зв'язаними, що дозволить реалізувати техніку «м'якого перемикавання». Втім, з переваг випливають і недоліки, такі як складність керування (необхідно забезпечувати фазову синхронізацію перемикання ключів), з більшою кількістю фаз зростає і кількість компонентів [8], необхідність модифікації схеми для досягнення високого коефіцієнта перетворення у випадку зв'язаних індуктивностей [9]. Такі перетворювачі знаходять своє використання в електротранспорті, гібридних системах накопичення енергії (HESS), гібридних інверторах.

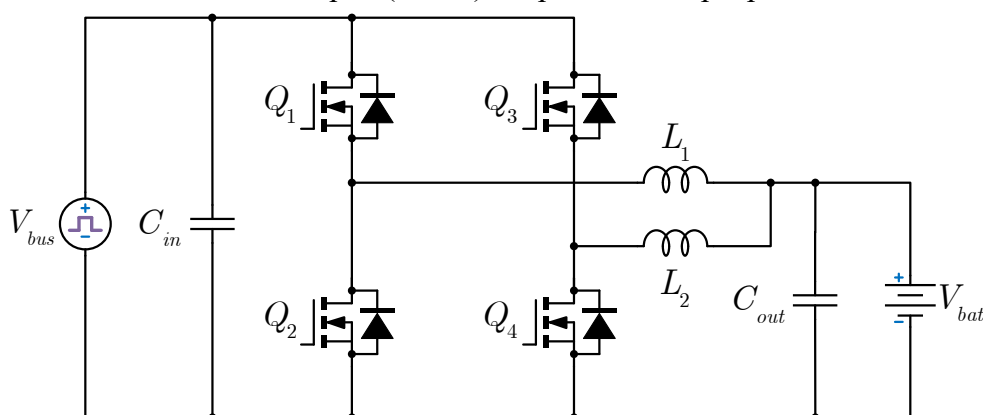


Рис. 7. Схема півмостового ДНП-ПН з паралельним чергуванням двох фаз.
Джерело: розроблено авторами.

3. Ізольовані ДНП

Принциповою відмінністю ізольованих (І-) ДНП-ПН є те, що СЧ розділена на дві сторони, – умовно “високовольтну” (англ. **High-voltage side**) та умовно “низьковольтну” (англ. **Low-voltage side**), які гальванічно розв’язані між собою за допомогою високочастотного силового трансформатора (ВЧ-СТр) (англ. **HF Power Transformer**). Таким чином, кожна зі сторін І-ДНП має свою окрему «землю», між якими може бути плаваюча різниця потенціалів (обмежена зверху напругою пробоя між обмотками ВЧ-СТр), що підвищує електробезпеку як окремих складових АСГ-ЕЕ, так і людини.

На рис. 8 зображено узагальнену функціональну схему І-ДНП-ПН, яка ілюструє основний принцип його роботи. Перетворення складається з кількох послідовних етапів, але проміжним завжди буде високочастотне перетворення напруги змінного струму на ВЧ-СТр. Спочатку вхідна напруга постійного струму V_{bus} перетворюється в високочастотну змінну напругу (ВЧ-ЗН) за допомогою перетворювача (англ. **DC/AC Converter**), яким найчастіше виступає напівмостовий або мостовий інвертор. Далі ВЧ-ЗН, часто проходячи перетворення на пасивних реактивних ланках, збуджує первинну обмотку ВЧ-СТр, де її амплітуда змінюється відповідно до коефіцієнта трансформації. На вторинній обмотці ВЧ-СТр наводиться трансформована ВЧ-ЗН та випрямляється за допомогою випрямляча (англ. **AC/DC Rectifier**), який може бути як пасивним, так і активним випрямлячем (АВ), і перетворюється у вихідну напругу постійного струму V_{bat} .

Розглянемо різновиди І-ДНП-ПН від базових топологій – зворотньоходової, двотактної та півмостової, в яких не забезпечується повне використання енергії ЛПС, до вдосконалених – подвійних мостових та сімейства резонансних.

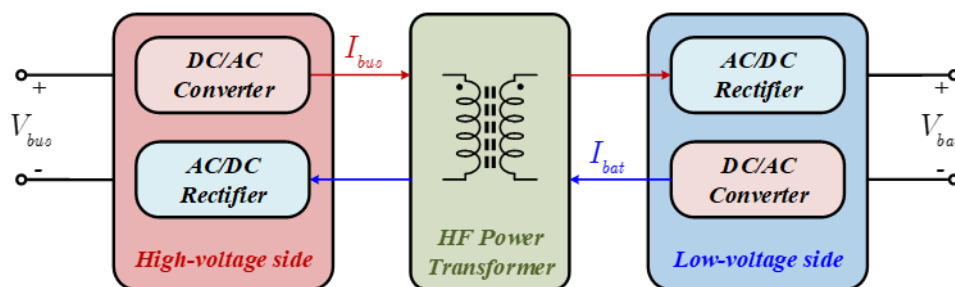


Рис. 8. Узагальнена функціональна схема ізолюваного ДНП

Джерело: розроблено авторами.

3.1. Зворотногоходовий ізолюваний ДНП-ПН

Перший різновид І-ДНП-ПН, який буде розглянуто, це зворотногоходовий (ЗХ-) І-ДНП-ПН (англ. *Flyback*) (рис. 9). Він формується з інвертуючого понижуючо-підвищуючого ДНП-ПН шляхом заміщення котушки індуктивності на ВЧ-СТр, обмотки якого включені зустрічно, що усуває інвертування виходу відносно входу. Коефіцієнт перетворення по напрузі ЗХ-І-ДНП-ПН за обраного напрямку перетворення визначається шляхом застосування вольт-секундного та заряд-секундного балансу, і відповідає коефіцієнту перетворення по напрузі однонаправленого ЗХ-перетворювача [7].

Для прямого потоку енергії ключ Q_2 працює в режимі АВ, а ключ Q_1 керується ШІМ. У такому випадку коли ключ Q_1 закритий, енергія з ЛПС накопичується в первинній обмотці ВЧ-СТр, при відкриванні ключа Q_1 накопичена енергія передається у вторинну обмотку ВЧ-СТр, і струм протікає до М-АКБ. Для реалізації зворотного потоку енергії ключ Q_1 працює в режимі АВ, а ключ Q_2 керується ШІМ. При перемиканні напрямку перетворення необхідно забезпечити безпечний активний скид магнітного потоку з ВЧ-СТр, що реалізується методикою розрахунку ВЧ-СТр та обов'язковим додаванням демпфера напруги для контролю струму витoku паразитної індуктивності розсіювання [7]. Без демпфірування (англ. *Active/Passive Clamp*) ВЧ-СТр у випадку великої магнітної індукції та імпульсних струмів може викликати великі завади та надвисокі імпульсні напруги закривання ключів. Схеми обмеження напруги для усунення проблем від паразитної індуктивності запропоновані у [11], [12], [13]. Вихідна напруга може бути як вищою, так і нижчою за вхідну, що грубо задається співвідношенням числа витків обмоток ВЧ-СТр, а плавно – режимом керування ключами.

З очевидних переваг зворотногоходового ДНП-ПН: проста будова з невеликою кількістю елементів, що має наслідком дешевизну; просте керування – лише два ключі, кожний відносно власної землі. З недоліків головними є: низька щільність потужності, при великих потужностях падає ККД перетворення, також наявні великі високочастотні пульсації струму. Зазвичай такий різновид ДНП-ПН знаходить своє використання у зарядних пристроях малої-середньої потужності (до 150-200 Вт), ізолювані блоки живлення побутової техніки з функцією заряджання АКБ.

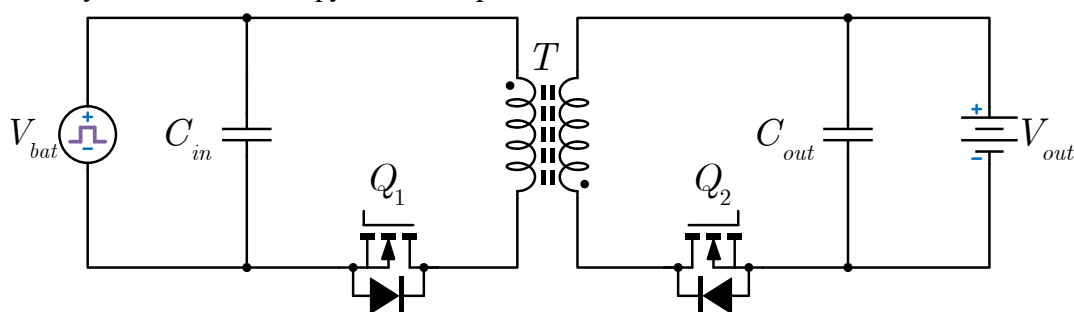


Рис. 9. Схема Flyback ДНП

Джерело: розроблено авторами.

3.2 Двотактний ізолюваний ДНП-ПН

Двотактний (ДТ-) І-ДНП-ПН (англ. *Push-Pull*) (рис. 10) отримується з двотактного ОНП шляхом заміни напівпровідникових діодів на вторинній обмотці на транзисторні ключі, що дозволяє отримати симетричний відносно ВЧ-СТр перетворювач та прокачувати енергію в обох напрямках застосовуючи один і той самий алгоритм комутації ключів.

Даний різновид ДНП-ПН дозволяє отримати режим неперервного струму на обох сторонах обміну (оскільки один з ключів завжди відкритий і струм протікає через обмотку ВЧ-СТр), а зменшити його пульсації допомагає дросель L_f та конденсатори C_{in} та C_f . Також топологія ДТ-І-ДНП-ПН має значно вищий коефіцієнт використання ВЧ-СТр та може працювати з більшими потужностями, ніж ЗХ-І-ДНП-ПН, а неконтрольованому зростанню переданої енергії запобігає насичення ВЧ-СТр. Базовий коефіцієнт перетворення по напрузі визначається співвідношенням між кількістю витків первинної та вторинної обмотки ВЧ-СТр, за зміни напрямку перетворення коефіцієнт стає оберненим до себе числом.

Наявність паразитної індуктивності розсіювання в ВЧ-СТр спричиняє підвищення стресу по струму та напрузі на ключах, що обмежує використання цієї топології для високовольтних застосувань. Індуктивність L введена для згладжування пульсацій струму. Використовується ДТ-І-ДНП-ПН в перетворювачах ЕЕ середньої потужності (до 1000 Вт).

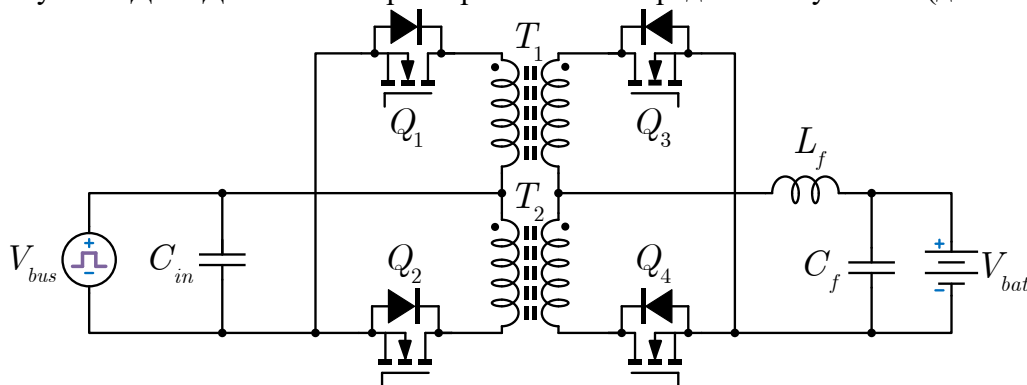


Рис. 10. Схема двотактного ізолюваного ДНП-ПН

Джерело: розроблено авторами.

3.3. Напівмостовий ізолюваний ДНП-ПН

Схема напівмостового (ПМ-) І-ДНП-ПН (англ. *Half-Bridge*) містить дві напівмостові схеми, які розв'язані ВЧ-СТр між собою (рис. 11). Напівмостова схема на стороні ЛПС є умовно «високовольтною», а схема на стороні М-АКБ – умовно «низьковольтною». Котушка індуктивності L зазвичай розташовується на «низьковольтній» стороні. Як видно з рис. 11, кожен з ключів Q_1 – Q_4 має не тільки паралельний діод, але і невелику ємність C_r для забезпечення «м'якого перемикавання». Кількість переданої енергії визначається зсувом фаз між напругами змінного струму на первинній та вторинній обмотці ВЧ-СТр. Пари конденсаторів C_1 , C_2 та C_3 , C_4 формують ємнісні ділянки напруги шляхом підключення контакту первинної та вторинної обмотки ВЧ-СТр до середньої точки ємнісних ділянок. У цій топології стреси по напрузі на ключах є вдвічі більшим за вхідну напругу ($V_{hv-stress} = 2V_{bus}$, $V_{lv-stress} = 2V_{bat}$), а стрес по струму не перевищує струм навантаження I_{ac} [19].

Звідси сумарна електрична потужність (TDR – total device rating) буде дорівнювати $TDR_{hb} = (2V_{dc}) \times I_{ac} \times 2(\text{ключів}) = 4 \times P_o$. Ця топологія І-ДНП-ПН знаходить своє використання у АСГ-ЕЕ середньої потужності, оскільки забезпечує компроміс між ефективністю, вартістю та складністю керування. Головним недоліком цієї схеми є те, що піковий струм навантаження протікає через конденсатори в ємнісних ділянках напруги [20].

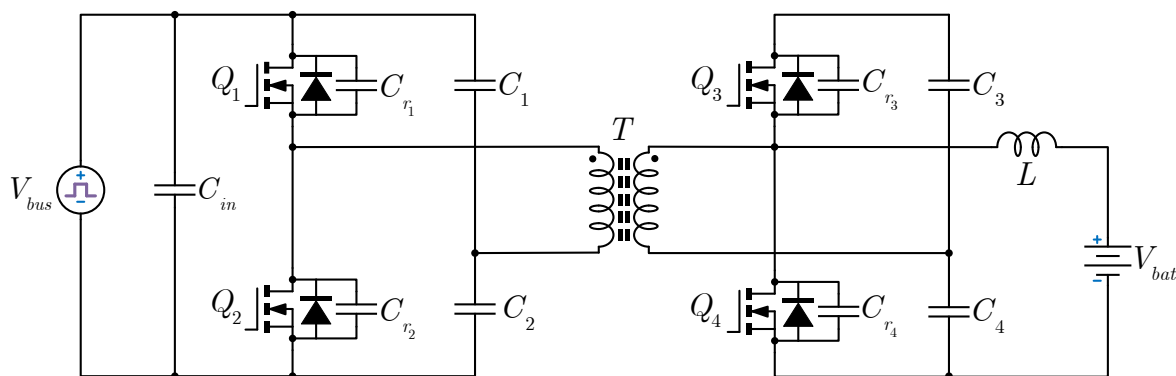


Рис. 11. Схема напівмостового ізолюваного ДНП-ПН з «м'яким перемиканням»
Джерело: розроблено авторами.

3.4. Dual Active Bridge ДНП-ПН

Одна з найбільш використовуваних топологій ізолюваних ДНП, – подвійний активний мостовий (ПАМ)-І-ДНП-ПН (англ. *Dual Active (Full-)Bridge, DAB*), – має лаконічну та просту структуру, яка зображена на рис. 12. Силова частина ПАМ-І-ДНП-ПН включає дві повномостових інверторних схеми, які розв'язані між собою ВЧ-СТр. Наявність з обох сторін перетворення чотирьох ключів та повного керування ними дозволяє прикладати до обох обмоток ВЧ-СТр повну напругу ЛПС або М-АКБ та інвертувати її знак, що має наслідком протікання струму в обох напрямках.

Напрямок передачі енергії залежить від кута зсуву фаз напруги між первинною та вторинною обмотками ВЧ-СТр. Коли напруга на первинній обмотці випереджає по фазі напругу на вторинній, енергія передається від мосту Q_1-Q_4 до мосту Q_5-Q_8 [17]. Якщо ж на первинній обмотці напруга затримується по фазі відносно вторинної, то струм протікає у зворотному напрямі. Очевидно, що на відміну від ПМ-І-ДНП-ПН, ПАМ-І-ДНП-ПН має в половину менший стрес по напрузі на ключах ($V_{hv-stress} = V_{bus}$, $V_{lv-stress} = V_{bat}$), а стрес по струму дорівнює струму навантаження I_{ac} . Тоді TDR для ПАМ-ДНП-ПН буде мати таке значення $TDR_{fb} = V_{dc} \times I_{ac} \times 4(\text{ключів}) = 4 \times P_o$.

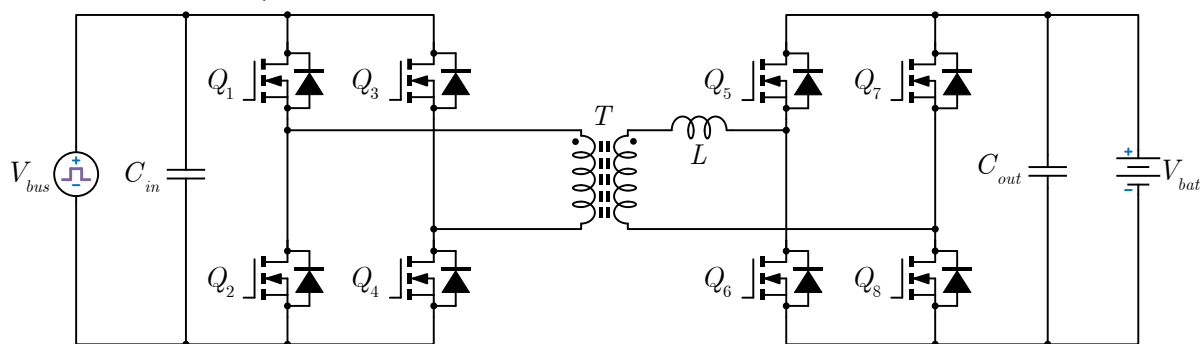


Рис. 12. Схема ПАМ-І-ДНП-ПН

Джерело: розроблено авторами.

При передачі енергії в напрямку від ЛПС до М-АКБ на стороні первинної обмотки ВЧ-СТр маємо міст Q_1-Q_4 , який у режимі інвертора забезпечує протікання струму через первинну обмотку. На стороні вторинної обмотки генерується змінна напруга, яку міст Q_5-Q_8 , працюючи в режимі активного випрямляча (АВ) та регулятора, приводить до напруги постійного струму для заряджання М-АКБ. Аналогічно забезпечується зворотне протікання струму від М-АКБ до ЛПС, зі зміною режимів роботи мостів Q_5-Q_8 – інвертор, Q_1-Q_4 – активний випрямляч. Ключі керуються за допомогою фазового зсуву з «м'яким перемиканням».

Котушка L відіграє важливу роль у схемі, її можуть розташовувати як на стороні моста “низької напруги”, так і “високої”, або з обох боків у високоефективних версіях [18]. Але частіше її встановлюють на стороні “низької напруги” через кращу динаміку керування при зміні кута фазового зсуву (φ). Дана індуктивність виконує наступні функції: обмежує імпульсні струми при зміні фази керування; забезпечує «м'яке перемикавання» при нульовій напрузі (англ. *Zero Voltage Switch, ZVS*); визначає кут фазового зсуву φ між двома змінними напругами, що регулює передану потужність; у системах з М-АКБ дозволяє зменшити втрати при частих циклах заряду-розряду. Кут фазового зсуву φ є ключовим параметром для визначення напрямку та кількості енергії, що передається між сторонами обміну постійного струму [7], [14].

Ключовими перевагами ПАМ-І-ДНП-ПН є мінімальне використання пасивних компонентів; можливість організації різних умов «м'якого перемикавання» – *ZVS* та перемикавання при нульовому струмі (англ. *Zero Current Switch, ZCS*), що дозволяє зменшити втрати на ключах; широкий діапазон перетворюваних напруг; висока щільність потужності (добре підходить для застосувань у високовольтних системах). Окремо зазначимо, що здатність до реалізації умови комутації *ZVS* відкриває можливість для застосування вдосконалених технік модуляції [15]. До недоліків варто віднести наступні: виникнення значних RMS-струмів як у вхідному, так і вихідному конденсаторі; неможливість досягнути «м'якого перемикавання» у випадку прокачки малої потужності, що значно зменшує ККД ненавантаженого ПАМ-І-ДНП-ПН; наявність великої кількості ключів ускладнює керування (потрібно точно і синхронно перемикати), а також окремо жити верхні ключі; лімітований діапазон *ZVS* та наявність *циркулюючих струмів* [16].

3.5 Резонансні ізольовані ДНП-ПН

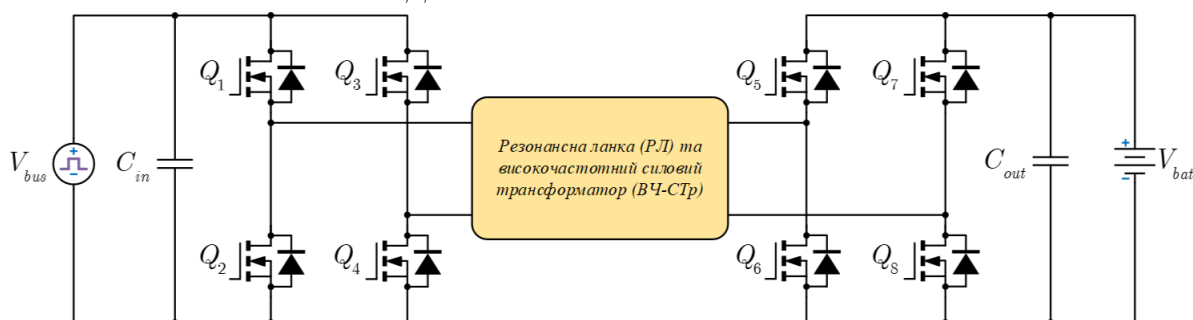


Рис. 14. Узагальнена схема резонансного ізольованого ДНП-ПН

Джерело: розроблено авторами.

Різновид резонансних ізольованих (PI-) ДНП-ПН включає в себе сімейство схем із різними топологіями резонансних ланок, а загальна схема такого перетворювача зображена на рис. 14. В даному дослідженні резонансна ланка (РЛ) – сукупність реактивних елементів, що утворює один або більше резонансних контурів (РК) між каскадом ключів та ВЧ-СТр на розділі сторін перетворення в PI-ДНП-ПН. Важливою особливістю всіх PI-ДНП-ПН є здатність до високоефективного двостороннього перетворення енергії з низьким рівнем електромагнітних завад та втрат на ключах [10].

Враховуючи значну кількість варіацій РЛ (рис. 15), далі будемо аналізувати роботу PI-ДНП-ПН саме в розрізі впливу схем РЛ на їх роботу, бо інші компоненти схеми будуть незмінними. Поклавши за основу для огляду класифікацію РЛ за критерієм кількості елементів в ній, взято по дві схеми для кожного різновиду РЛ (рис. 15) [23]. Для двоелементної РЛ маємо послідовну резонансну ланку (*ПосРЛ*) (рис. 15, а) та паралельну резонансну ланку (*ПарРЛ*) (рис. 15, б). Для трьохелементної РЛ отримаємо *LCC РЛ* (рис. 15, в) та *LLC РЛ* (рис. 15, г), багатоелементні РЛ – *CLLC РЛ* (рис. 15, д) та *CLLLC РЛ*

(рис. 15, е). Загалом, ускладнення схем РЛ шляхом збільшення кількості реактивних компонентів зумовлене тим, щоб: нівелювати недоліки більш простих РЛ та покращити їх характеристики за специфічних режимів роботи та характеру навантаження, підвищити ККД перетворення, розширити діапазон робочих напруг, а також для можливості роботи в складі систем середньої та великої потужності.

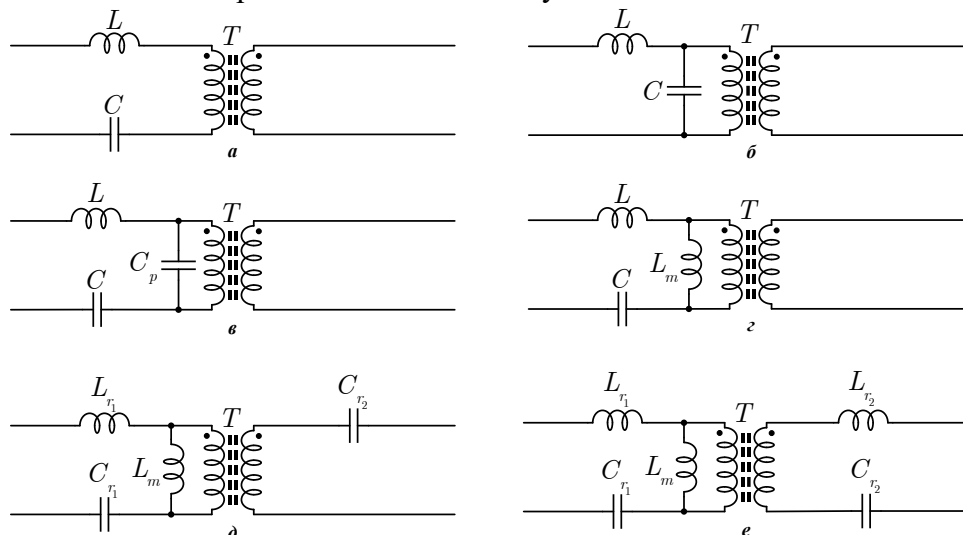


Рис. 15. Варіанти РЛ для PI-ДНП-ПН:

а – ПосРЛ; б – ПарРЛ; в – LCC РЛ; г – LLC РЛ; д – CLLC РЛ; е – CLLLC РЛ

Джерело: розроблено авторами

Розглянемо перший різновид – ПосРЛ, яка сформована послідовним LC-контуром (рис. 15, а). У спрощеному виконанні така РЛ може бути з'єднана з вихідною схемою через випрямляч (без використання трансформатора). У такому випадку на резонансній частоті за низького навантаження, імпеданс цього навантаження стане дуже великим відносно імпедансу РЛ, отже (за законом дільника напруги), вся вхідна напруга прикладеться до навантаження, що зробить майже неможливим процес регулювання виходу [21]. Якщо ключі перетворювача працюють на частоті меншій за частоту резонансу РЛ, то перетворювач буде оперувати в умовах ZCS як підвищуючий. Якщо частота перемикавання ключів більша за частоту резонансу РЛ, то перетворювач буде оперувати в режимі ZVS як понижуючий. Таким чином, коефіцієнт перетворення залежить від співвідношення між частотою комутації ключів та частотою резонансу РЛ, що обмежує діапазон вхідних напруг. Тому використання височастотного трансформатора дозволяє нівелювати перераховані обмеження, забезпечити ширший діапазон ZVS та збільшити коефіцієнт перетворення вихідної напруги [22], а конденсатор РЛ стає розділюючим – забезпечує збудження трансформатора лише змінною напругою. Порівняно з більш складними РЛ для PI-ДНП-ПН (CLLC, CLLLC), в схемі з ПосРЛ діапазон «м'якого перемикавання» є доволі вузьким. До переваг можна віднести низький рівень стресу за струмом ключів, та відносно просту САК.

ПарРЛ сформована паралельним LC-контуром (рис. 15, б), що робить перетворювач здатним до регулювання вихідної напруги за низького навантаження або взагалі його відсутності, що вирішує проблему ПосРЛ, а також зменшує пульсації вихідного струму. Одночасно ця топологія має і свої недоліки у вигляді стрімкого зростання величини *циркулюючого (такого, що перезаряджає реактивні компоненти) струму* разом зі збільшенням вхідної напруги [23], що своєю чергою підвищує втрати на ключах та зменшує ККД перетворювача. Другою неочевидною проблемою є відсутність розділюючого кон-

денсатора між ключами та трансформатором, що може спричинити появу постійної складової струму трансформатора і його підмагнічування. Дана РЛ забезпечує режим ZVS за частоти комутації вищої за резонансну та з діапазоном налаштування «м'якого перемикавання» ширшим, ніж у ПосРЛ. У випадку пульсацій вихідної напруги можна додатково підняти частоту комутації ключів.

Для усунення головних недоліків ПосРЛ та ПарРЛ та об'єднання їх переваг до дво-елементних схем додають третій елемент – котушку або конденсатор. Таким чином, утворена LLC РЛ складається з комбінацій двох котушок та одного конденсатора, а CCL РЛ складається з двох конденсаторів та котушки. Кількість можливих комбінацій розташування компонентів у триелементних РЛ становить 36, але до роботи в резонансі здатні тільки 26 з них [23]. Представлені на рис. 15 варіанти схем LLC РЛ та CCL РЛ є найпоширенішими в проаналізованих роботах.

На рис. 15, в представлено послідовно-паралельну РЛ, або – CCL РЛ, адже з боку первинної обмотки ВЧ-СТр вона поєднує властивості ПосРЛ та ПарРЛ. Дана РЛ вирішує проблему ПосРЛ – дозволяє регулювати вихідну напругу за низького навантаження і при цьому, на відміну від ПарРЛ, відсутні великі *циркулюючі струми*. Це досягається шляхом правильного розрахунку реактивних компонентів. Наприклад, для регулювання вихідної напруги за відсутності навантаження необхідно, щоб номінал конденсатора C_p був більшим за мінімально розрахований [23], також розраховуються і номінали елементів для забезпечення перемикавання за умов ZVS та ZCS, що зменшує стреси на ключах [25]. Цікавим є підхід, за якого у *високовольтних* РІ-ДНП-ПН за деякі елементи CCL РЛ беруть паразитну індуктивність та ємність самого ВЧ-СТр, які в таких застосуваннях є габаритними пристроями та мають велику кількість витків в обмотках, у яких виникають значні паразитні складові, що утворюють паралельний LC-контур [24]. Тому для формування CCL РЛ у такому випадку достатньо розрахувати та додати до габаритного ВЧ-СТр лише послідовну ємність, що зменшить кількість компонентів в схемі. До недоліків даної РЛ відносять те, що у випадку розриву на частоті, близькій до резонансної частоти ПосРЛ, та у випадку короткого замикання на частоті, близькій до частоти ПарРЛ [7] створюється аварійний та руйнівний режим роботи.

Аналізуючи роботи, у яких використовується LLC РЛ (рис. 15, з), впливає, що вона має аналогічний до CCL РЛ недолік, а саме – небезпечний стан схеми у випадку розриву або короткого замикання в РЛ. Інший недолік – виникнення великої кількості гармонік струму у випадку, коли частота перемикавання ключів відхиляється від резонансної частоти [26]. Але найбільшим недоліком такої РЛ є те, що вона не симетрична і зворотний режим роботи відрізняється від прямого режиму. У прямому режимі, залежно від співвідношення частоти комутації до частоти резонансу, коефіцієнт перетворення має як підвищуючі, так і понижуючі значення, а в зворотному режимі – тільки понижуючі. Це робить схему складною для регулювання. До переваг можна віднести те, що РІ-ДНП-ПН з даною РЛ може регулювати вихідну напругу від нуля до номінального максимуму з відносно невеликим кроком зміни частоти комутації ключів, для будь-якої величини навантаження, включаючи його відсутність [23], а також має низькі *циркулюючі струми*, та малі втрати на ключах за рахунок режимів ZVS та ZCS.

Схема з CLLC РЛ (рис. 15, д) частково вирішує проблеми притаманні для LLC РЛ і покращує регулювання напруги та проблеми з «м'яким перемиканням», що виникають при зворотному режимі роботи. Така топологія РЛ дозволяє реалізувати «м'яке перемикавання» для широкого діапазону навантаження з точним регулюванням напруги незалежно від напрямку перетворення. Втім, несиметричність схеми РЛ відносно трансформатора призводить до складнощів в керуванні залежно від напрямку перетворення [10], оскільки характеристики (криві) резонансу та коефіцієнту перетворення мають різний вигляд. Всіх вищеописаних недоліків позбавлена наступна схема РЛ, яка є симетричною.

Схема з CLLC РЛ (рис. 15, е), як було зазначено вище, є симетричною і завдяки цьому для застосування у складі ДНП незалежно від напрямку перетворення має схожі характеристики резонансної частоти та коефіцієнта перетворення (може підвищувати та знижувати напругу в обидві сторони) [28]. У випадку роботи в режимі підвищення напруги використовується керування шляхом зміни частоти, а коефіцієнт перетворення визначається співвідношенням частоти комутації до частоти резонансу. Коли необхідно забезпечити режим пониження напруги, то використовується керування шляхом фазового зсуву, а коефіцієнт перетворення визначається кутом цього фазового зсуву [27]. Все це дозволяє вдало реалізувати умови для ZVS та ZCS і значно зменшити комутаційні втрати. Недоліком є те, що дана схема потребує більш складного алгоритму керування та більшу кількість компонентів, що призводить до збільшення масогабаритних показників та здорожчання виробу.

3.6. Методика вибору РЛ для РІ-ДНП-ПН

Критерії вибору топології РЛ для РІ-ДНП-ПН можна сформулювати таким чином:

1) *Залежно від типу ДжЕ (або, з урахуванням двонаправленості, споживача) з того боку, де встановлюватимуть резонансну ланку.*

За цим критерієм ДжЕ може вважатись або джерелом напруги (ДжН, англ. *Voltage Source*), якщо його номінальна напруга підтримується сталою в межах певного діапазону споживаних струмів, або джерелом струму (ДжС, англ. *Current Source*), якщо його номінальний струм підтримується сталим шляхом генерації напруг у межах певного діапазону. До ДжН відноситься більшість хімічних накопичувачів енергії (АКБ) та механіко-електричні ДжЕ (генератори). А от до ДжС відносяться ФЕП (на більшій частині ділянки ВАХ, за низькоомного навантаження) та термоелектричні ДжЕ (елементи Пельтьє). Відповідно до визначеного типу ДжЕ РІ-ДНП-ПН можуть бути сконфігурованими як такі, що живляться (ведені) джерелом напруги або як такі, що живляться (ведені) джерелом струму, при цьому елементи РЛ розміщуються таким чином [23], щоб:

- **для веденого джерелом напруги** – вилучення всіх індуктивностей та закорочування всіх ємностей в РЛ призводить до її перетворення *на розрив*;

- **для веденого джерелом струму** – вилучення всіх індуктивностей та закорочування всіх ємностей в РЛ призводить до її перетворення *на закоротку*.

2) *Залежно від топології розміщення елементів РЛ, що впливають на форму АЧХ РЛ.*

За представлення РЛ у вигляді чотириполюсника, елементи РЛ утворюють між входом та виходом з'єднання за топологією Г-типу, П-типу або Т-типу. При цьому кожна з гілок зазначених топологій може містити як один окремий реактивний елемент, так і послідовний РК або паралельний РК. В результаті цього РЛ починає функціонувати в режимі одного зі стандартних фільтрів: нижніх частот, верхніх частот, смугопропускаючого або смугоподавляючого.

3) *Залежно від кількості реактивних елементів РЛ.*

Введення додаткових реактивних елементів до складу існуючої РЛ може змінювати як форму АЧХ, додаючи нові точки перегину і тим самим підвищуючи складність поведінки РЛ стосовно системи керування, або ж не змінювати існуючу форму АЧХ, а лише підвищувати її крутизну, тим самим покращуючи частотно-селективні властивості РЛ (підвищуючи добротність). Саме другий варіант нарощування порядку РЛ частіше використовується на практиці через його відносну простоту опису та передбачуваність результату.

Не зважаючи на вищезазначені рекомендації, після синтезу РЛ для з'ясування її фактичних характеристик та особливостей роботи необхідно виконати моделювання її АЧХ та ФЧХ як по напрузі, так і по струму. Це пов'язано з тим, що фундаментально до схеми прикладається напруга і АЧХ описує закон зміни її амплітуди залежно від частоти, а от зв'язок між амплітудою прикладеної напруги та амплітудою протікаючого струму описується законом Ома і залежить від імпедансу як джерела живлення, так і приведенного навантаження, а також від способу включення РЛ та навантаження між собою.

4. Багатонаправлені (багатопортові) ДНП-ПН

У випадках, коли АЕМ складається з декількох ДЖЕ (вітряки, гібридні ФЕП, М-ФЕП, паливний елемент), накопичувачі (АКБ, іоністори) можуть використовуватися кілька перетворювачів напруги для кожного з цих компонентів, що призводить до збільшення вартості системи, зниженню ККД всієї системи через збільшення числа стадій перетворення. Багатонаправлені (інша поширена назва “багатопортові”) перетворювачі (БНП) мають здатність керувати величинами і напрямками потоків енергії між декількома сторонами (портами) обміну, кожна з яких може бути як ДЖЕ, так і накопичувачем або навантаженням. БНП-ПН забезпечують меншу вартість системи, більшу щільність потужності та більш компактні розміри, а також вищий ККД перетворення.

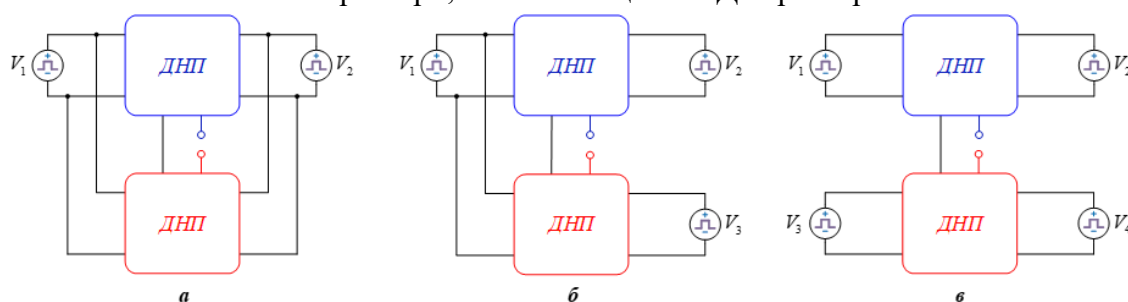


Рис. 16. Варіанти з'єднання двох ДНП-ПН:

а – паралельне з'єднання; б – спільний один із портів; в – спільний термінал
Джерело: розроблено авторами.

Найпростішим варіантом реалізації БНП-ПН є поєднання двох не ізолюваних ДНП-ПН між собою [29]: паралельним з'єднанням для обох портів (рис. 16, а); спільним з'єднанням одним портом – трипортовий БНП-ПН (рис. 16, б); одним спільним терміналом між двома ДНП-ПН – чотирипортовий БНП-ПН (рис. 16, в). Якщо кожен порт на рис. 16 прийняти як ДЖЕ, а по одному вільному терміналу підключити до середньої точки (або фази) півмоста ізолюваного перетворювача, у такому випадку це плечі ПАМ-І-ДНП-ПН, утворюється схема *гібридного* БНП, яка реалізує неізолюване двонаправлене перетворення між всіма портами ДЖЕ та ізолюване двонаправлене перетворення для порту на вторинній обмотці ВЧ-СТр з активним навантаженням. На основі ПАМ-І-ДНП-ПН, на рис. 17 зображено приклад реалізації гібридних не ізолюваних – трипортового (рис. 17, а), чотирипортового (рис. 17, б) та п'ятипортового БНП-ПН (рис. 17, в).

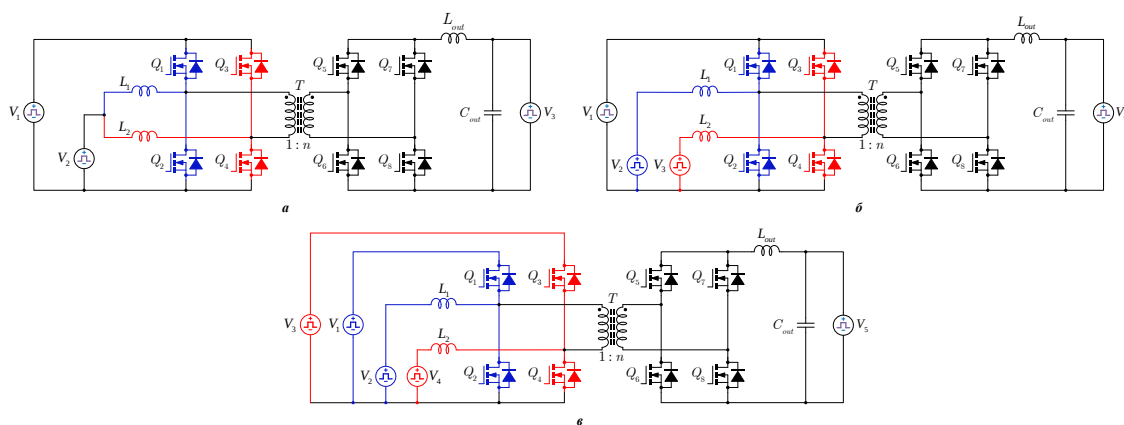


Рис. 17. Багатопортові гібридні не ізолювані ДНП-ПН:

а – три порти; б – чотири порти; в – п'ять портів
Джерело: розроблено авторами.

Наступний варіант синтезу БНП-ПН полягає у використанні в складі існуючих топологій І-ДНП-ПН “розщепленого” ВЧ-СТр – такого, що має більше двох обмоток. В результаті отримується ізольоване двонаправлене перетворення між усіма портами, зберігаючи при цьому всі переваги І-ДНП-ПН [30]. В більшості проаналізованих робіт такі БНП синтезують на основі ПМ-І-ДНП-ПН, ПАМ-І-ДНП-ПН або ж РІ-ДНП-ПН. На рис. 18 представлено трипортовий ПМ-І-БНП-ПН (рис. 18, а) та трипортовий РІ-БНП-ПН з *ПосРЛ* на 2 сторонах з 3 (рис. 18, б).

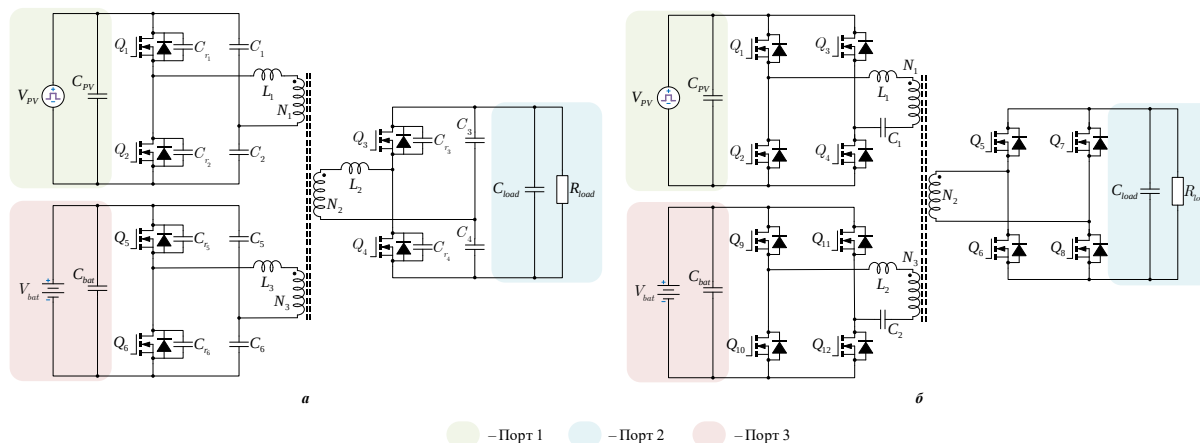


Рис. 18. Трипортові ізольовані БНП з розщепленим трансформатором:
а – півмостовий БНП; б – резонансний мостовий БНП

Джерело: розроблено авторами.

До переваг І-БНП-ПН з розщепленим трансформатором можна віднести гальванічну ізольованість та двонаправленість перетворення між усіма парами портів, а також широкі можливості для реалізації «м'якого перемикачання» (ZVC або ZVS). Всі недоліки, які притаманні І-ДНП-ПН нівелюються їх перевагами у випадку розширення до І-БНП-ПН, хоч і за рахунок складнішого керування та більш габаритної схеми, але роз'язка між собою трьох або більше сторін обміну в АСГ-ЕЕ стає вищим пріоритетом для надійності та безпеки.

5. Способи підвищення обсягів передаваної енергії в ДНП-ПН

Питання збільшення обсягів передаваної енергії в ДНП-ПН є важливим в контексті АСГ-ЕЕ, які з часом вимагають масштабування зі збереженням високого ККД та стабільності вхідних/вихідних напруг. Збільшення прокачуваної потужності досягається за рахунок підвищення протікаючого струму, або робочої вхідної, або робочої вихідної напруг. Разом з підвищенням хоч одного з параметрів ЕЕ зростає й стрес по струму та/або напрузі на компонентах СЧ перетворювача, що збільшує втрати на перетворення та габарити цих компонентів. Тому, основним методом досягнення підвищеної потужності є *розпаралелювання потоків енергії*, яке дозволяє зменшити напруженість на компонентах, зберігаючи при цьому високий ККД. Розпаралелювання потоків енергії відбувається за рахунок багатоканальних схем з чергуванням фаз та/або магніто-зв'язаних індуктивностей, а також відповідних алгоритмів чергування фаз. Далі розглянемо вищеописані підходи окремо по черзі.

5.1. Підвищення протікаючого струму

З попередніх розділів, в яких розглядалися топології ДНП, великі протікаючі струми могли виникати у деяких із них через ефекти циркуляції, що визначалося як недолік через збільшення стресу по струму та його пульсацій на компонентах схеми. Наразі буде розглянуто, яким чином можна досягти цього підвищення, нівелюючи пов'язані з цим недоліки, та зберегти високий ККД перетворення.

Багатосекційність – найпростіше рішення для збільшення загальної потужності шляхом каскадування менш потужних перетворювачів за принципом “паралельний вхід – паралельний вихід” (англ. *Parallel Input – Parallel Output*, PIPO). У такому разі у визначеному режимі перетворення входи паралельних секцій мають спільне джерело, енергія якого перетворюється у кожному модулі окремо, а паралельні виходи сумують між собою струми, що дозволяє отримати вище значення вихідного струму, ніж може видати один модуль. Важливим аспектом є стійкість керування багатосекційної системи, за відсутності якої виникнуть субгармонійні коливання виходу. Для уникнення цього сигнали керування повинні бути взаємно синхронізовані між окремими модулями, або встановлено спеціальні розв'язуючі фільтри. Варто зазначити, що багатосекційний перетворювач за принципом PIPO має високу надійність: у випадку виходу з ладу одного модуля, інші будуть працювати далі. Під час огляду не ізольованих ДНП було розглянуто схему з чергуванням фаз (рис. 7), що і є одним із варіантів підвищення протікаючого струму шляхом рівномірного розподілення його між декількома секціями перетворення, що працюють в одному періоді почергово зсувом фаз [33]. Додатково чергування фаз дозволяє зменшити пульсації вхідного/вихідного струму, що в свою чергу зменшує й номінали елементів вихідного фільтра.

Топології ДНП-ПН (CUC, SEPIC, ZETA), які мають дві або більше індуктивностей, як також зазначалось вище, вдосконалюють використанням магнітно-зв'язаних індуктивностей замість окремих елементів. Обмотки котушок СЧ певним чином (синфазно або протифазно) намотуються на спільне феромагнітне осердя. Це дозволяє додатково покращити характеристики перетворювача в контексті зниження пульсацій струму та покращити характеристики (підмагнічування, насичення) окремо виконаних індуктивностей [31; 33].

5.2. Підвищення робочої вхідної напруги

Високої потужності можна досягти за рахунок підвищення вхідної напруги, при цьому робочий струм лишається невеликим. Здатність ДНП оперувати з високовольтними ЛПС (ВВ-ЛПС) є важливим критерієм для побудови АСТ-ЕЕ. Маючи ВВ-ЛПС, наприклад 450В...800В, необхідно розуміти те, що такий рівень напруги може звужити номенклатуру використаних напівпровідникових ключів та призвести до стрімкого зростання динамічних втрат, що погіршить ККД перетворювача.

Найбільш ефективним методом роботи з ВВ-ЛПС це використання багаторівневих топологій інверторів (3-, 4-, n-рівневі). Наприклад, до 3-рівневих відносять інвертор з зафіксованою нейтраллю (англ. *Neutral Point Clamped*, NPC), інвертори з Т-подібною топологією (англ. *T-type Inverter*), до 4-рівневих – повномостові каскадовані топології (англ. *Cascaded H-Bridge*, CHB). Суть всіх багаторівневих топологій полягає в рівномірному розподілі високої вхідної напруги між кількома послідовно з'єднаними (у дільник напруги) ключами, що дає змогу підвищити робочу напругу ЛПС, при цьому не підвищуючи стрес по напрузі окремого ключа. Це в свою чергу дозволяє використовувати транзистори з меншою номінальною напругою стік-витік, які відповідно мають значно менший опір відкритого каналу $R_{DS(on)}$ та швидкодію по затвору – заряд Q_g та ємність C_{GS} . Зменшується й швидкість наростання напруги (dv/dt), що в свою чергу зменшує рівні завад. Також послідовно з'єднуються й конденсатори ЛПС, при цьому урівнювання напруги між ними може відбуватись пасивно, або активно – за допомогою балансувальних ключів, або шляхом включення ємностей у середні точки між послідовно з'єднаними ключами (англ. *Floating Capacitor*, FC).

Наступний з методів – використання декількох послідовних каскадів перетворення, між якими будуть розподілятися напруги та струми. Кожний із каскадів оптимізований під певний режим роботи (наприклад, стабілізація напруг у середніх точках ємнісних

дільників або напруги проміжної ЛПС) та виконує свою задачу (наприклад, підвищуючий або понижуючий стабілізатор, інвертор гальванічної розв'язки, або проміжна ЛПС між низьковольтним джерелом та ВВ-ЛПС).

В обох вищеописаних групах методів можна використовувати магнітно-зв'язані індуктивності, які не тільки допоможуть покращити характеристики струму, але й мінімізують напругу на ключах за високої вхідної напруги [32].

Використовуючи принцип з'єднання “послідовний вхід – паралельний вихід” (англ. *Series Input – Parallel Output, SIPO*) можна синтезувати багатосекційну топологію. У такому випадку вхідна висока напруга розподіляється між усіма модулями рівномірно ($V_{IN_m} = V_{IN} / n$, n – кількість модулів) [35], а паралельний вихід дозволяє отримати більший струм за рахунок складання вихідних струмів кожного модуля.

5.3. Підвищення робочої вихідної напруги

Способи підвищення вихідної напруги схожі до тих, що розглядалися для підвищення вхідної. Тут вихідна напруга формується як сума вихідних напруг за допомогою різних методів (каскадування або багатосекційність з послідовно з'єднаними виходами).

У випадку каскадування типовою є наступна архітектура: перший каскад – підвищуючий, або підвищуючий із чергуванням фаз, вихід якого формує проміжну ЛПС; другий каскад – багаторівневий інвертор. В такому разі отримаємо каскадований, але не ізольований ДНП-ПН. За потреби у гальванічній розв'язці в якості другого каскаду варто обрати ПАМ-І-ДНП-ПН, який має і гальванічно розв'язаний вихід і ВЧ-СТр у високовольтному виконанні забезпечуватиме додаткове остаточне підвищення напруги на виході.

У випадку багатосекційної топології, використовується принцип з'єднання “паралельний вхід – послідовний вихід” (англ. *Parallel Input – Series Output, PISO*), де загальна вихідна напруга перетворювача являє собою суму вихідних напруг кожної окремої секції [34]. Магніто-зв'язані індуктивності за допомогою послідовного з'єднання вторинних обмоток індукторів з виходом перетворювача або з іншими фазами дозволяють складати напруги, що генеруються на обмотках, з вхідною напругою, що в результаті дає приріст вихідної напруги.

6. Способи розширення діапазону перетворення

Діапазон перетворення ДНП-ПН та діапазони робочої вхідної/вихідної напруги ДНП – це споріднені, але не тотожні поняття. Діапазон вхідної/вихідної напруги характеризує мінімальне та максимальне значення робочої напруги для однієї зі сторін перетворення, за фіксованої іншої. Діапазон перетворення характеризується коефіцієнтом перетворення ДНП-ПН, а саме – співвідношенням вихідної напруги до вхідної не зважаючи на самі значення цих напруг. Найпростішим підходом для розширення діапазону є каскадування декількох перетворювачів, але він призводить або до зниження ККД (послідовне), або до надлишковості (паралельне).

Способи розширення верхніх меж напруг/струмів буди описані вище, тому далі будуть наведені способи, що призводять саме до розширення діапазону перетворення ДНП-ПН:

1. Імпедансні (англ. *Impedance-Source Network*) або квазі-імпедансні (англ. *Quasi-Z-Source Network*) ланцюги в складі вхідних секцій каскадованого ДНП-ПН – дозволяють оперувати не тільки з ДжН, а й з ДжС на вході, по виходу можуть працювати як ДжН або ДжС, не чутливі до станів джерела/навантаження близьких до короткого замикання (і навіть використовують це на користь), а також дозволяють отримати більші коефіцієнти трансформації за меншої шпаруватості сигналів керування, що призводить до менших стресів на ключах [38].

2. Схеми з чергуванням фаз та магніто-зв'язаними індуктивностями (англ. *Interleaved with Magnetically-Coupled Inductors*) дозволяють отримати високий коефіцієнт перетворення без застосування критичних значень шпаруватості ШІМ завдяки розрахунку необхідного коефіцієнта магнітного зв'язку, коефіцієнта трансформації, а також способу включення зв'язаних обмоток. Це не лише зменшує пульсації струму, а й розширює нижню межу робочої вхідної напруги. Різновидом будуть й підходи, що використовують індуктивності, – індуктивністю додатковими відгалуженнями (англ. *Tapped Inductor*) та з комутованою індуктивністю (англ. *Switched-Inductor*).

3. Вдосконалені алгоритми комутації ключів в САК та відповідні до них техніки модуляції – самостійно не використовуються, лише в поєднанні з топологіями СЧ ДНП-ПН, які дозволяють досягти спеціальних режимів перетворення енергії в СЧ перетворювача. До таких алгоритмів відносять спеціальні режими наскрізної провідності, зміна модуляцій з ШІМ на ЧІМ та ФІМ та навпаки за зміни характеру навантаження, адаптивні алгоритми зміни часу непровідності та інші.

7. Підходи до побудови САК ДНП-ПН

Далі наведено короткий опис принципів регулювання, особливостей структури, а також переваги та недоліки використання систем автоматичного керування (САК) для ДНП-ПН, які викладені нижче за зростанням складності архітектури.

7.1. Керування за напругою

Задачею САК ДНП-ПН з керуванням за напругою (англ. *Voltage-Mode Control*, **VMC**) є підтримка на заданому рівні напруги ЛПС та заданих опорних значень напруг на сторонах перетворення, а за відсутності виокремленої ЛПС – лише заданих опорних значень напруги на сторонах перетворення. Контури регулювання по напрузі формуються на основі ланок зі статичною передавальною функцією перетворювача, компенсуючих/форсуючих ланок другого порядку та/або ПІ- або ПІД-регуляторів по динамічній складовій. Керування може здійснюватися для кожної зі сторін перетворення як окремо, так і спільно, в обох випадках регуляторами формується адитивне упередження до статичного коефіцієнта перетворення.

Контроль за напрямком протікання струму не виконується, тому зміна напрямку передачі енергії відбувається неявно, а стверджувати про нього можна лише опосередковано – за знаком помилки регулювання по напрузі на кожній зі сторін перетворення. Стверджувати про обсяг енергії, що прокачується через перетворювач, взагалі не можливо [39, 40]. Внаслідок цього система керування повинна бути обладнана додатковими ланками (нечутливості або гістерезису), що розділяють допустимі та недопустимі межі відхилення вимірних напруг від заданих, а також – додатковим зовнішнім логічним контуром керування, який визначатиме перемикання напрямку, прийнявши одну зі сторін перетворення за пріоритетну.

Перевагою даного різновиду САК є простота його реалізації та налаштування, а недоліком – відсутність контролю за напрямком та величиною струму, що може спричинити як перехід до режиму переривчастого струму за відсутності динамічних збурень та високого опору навантаження, так і до режимів, близьких до короткого замикання через необмеженість наростання струму, що трапляється за наявності перехідних процесів або зменшення опору навантаження хоча б на одній зі сторін перетворення. В чистому вигляді використовується лише для малопотужних двопортових ДНП з жорсткими рівнями напруг на сторонах перетворення.

7.2. Керування за струмом

На відміну від попереднього різновиду, САК ДНП-ПН з керуванням за струмом (англ. *Current-Mode Control*, **CMC**) має засоби для вимірювання хоча б одного струму перетворювача (найчастіше – струму землі), що надає ряд переваг у регулюванні, а саме:

1) у структуру САК вводиться додатковий внутрішній контур регулювання струму, що для кожної зі сторін обміну дозволяє обмежити по амплітуді та по швидкості перехідні процеси по струму й уникнути його неконтрольованого наростання або ж режиму переривчастого струму;

2) для зовнішнього логічного контуру керування дозволяє однозначно визначити реальний напрямок передачі енергії та на основі його ухвалити рішення про тимчасову зупинку перетворення однієї зі сторін, коригування задаючих значень або зміну напрямку протікання енергії.

Перевагою даного різновиду САК є можливість прямого повністю визначеного керування за зворотним зв'язком [39, 40], а недоліком є можливість реалізації лише двоportsових ДНП для ОК 1-го та 2-го порядків таких, як інтерфейси до М-АКБ, та електроприводи з функцією рекуперації для електродвигунів, що працюють в генераторному режимі (наприклад – мотор-колеса).

7.3. Керування за потужністю

САК ДНП-ПН з керуванням за потужністю (англ. *Power-Based Control*, **PBC**) є логічним розвитком двох попередніх підходів, і полягає в надбудові додаткового зовнішнього контуру регулювання потужності, що прокачується між сторонами перетворення. При цьому в САК можуть лишитись як обидва підпорядковані контури – струму та напруги, так і лише один з них. Таке вдосконалення дозволяє керувати напрямком та обсягом енергії, що передається між сторонами обміну, враховувати активні, реактивні та викривлені складові повної потужності.

Головною перевагою даного різновиду САК (в доповнення до існуючих переваг **СМС**) є те, що він дозволяє будувати багатопортів двонаправлені перетворювачі, оскільки враховує закон балансу потужностей. Це дозволяє використовувати ДНП, керовані даними САК, в складі систем класу SMARTGrid та MICROgrid [41, 42], в яких присутні декілька одночасно працюючих різнорідних джерел енергії та навантажень. Головним недоліком даного різновиду САК є відсутність механізмів для врахування нелінійностей: силової частини, джерел енергії та навантаження, а також їх суперпозиції. Наслідком є звуження діапазону керування та низька робастність.

7.4. Керування з ковзанням по поверхні

САК ДНП-ПН по схемі з ковзанням по поверхні керування (англ. *Sliding-Mode Control*, **SMC**) застосовуються у випадках, коли моделі СЧ ДНП або ОК містять значні нелінійності, які не можна описати аналітично через складність або функціональну невідповідність. Для врахування нелінійностей до складу САК вводять одну або декілька поверхонь керування чисельно заданих у вигляді таблиць, що описують закони взаємодії основних фізичних величин (характеристики) СЧ ДНП та ОК. Вищезгадані поверхні керування отримуються шляхом або багатопараметричного чисельного моделювання системи, або багатопараметричного натурного експерименту [43, 44].

У працюючій САК отримані вимірювання вектора зворотного зв'язку пропускаються через каскадно поєднані таблиці, у ході чого виконуються зворотні перетворення і шукаються керуючі впливи, необхідні для підтримки заданого режиму роботи ДНП-ПН, при цьому автоматично виконується компенсація нелінійностей (лінеаризація) властивих системі. Тому базово такі системи потребують лише П-регулятора, що утворює один контур. Втім, для компенсації неврахованої в таблицях відповідності динаміки збурень встановлюється стандартний ПД-регулятор у включенні паралельному до табличного контуру.

Зміна напрямку перемикавання відбувається природним чином шляхом зміни знаку амплітуди на поверхні керування, а обмеження по напрузі та струму вводяться або довизначенням поверхонь керування біля їх країв, або ж алгоритмом ковзання, що в разі виходів за межі визначеної поверхні утримує останнє визначене значення (екстраполятор нульового порядку) [43].

До особливостей даного різновиду САК варто віднести вузьку спеціалізованість (залежна не лише від топології ДНП, а й від номіналів силових реактивних компонентів та порядку передаваних потужностей) та проблемно-орієнтованість (під конкретний тип імпедансу навантаження). Це робить САК з ковзанням по поверхні керування застосованою для конкретної моделі перетворювача, але дозволяє організувати надійне керування для широкого діапазону навантажень, входних напруг та коефіцієнтів перетворення, а також врахувати всі нелінійності як ОК так і СЧ ДНП [44].

До недоліків даного різновиду САК відносять: значні стреси по напрузі та струму на ключах СЧ ДНП, стрибкоподібні відхилення керуючих змінних через прямі табличні перетворення не великої роздільної здатності. Останній недолік усувається застосуванням додаткових технік згладжування (інтерполяції) по сусідніх чарунках таблиць кривими 2-го порядку і вище, або ж сплайнами.

7.5. Робастне керування

Даний різновид САК ДНП-ПН (англ. *Robust Control*, **RBC**) використовує оптимальне керування за законом з фіксованою (після налаштування алгоритму) структурою, синтезованим для лінійної (або, точніше кажучи, – лінеаризованої в деякій робочій точці) моделі СЧ ДНП та ОК. Для забезпечення адекватності керування за умов широкого діапазону зовнішніх збурень до складу САК вводяться явно задані стохастичні моделі невизначеності системи та зовнішніх збурень. Це дозволяє створити САК не для конкретного ОК, а для їх множини з невизначеною динамікою, й не для одного збурення, а для їх множини в межах варіювання описаних параметрів невизначеності [46].

Робастна САК синтезується та функціонує в частотній області, а реалізується за допомогою векторно-матричних операцій в просторі станів, що має наслідком багатоконтурну структуру САК. До її структурних компонентів входять такі специфічні блоки: лінеаризована модель СЧ ДНП та ОК в просторі станів; блоки опису невизначеності параметрів – для збурень та динаміки, для СЧ ДНП та ОК; блоки зваженого оцінювання – для коефіцієнтів регулювання, якості керування та надійності.

У застосуванні до ДНП робастна САК актуальна тим, що вона забезпечує гарантовану стабільність в таких режимах як: широкі межі робочого діапазону регулювання в режимах заряду-розряду М-АКБ, суттєвої невизначеності параметрів (внутрішній паразитний опір і його температурний дрейф, залежна від напрямку передачі динаміка, а також збурення в навантаженні або джерелі). Особливістю робастного підходу у застосуванні до ДНП є те, що механізм зміни напрямку передачі енергії реалізується окремим контуром керування, а робастність в обох режимах (квадрантах) гарантується окремими розрахованими наборами матриць для кожного з режимів. Окремими алгоритмами необхідно й передбачати обмеження по напрузі та струму. До недоліків робастного підходу відносять обмежену швидкодію, складність налаштування вагових коефіцієнтів в блоках оцінювання, що робить його менш інтуїтивно зрозумілим для інженерів-експлуатаційників.

Робастна САК може бути синтезована за двома основними критеріями – H_∞ та H_2 [45]. Критерій H_∞ застосовують за умови невизначеності меж зміни імпедансу навантаження та непередбачуваного дрейфу параметрів СЧ ДНП, у тому числі й унаслідок збурень. Критерій H_2 застосовують у випадку, якщо необхідно придушити завади (викиди енергії), що спричиняються як роботою самого перетворювача, так і дією збурень, супутньо досягаючи оптимальності керування за критерієм енергетичної ефективності. Слід зазначити, що критерії H_∞ та H_2 не впливають на структуру САК, а на її мету роботи: H_∞ мінімізує найгірше можливе збурення (гарантує абсолютну стійкість за будь-яких невизначених за розподілом, але обмежених по амплітуді збурень), а H_2 мінімізує усереднену енергію збурення (гарантує придушення широкого спектра завад з визначеним розподілом за моделлю “білого” чи “кольорового” шуму, а також високу продуктивність).

7.6. Керування з прогнозуванням на основі моделі

Керування з прогнозуванням на основі моделі ОК (англ. *Model-Predictive control, MPC*) – це концепція САК, заснована на поєднанні “прямої” математичної моделі ОК (яка описує динаміку як ОК, так і СЧ ДНП) та оптимізації деякої цільової функції з заданими обмеженнями, за рахунок чого стає можливим прогнозувати (передбачати) поведінку ОК та виробляти оптимальний упереджуючий керуючий вплив на нього.

Як цільова функція може бути складена така, що містить всі змінні вектору стану системи (як правило, напруги на конденсаторах та струми в котушках) і мінімізує суму квадратів відхилень реально вимірних значень цих змінних від заданих (розрахованих по моделі ОК) для обраної робочої точки, використовуючи класичні методи оптимізації. Закон керування коригується та оновлюється після кожного кроку оновлення вимірювань вектора стану та ітеративної оптимізації цільової функції [47].

До переваг даного різновиду САК відносять: 1) швидкий відгук на широкий діапазон збурень; 2) структурна підтримка векторного (багатовимірного) керування без підпорядкованих контурів; 3) адаптивність закону керування; 4) зменшення/кінцевість горизонту передбачення (застосовує лише найближчу ітерацію прогнозування), що забезпечує стійкість САК; 5) не тільки стабілізація заданого режиму роботи, а й мінімізація пульсацій напруг та струмів в перетворювачі.

До недоліків даного різновиду САК варто віднести: велику обчислювальну складність (яка іноді потребує виділення окремого ядра сигнального процесора), необхідність у точному описі моделі відповідно до реального ОК (за неточності опису прогнозування стає короткочасним та неточним), а також – складнощі налаштування, які полягають в нетривіальному алгоритмі підбору вагових коефіцієнтів (закон керування не вдосконалюється, а деградує).

Існує багато різновидів САК ДНП на основі MPC, але найбільшого поширення набула САК на основі **Finite Control Set MPC** – не потребує ШІМ, а виконує перемикання СЧ ДНП в один зі станів наперед визначеного простору на розрахований відрізок часу, що робить її схожою на просторово-векторну модуляцію з її високою динамікою. Реалізація САК на основі підходу **Continuous-Control Set MPC** хоч і дає менші пульсації та кращу точність, але потребує значних обчислювальних витрат за рахунок використання квадратичних або градієнтних алгоритмів оптимізації.

7.7. Керування фазовим зсувом

Керування фазовим зсувом в САК ДНП-ПН (англ. *Phase-Shift Control, PSC*) використовується для мостових РІ-ДНП як базова стратегія керування, на основі якої будується більшість вдосконалених САК. Основні засади керування полягають в наступному: шпаруватість сигналу керування фіксована, регулювання кількості переданої енергії відбувається за рахунок кута зсуву фаз між початками періоду керування ключами в мостах на різних сторонах перетворення. Такий підхід робить перемикання напрямку передачі енергії вбудованим в розрахунок кута зсуву фаз, а за допомогою введення послідовної компенсуючої ланки обмеження швидкості наростання можна зробити дане перемикання «м'яким» [48; 49].

Тим не менш, даний алгоритм не може забезпечити дотримання ефективної комутації ключів за низьких навантажень, а також коригувати моменти часу відкриття/закриття транзисторних ключів під дією різного роду збурень, особливо, значних змінах імпедансу навантаження або рівня вхідної напруги на одній зі сторін перетворення.

З метою підвищення ефективності перетворення та гнучкості керування, розроблені модифікації базового алгоритму фазового зсуву між мостами – змішаний, подвійний та потрійний фазовий зсув. При цьому додаткові фазові зсуви формуються в межах одного

мостового інвертора і призначені для підтримки режиму перемикання при нульовій напрузі або нульовому струмі, а також для керування ступенем наближення до стану насичення додаткової індуктивності в складі РЛ РІ-ДНП.

7.8. Керування за просіданням напруги

Підхід в САК, заснований на керуванні за просіданням напруги (англ. *Droop Control, DRC*) є базовим для побудови багатопортових ДНП і є децентралізованою стратегією керування, що дозволяє без зв'язку між сторонами перетворення, – керуючись лише відхиленням напруги ЛПС, а також величиною та напрямком протікання струму, – приймати рішення про перерозподіл енергії (реверсування, перебалансування) одночасно між декількома сторонами перетворення [49].

Контур керування за просіданням добудовується як зовнішній над вже існуючими контурами (струму, напруги, потужності), що виконують стабілізацію кожної зі сторін перетворення. Тому даний підхід не замінює існуючі алгоритми, а лише доповнює та координує їх роботу для багатопортового випадку ДНП. САК безпосередньо не керує напругою чи струмом на жодній зі сторін перетворення, єдиним способом взаємодії зовнішнього контуру з підпорядкованими є *зміна опорної напруги*, що подається на САК кожної зі сторін перетворення [50].

Контрольованим параметром є величина напруги ЛПС, за просіданням якої слідкує САК. При цьому відхилення напруги ЛПС у будь-яку сторону приймається як деяка функція, залежна від струму, що протікає через ЛПС, величину і знак струму вимірює САК як зворотній зв'язок. За відхиленням реального значення напруги ЛПС від заданого номінального значення, знаючи величину і напрям струму, що протікає в цей час, стає можливим встановити так званий "коефіцієнт просідання" напруги, що має фізичний зміст (еквівалентний) приведенню опорного навантаження. Керуваною величиною є номінальне значення задаючої напруги ЛПС для кожної зі сторін обміну, що може відрізнитись від реально необхідного, але підлаштовується таким чином, щоб керувати напрямом перетворення та обсягом переданої енергії відповідної сторони перетворення.

Налаштовуваним параметром в контурі керування кожної опорної напруги є так званий "віртуальний опір" пропорційний до коефіцієнту просідання, який добирається таким чином що враховує електричну ємність ЛПС та сторін перетворення, постійну часу внутрішніх контурів САК, а також дві емпіричні умови: "надмірне просідання напруги → недостатній вплив коефіцієнту", "недостатнє просідання напруги → поганий розподіл енергії".

Збільшення споживання енергії на одній зі сторін перетворення призводить до просідання напруги ЛПС і зростання відтікання струму, тому для всіх сторін добирається такий рівень опорної напруги, щоб вони перемкнулись в режим накачки напруги ЛПС від енергії, запасеної на своїх сторонах обміну, що автоматично підлаштовує напрямки та обсяги переданої енергії.

До недоліків методики керування за "просіданням напруги" варто віднести те, що її принцип полягає в навмисному погіршенні стабілізації напруги ЛПС і створення "зони допустимого відхилення", а також низьку точність оцінки розподілу енергії, яка чутлива до відхилення імпедансів навантажень сторін перетворення від номінальних, а також до вдалості налаштування коефіцієнта просідання.

8. Реверсування ДНП-ПН

Реверсуванням ДНП-ПН називають процес зміни напрямку (режиму) протікання енергії між портами перетворювача. Наприклад, для розглянутої в межах даного дослідження АСТ-ЕЕ (рис. 1) за допомогою процесу реверсування відбувається зміна режимів заряджання та розряджання М-АКБ. Головна проблема, яка виникає під час реалізації реверсування, – забезпечення плавного переходу між режимами з метою уникнення

стрибків/переривання струму або просідань напруги на портах. Процес реверсування забезпечується САК ДНП-ПН. Визначимо параметри, що характеризують стан та момент в системі, коли необхідно виконати реверсування, і за якими САК повинна слідкувати:

1. Значення напруги на сторонах перетворення (V_{bus} , V_{bat}) – базово необхідне для оцінки переходу порту між режимами споживання та генерації, і навпаки. Порівнюється з опорними (заданими) значеннями. Наприклад, якщо напруга ЛПС V_{bus} почне знижуватися, тоді необхідно перемкнути ДНП-ПН в режим розряджання М-АКБ;

2. Знак протікаючого струму та його зміна – зручно вимірювати струм через індуктивність, оскільки він не може змінюватись стрибком. За зміни режиму ДЖЕ або споживача на одній зі сторін обміну, струм змінює свій знак з “+” на “-” з переходом через “0”. Наближення значення струму до 0 сигналізує про необхідність реверсування з боку САК;

3. Швидкість зміни струму di/dt – дозволяє прогнозувати момент реверсування та забезпечити неперервність струму за нестационарних режимів роботи;

4. Стан накопичувача енергії: опосередковані відомості про активність захисту від критичного розряду та захисту від надлишкового заряду;

5. Захисне реверсування, що використовується в разі: зростання температури ключів або індуктивностей; зростання втрат і викидів при комутації ключів; перевищення RMS-струмів.

Розглянемо, яким чином САК здійснює реверсування передачі енергії в ДНП-ПН:

1. В деяких І-ДНП-ПН, що керуються через зсув фаз, напрямок протікання струму визначається значенням кута зсуву φ фаз між інверторами на сторонах перетворення. Сторона обміну, на якій фаза напруги інвертуючого каскаду випереджає фазу напруги на інвертуючому каскаді іншої сторони (з урахуванням проходження процесів в ВЧ-СТр), і буде джерелом енергії. Рівність $\varphi = 0$ означає, що енергія не передається;

2. В РІ-ДНП-ПН співвідношення частоти перемикання до частоти резонансу визначає напрямок передачі енергії та визначають режим підвищення/пониження між сторонами обміну. Якщо $f_{sw} < f_{res}$, перетворювач буде оперувати в умовах ZCS як підвищуючий, а якщо $f_{sw} > f_{res}$, то перетворювач працює в режимі ZVS як понижуючий;

3. У більшості не ізолюваних ДНП-ПН – за співвідношенням значення шпаруватості до вхідної та вихідної напруги. Якщо значення шпаруватості встановити таким, яке задовольняє умову $D \times V_{bus} > V_{bat}$, то енергія передається від ЛПС до М-АКБ. Встановивши D таким, що $D \times V_{bus} < V_{bat}$, енергія буде передаватись в зворотному напрямку – від М-АКБ до ЛПС. У ДНП, які контролюються лише двома ключами, напрямок передачі енергії визначається їх сукупним станом.

Методи запобігання (зменшення впливу) просіданню напруги під час реверсування:

1. Керування з випередженням (англ. Feed-Forward Control) – дозволяє реагувати на зміни вхідної напруги або вихідного струму в навантаженні ще до того, як вони вплинуть на вихідну напругу завдяки наявності спрощеної прямої моделі ОК. На основі поточних вимірних значень вхідної напруги та вихідного струму, пропускаючи через модель ОК, упереджено коригується шпаруватість керуючих сигналів, опорний струм та/або кут фазового зсуву. Вдосконаленим (за горизонтом прогнозування) варіантом керування з випередженням в задачах реверсування можна вважати керування з прогнозуванням за моделлю ОК (МРС), а врахування обмежень струму та напруги в реальному часі та адаптація закону керування зводить просідання напруги до теоретичного мінімуму [37];

2. Конденсаторний буфер (КБ) – додатковий проміжний накопичувач у системі дозволяє підтримувати рівень напруги, вигравши час, необхідний САК для реакції. Такі буфери віддають енергію при короткочасному дефіциті та накопичують надлишок. Використання “активних” КБ, в яких допоміжний малопотужний перетворювач регулює

напругу на КБ, дозволяє використовувати його ємність на 80-90 %. У результаті під час реверсування стабілізується напруга, внаслідок чого зменшуються вимоги до швидкодії регулятора САК, а також знижуються гармонійні складові;

Алгоритми компенсації часу непровідності (англ. Dead-Time Compensation) – базово необхідний для захисту ключів в одному півмості перетворювача під час їх перемикання, аби запобігти комбінації одночасно відкритих ключів, що призведе до короткого замикання. Задля цього після закривання одного з ключів і перед початком відкривання іншого вставляється стан, коли обидва ключі закриті. Разом з цим, використання вставки з часом непровідності призводить до появи додаткових втрат, падіння напруги, виникнення фазової похибки струму. Алгоритм компенсації динамічно змінює тривалість керуючих сигналів залежно від дійсної полярності струму. Це дозволяє відновити ефективне значення напруги та запобігти її просіданню, особливо, за режимів низької потужності або при зміні напрямку енергії. Приклад алгоритму для ПАМ-І-ДНП-ПН запропоновано в [36].

Висновки. Не ізольовані ДНП-ПН є ефективними для використання у системах з низьким енергоспоживанням завдяки простоті керування, низькому рівню завад (для систем з низькими напругами та у випадку зв'язаних індуктивностей), високому ККД (за низьких напруг) та малим габаритам. У АСГ-ЕЕ, яка розглядається в даній роботі, ЛПС є високовольтною (300 В...450 В), тому використання не ізольованих ДНП-ПН в безпечовому плані є недоречним.

Наявність гальванічної ізоляції у вигляді трансформатора дозволяє оперувати з високими рівнями напруг та потужностей, забезпечує високий коефіцієнт перетворення (має широкий діапазон, який визначається співвідношенням витків трансформатора) та високий ККД. Але в свою чергу збільшує габарити системи, ускладнюється керування, зростає рівень електромагнітних завад, що потребує доповнення базової топології схемами демпфірування, снаберами тощо. Це в свою чергу збільшує кількість компонентів.

Таким чином, для АСГ-ЕЕ малої та середньої потужності з заявленими номіналами напруг ЛПС та М-АКБ доцільно обрати топологію СЧ по схемі *подвійного активного мостового ізольованого* ДНП-ПН, тобто, ПАМ-І-ДНП-ПН, без резонансної ланки, але з можливістю її включення до складу схеми після експериментальних досліджень.

В промислових зразках ДНП набули поширення САК, побудовані на основі алгоритмів СМС, РМС та РРС через можливість їх аналітичного синтезу та детермінованість роботи, що добре підпадає під умови сертифікаційних випробувань, у той час як більшість алгоритмів на основі МРС та алгоритмів ІІІ задовольняють дослідницькі потреби, проте, погано піддаються сертифікації. Для керування мостовими і резонансними ДНП, а також багатополюсними ДНП-ПН використовуються підходи, відмінні від усіх, згаданих вище, які, тим не менш, можуть з ними поєднуватись.

Також варто зазначити, що САК на основі СМС доцільно використовувати в складі систем, які мають значні принципово неусувні нелінійності ОК та/або СЧ ДНП-ПН, а також широкий діапазон зміни вхідної напруги та/або імпедансу навантаження. САК на основі RBC застосовуються в системах з критичними вимогами щодо безпеки та надійності роботи, в яких гарантовані запаси стійкості повинні перекривати максимальні значення динамічних характеристик. Таким чином, в якості алгоритму САК для обраної топології ДНП-ПН доцільно протестувати та порівняти алгоритми на основі МРС та RBC, і за результатами порівняння вже визначити більш придатний.

Список використаних джерел

1. Yakushkin, T., Yershov, R., & Stepenko, S. (2023). Comparative analysis of topologies and algorithms for maximum power point trackers in photovoltaic systems. *Technical Sciences and Technologies*, (2(32)), 321–339. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-321-339](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-321-339).

2. Fesenko, A., Yershov, R., & Stepenko, S. (2017). Overview and reasoning of storage batteries selection for autonomous power supply system based on photovoltaic converters. *Technical Sciences and Technologies*, (1(7)), 177–186. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2017-1\(7\)-177-186](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2017-1(7)-177-186).
3. Veligorskyi, O., Husev, O., Shevchenko, V., Tytelmaier, K., Yershov, R., Kosenko, R., & Vinnikov, D. (2018). A novel hysteresis power point optimizer for distributed solar power generation. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 14(1), 12–22. <https://doi.org/10.2478/ecce-2018-0002>.
4. Karshenas, H. R., Daneshpajoo, H., Safaei, A., Jain, P., & Bakhshai, A. (2011). Bidirectional dc-dc converters for energy storage systems. *Energy Storage in the Emerging Era of Smart Grids*, 161–178. <https://doi.org/10.5772/23494>.
5. Tytelmaier K., Husev O., Veligorskyi O., & Yershov R. (2016). A review of non-isolated bidirectional dc-dc converters for energy storage systems *2016 II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, 22–28. <https://doi.org/10.1109/YSF.2016.7753752>.
6. Tuluhong, A., Xu, Z., Chang, Q., & Song, T. (2025). Recent developments in bidirectional dc-dc converter topologies, control strategies, and applications in photovoltaic power generation systems: a comparative review and analysis. *Electronics*, 14(2), 389. <https://doi.org/10.3390/electronics14020389>.
7. Alatai, S., Salem, M., Ishak, D., Das, H. S., Alhuyi Nazari, M., Bughneda, A., & Kamarol, M. (2021). A review on state-of-the-art power converters: bidirectional, resonant, multilevel converters and their derivatives. *Applied Sciences*, 11(21), 10172. <https://doi.org/10.3390/app11210172>.
8. Singh, K. A., Prajapati, A., & Chaudhary, K. (2021). High gain compact interleaved boost converter with reduced voltage stress for PV application. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 1. <https://doi.org/10.1109/jestpe.2021.3120802>.
9. Alghaythi, M. L., O'Connell, R. M., Islam, N. E., Khan, M. M. S., & Guerrero, J. M. (2020). A high step-up interleaved dc-dc converter with voltage multiplier and coupled inductors for renewable energy systems. *IEEE Access*, 8, 123165–123174. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3007137>.
10. Wang, Z., Su, X., Zeng, N., & Jiang, J. (2024). Overview of isolated bidirectional dc-dc converter topology and switching strategies for electric vehicle applications. *Energies*, 17(10), 2434. <https://doi.org/10.3390/en17102434>.
11. Junming Zhang, Xiucheng Huang, Xinke Wu & Zhaoming Qian. (2010). A high efficiency flyback converter with new active clamp technique. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(7), 1775–1785. <https://doi.org/10.1109/tpel.2010.2042302>.
12. Konar, S., & Saha, S. S. (2020). Efficient energy recovery and boosting the voltage gain of a soft-switched flyback converter. *Y 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/pedes49360.2020.9379458>.
13. Lagap, T., Dimopoulos, E., & Munk-Nielsen, S. (2015). An RCDD snubber for a bidirectional flyback converter. *Y 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/epe.2015.7309439>.
14. Kheraluwala, M. N., Gascoigne, R. W., Divan, D. M., & Baumann, E. D. (1992). Performance characterization of a high-power dual active bridge DC-to-DC converter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28(6), 1294–1301. <https://doi.org/10.1109/28.175280>.
15. Muhammetoglu, B., & Jamil, M. (2024). Dual active bridge converter with interleaved and parallel operation for electric vehicle charging. *Energies*, 17(17), 4258. <https://doi.org/10.3390/en17174258>.
16. Huiqing Wen. (2013). Determination of the optimal sub-mode for bidirectional dual-active-bridge DC-DC converter with multi-phase-shift control. *Y 2013 IEEE ECCE Asia Downunder (ECCE Asia 2013)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ecce-asia.2013.6579159>.
17. Iqbal, M. T., Maswood, A. I., Dehghani Tafti, H., Tariq, M., & Bingchen, Z. (2020). Explicit discrete modelling of bidirectional dual active bridge dc-dc converter using multi-time scale mixed system model. *IET Power Electronics*, 13(18), 4252–4260. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2020.0293>.
18. Kwak, B., Kim, M., & Kim, J. (2020). Inrush current reduction technology of DAB converter for low-voltage battery systems and DC bus connections in DC microgrids. *IET Power Electronics*, 13(8), 1528–1536. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2019.0506>.

19. Peng, F. Z., Li, H., Su, G. J., & Lawler, J. S. (2004). A New ZVS Bidirectional DC–DC Converter for Fuel Cell and Battery Application. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(1), 54–65. <https://doi.org/10.1109/tpe.2003.820550>.
20. Zupan, I., Lasic, A., Kruselj, D., Sunde, V., & Ban, Z. (2019). Power converter circuits for recuperation of the regenerative braking energy in rail vehicles. *Y 2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*. IEEE. <https://doi.org/10.23919/mipro.2019.8757124>.
21. Salem, M., Jusoh, A., Idris, N. R. N., & Alhamrouni, I. (2015). A Review of an Inductive Power Transfer System for EV Battery Charger. *European Journal of Scientific Research*, 134(1), 41–56.
22. Salem, M., Jusoh, A., Nik Idris, N. R., Sutikno, T., & Buswig, Y. M. Y. (2017). Phase-shifted Series Resonant Converter with Zero Voltage Switching Turn-on and Variable Frequency Control. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 8(3), 1184. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v8.i3.pp1184-1192>.
23. Deshmukh (Gore), S., Iqbal, A., Islam, S., Khan, I., Marzband, M., Rahman, S., & Al-Wahedi, A. M. A. B. (2022). Review on classification of resonant converters for electric vehicle application. *Energy Reports*, 8, 1091–1113. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.013>.
24. Liu, J., Sheng, L., Shi, J., Zhang, Z., & He, X. (2009). LCC Resonant Converter Operating under Discontinuous Resonant Current Mode in High Voltage, High Power and High Frequency Applications. *Y 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/apec.2009.4802862>.
25. Jain, A., & Massimiani, I. C. (2021). LCC Resonant Converter Design and Transfer Function Computation Using FHA Analysis. *Y 2021 4th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icnte51185.2021.9487672>.
26. Geddam, K. K., & Devaraj, E. (2022). Real Time Hardware-in-Loop Implementation of LLC Resonant Converter at Worst Operating Point Based on Time Domain Analysis. *Energies*, 15(10), 3634. <https://doi.org/10.3390/en15103634>.
27. Jin, N.-Z., Feng, Y., Chen, Z.-Y., & Wu, X.-G. (2023). Bidirectional CLLC Resonant Converter Based on Frequency-Conversion and Phase-Shift Hybrid Control. *Electronics*, 12(7), 1605. <https://doi.org/10.3390/electronics12071605>.
28. Li, B., Lee, F. C., Li, Q., & Liu, Z. (2017). Bi-directional on-board charger architecture and control for achieving ultra-high efficiency with wide battery voltage range. *Y 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/apec.2017.7931228>.
29. Wu, H., Xu, P., Hu, H., Zhou, Z., & Xing, Y. (2014). Multiport Converters Based on Integration of Full-Bridge and Bidirectional DC–DC Topologies for Renewable Generation Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(2), 856–869. <https://doi.org/10.1109/tie.2013.2254096>.
30. Venmathi, M., & Ramaprabha, R. (2013). A comprehensive survey on multi-port bidirectional dc-dc converters for renewable energy systems. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8(5), 348–356.
31. Lee, J.-P., Cha, H., Shin, D., Lee, K.-J., Yoo, D.-W., & Yoo, J.-Y. (2013). Analysis and Design of Coupled Inductors for Two-Phase Interleaved DC-DC Converters. *Journal of Power Electronics*, 13(3), 339–348. <https://doi.org/10.6113/jpe.2013.13.3.339>.
32. Zhao, Y., Li, W., Deng, Y., & He, X. (2011). High step-up boost converter with passive lossless clamp circuit for non-isolated high step-up applications. *IET Power Electronics*, 4(8), 851. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2010.0232>.
33. Mayer, R., Kattel, M. B. E., & Oliveira, S. V. G. (2021). Multiphase Interleaved Bidirectional DC/DC Converter With Coupled Inductor for Electrified-Vehicle Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(3), 2533–2547. <https://doi.org/10.1109/tpe.2020.3015390>.
34. Goel, M., Joshi, D., & Mulenga, J. (2024). Performance Analysis of Input Parallel Output Series Full Bridge Converter Considering Parasitic Effects. *Y 2024 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)* (c. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/tensymp61132.2024.10752111>.
35. Xinbo Ruan, Wu Chen, Lulu Cheng, Tse, C. K., Hong Yan & Tao Zhang. (2009). Control Strategy for Input-Series–Output-Parallel Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(4), 1174–1185. <https://doi.org/10.1109/tie.2008.2007980>.

36. Kawauchi, K., Higa, H., Kusaka, K., & Itoh, J.-i. (2018). Dead-time Compensation Method for Dual Active Bridge Converter with Three-level Operation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 138(12), 944–945. <https://doi.org/10.1541/ieejias.138.944>.
37. Pawar, D. N., & Singh, N. M. (2017). MPC based controller for dual active bidirectional DC-DC converter driving inverter using dynamic phasor approach. *Y 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icpcsi.2017.8391795>.
38. Yakushkin, T. V., Yershov, R. D., & Gordienko, V. V. (2025). Analytical Model of Quasi-Z-Source DC-DC Converter Using Nodal Admittance Matrix in Laplace-Domain. *Y Lecture Notes in Networks and Systems* (c. 408–433). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90735-7_31.
39. Figueres, E., Garcera, G., Benavent, J. M., Pascual, M., & Martinez, J. A. (2006). Adaptive two-loop Voltage-mode control of DC-DC switching converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(1), 239–253. <https://doi.org/10.1109/tie.2005.862254>.
40. Truntic, M., Rodic, M., & Milanovic, M. (2013). Voltage and current-mode control for a multiphase bi-directional DC-DC converter. *Y 2013 International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/cpe.2013.6601144>.
41. Jin, C., Wang, P., Xiao, J., Tang, Y., & Choo, F. H. (2014). Implementation of Hierarchical Control in DC Microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(8), 4032–4042. <https://doi.org/10.1109/tie.2013.2286563>.
42. Dragicevic, T., Lu, X., Vasquez, J., & Guerrero, J. (2015). DC Microgrids—Part I: A Review of Control Strategies and Stabilization Techniques. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1. <https://doi.org/10.1109/tpel.2015.2478859>
43. Agarwal, A., Deekshitha, K., Singh, S., & Fulwani, D. (2015). Sliding mode control of a bidirectional DC/DC converter with constant power load. *Y 2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icdem.2015.7152056>.
44. Wu, L., Liu, J., Vazquez, S., & Mazumder, S. K. (2022). Sliding Mode Control in Power Converters and Drives: A Review. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 9(3), 392–406. <https://doi.org/10.1109/jas.2021.1004380>.
45. Postlethwaite, I., & Skogestad, S. (1993). Robust Multivariable Control Using H_∞ Methods: Analysis, Design and Industrial Applications. *Y Essays on Control* (c. 269–337). Birkhäuser Boston. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0313-1_9.
46. Kemin, Z. (1998). *Essentials of robust control* (D. J. Comstock, Ed.). Prentice Hall.
47. Khomenko, M., Veligorskyi, O., Husev, O., Tytelmaier, K., & Yershov, R. (2017). Model predictive control of photovoltaic bidirectional DC-DC converter with coupled inductors. *Y 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ukrcon.2017.8100308>.
48. Wu, F., Fan, S., & Luo, S. (2020). Small-Signal Modeling and Closed-loop Control of Bidirectional Buck-Boost Current-Fed Isolated DC-DC Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1. <https://doi.org/10.1109/tie.2020.2984448>.
49. Biswas, I., Kastha, D., & Bajpai, P. (2021). Small Signal Modeling and Decoupled Controller Design for a Triple Active Bridge Multiport DC–DC Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(2), 1856–1869. <https://doi.org/10.1109/tpel.2020.3006782>.
50. Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., de Vicuna, L. G., & Castilla, M. (2011). Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 158–172. <https://doi.org/10.1109/tie.2010.2066534>.

References

1. Yakushkin, T., Yershov, R., & Stepenko, S. (2023). Comparative analysis of topologies and algorithms for maximum power point trackers in photovoltaic systems. *Technical Sciences and Technologies*, (2(32)), 321–339. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-321-339](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-321-339).

2. Fesenko, A., Yershov, R., & Stepenko, S. (2017). Overview and reasoning of storage batteries selection for autonomous power supply system based on photovoltaic converters. *Technical Sciences and Technologies*, (1(7)), 177–186. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2017-1\(7\)-177-186](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2017-1(7)-177-186).
3. Veligorskyi, O., Husev, O., Shevchenko, V., Tytelmaier, K., Yershov, R., Kosenko, R., & Vinnikov, D. (2018). A novel hysteresis power point optimizer for distributed solar power generation. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 14(1), 12–22. <https://doi.org/10.2478/ecce-2018-0002>.
4. Karshenas, H. R., Daneshpajoo, H., Safaei, A., Jain, P., & Bakhshai, A. (2011). Bidirectional dc-dc converters for energy storage systems. *Energy Storage in the Emerging Era of Smart Grids*, 161–178. <https://doi.org/10.5772/23494>.
5. Tytelmaier K., Husev O., Veligorskyi O., & Yershov R. (2016). A review of non-isolated bidirectional dc-dc converters for energy storage systems 2016 II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF), 22–28. <https://doi.org/10.1109/YSF.2016.7753752>.
6. Tuluhong, A., Xu, Z., Chang, Q., & Song, T. (2025). Recent developments in bidirectional dc-dc converter topologies, control strategies, and applications in photovoltaic power generation systems: a comparative review and analysis. *Electronics*, 14(2), 389. <https://doi.org/10.3390/electronics14020389>.
7. Alatai, S., Salem, M., Ishak, D., Das, H. S., Alhuyi Nazari, M., Bughneda, A., & Kamarol, M. (2021). A review on state-of-the-art power converters: bidirectional, resonant, multilevel converters and their derivatives. *Applied Sciences*, 11(21), 10172. <https://doi.org/10.3390/app11210172>.
8. Singh, K. A., Prajapati, A., & Chaudhary, K. (2021). High gain compact interleaved boost converter with reduced voltage stress for PV application. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 1. <https://doi.org/10.1109/jestpe.2021.3120802>.
9. Alghaythi, M. L., O'Connell, R. M., Islam, N. E., Khan, M. M. S., & Guerrero, J. M. (2020). A high step-up interleaved dc-dc converter with voltage multiplier and coupled inductors for renewable energy systems. *IEEE Access*, 8, 123165–123174. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3007137>.
10. Wang, Z., Su, X., Zeng, N., & Jiang, J. (2024). Overview of isolated bidirectional dc-dc converter topology and switching strategies for electric vehicle applications. *Energies*, 17(10), 2434. <https://doi.org/10.3390/en17102434>.
11. Junming Zhang, Xiucheng Huang, Xinke Wu & Zhaoming Qian. (2010). A high efficiency flyback converter with new active clamp technique. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(7), 1775–1785. <https://doi.org/10.1109/tpel.2010.2042302>.
12. Konar, S., & Saha, S. S. (2020). Efficient energy recovery and boosting the voltage gain of a soft-switched flyback converter. *Y 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/pedes49360.2020.9379458>.
13. Lagap, T., Dimopoulos, E., & Munk-Nielsen, S. (2015). An RCDD snubber for a bidirectional flyback converter. *Y 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/epe.2015.7309439>.
14. Kheraluwala, M. N., Gascoigne, R. W., Divan, D. M., & Baumann, E. D. (1992). Performance characterization of a high-power dual active bridge DC-to-DC converter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28(6), 1294–1301. <https://doi.org/10.1109/28.175280>.
15. Muhammetoglu, B., & Jamil, M. (2024). Dual active bridge converter with interleaved and parallel operation for electric vehicle charging. *Energies*, 17(17), 4258. <https://doi.org/10.3390/en17174258>.
16. Huiqing Wen. (2013). Determination of the optimal sub-mode for bidirectional dual-active-bridge DC-DC converter with multi-phase-shift control. *Y 2013 IEEE ECCE Asia Downunder (ECCE Asia 2013)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ecce-asia.2013.6579159>.
17. Iqbal, M. T., Maswood, A. I., Dehghani Tafti, H., Tariq, M., & Bingchen, Z. (2020). Explicit discrete modelling of bidirectional dual active bridge dc-dc converter using multi-time scale mixed system model. *IET Power Electronics*, 13(18), 4252–4260. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2020.0293>.
18. Kwak, B., Kim, M., & Kim, J. (2020). Inrush current reduction technology of DAB converter for low-voltage battery systems and DC bus connections in DC microgrids. *IET Power Electronics*, 13(8), 1528–1536. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2019.0506>.

19. Peng, F. Z., Li, H., Su, G. J., & Lawler, J. S. (2004). A New ZVS Bidirectional DC–DC Converter for Fuel Cell and Battery Application. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(1), 54–65. <https://doi.org/10.1109/tpe.2003.820550>.
20. Zupan, I., Lasic, A., Kruselj, D., Sunde, V., & Ban, Z. (2019). Power converter circuits for recuperation of the regenerative braking energy in rail vehicles. *Y 2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*. IEEE. <https://doi.org/10.23919/mipro.2019.8757124>.
21. Salem, M., Jusoh, A., Idris, N. R. N., & Alhamrouni, I. (2015). A Review of an Inductive Power Transfer System for EV Battery Charger. *European Journal of Scientific Research*, 134(1), 41–56.
22. Salem, M., Jusoh, A., Nik Idris, N. R., Sutikno, T., & Buswig, Y. M. Y. (2017). Phase-shifted Series Resonant Converter with Zero Voltage Switching Turn-on and Variable Frequency Control. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 8(3), 1184. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v8.i3.pp1184-1192>.
23. Deshmukh (Gore), S., Iqbal, A., Islam, S., Khan, I., Marzband, M., Rahman, S., & Al-Wahedi, A. M. A. B. (2022). Review on classification of resonant converters for electric vehicle application. *Energy Reports*, 8, 1091–1113. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.013>.
24. Liu, J., Sheng, L., Shi, J., Zhang, Z., & He, X. (2009). LCC Resonant Converter Operating under Discontinuous Resonant Current Mode in High Voltage, High Power and High Frequency Applications. *Y 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/apec.2009.4802862>.
25. Jain, A., & Massimiani, I. C. (2021). LCC Resonant Converter Design and Transfer Function Computation Using FHA Analysis. *Y 2021 4th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icnte51185.2021.9487672>.
26. Geddam, K. K., & Devaraj, E. (2022). Real Time Hardware-in-Loop Implementation of LLC Resonant Converter at Worst Operating Point Based on Time Domain Analysis. *Energies*, 15(10), 3634. <https://doi.org/10.3390/en15103634>.
27. Jin, N.-Z., Feng, Y., Chen, Z.-Y., & Wu, X.-G. (2023). Bidirectional CLLC Resonant Converter Based on Frequency-Conversion and Phase-Shift Hybrid Control. *Electronics*, 12(7), 1605. <https://doi.org/10.3390/electronics12071605>.
28. Li, B., Lee, F. C., Li, Q., & Liu, Z. (2017). Bi-directional on-board charger architecture and control for achieving ultra-high efficiency with wide battery voltage range. *Y 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/apec.2017.7931228>.
29. Wu, H., Xu, P., Hu, H., Zhou, Z., & Xing, Y. (2014). Multiport Converters Based on Integration of Full-Bridge and Bidirectional DC–DC Topologies for Renewable Generation Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(2), 856–869. <https://doi.org/10.1109/tie.2013.2254096>.
30. Venmathi, M., & Ramaprabha, R. (2013). A comprehensive survey on multi-port bidirectional dc-dc converters for renewable energy systems. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8(5), 348–356.
31. Lee, J.-P., Cha, H., Shin, D., Lee, K.-J., Yoo, D.-W., & Yoo, J.-Y. (2013). Analysis and Design of Coupled Inductors for Two-Phase Interleaved DC-DC Converters. *Journal of Power Electronics*, 13(3), 339–348. <https://doi.org/10.6113/jpe.2013.13.3.339>.
32. Zhao, Y., Li, W., Deng, Y., & He, X. (2011). High step-up boost converter with passive lossless clamp circuit for non-isolated high step-up applications. *IET Power Electronics*, 4(8), 851. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2010.0232>.
33. Mayer, R., Kattel, M. B. E., & Oliveira, S. V. G. (2021). Multiphase Interleaved Bidirectional DC/DC Converter With Coupled Inductor for Electrified-Vehicle Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(3), 2533–2547. <https://doi.org/10.1109/tpe.2020.3015390>.
34. Goel, M., Joshi, D., & Mulenga, J. (2024). Performance Analysis of Input Parallel Output Series Full Bridge Converter Considering Parasitic Effects. *Y 2024 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)* (c. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/tensymp61132.2024.10752111>.
35. Xinbo Ruan, Wu Chen, Lulu Cheng, Tse, C. K., Hong Yan & Tao Zhang. (2009). Control Strategy for Input-Series–Output-Parallel Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(4), 1174–1185. <https://doi.org/10.1109/tie.2008.2007980>.

36. Kawauchi, K., Higa, H., Kusaka, K., & Itoh, J.-i. (2018). Dead-time Compensation Method for Dual Active Bridge Converter with Three-level Operation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 138(12), 944–945. <https://doi.org/10.1541/ieejias.138.944>.
37. Pawar, D. N., & Singh, N. M. (2017). MPC based controller for dual active bidirectional DC-DC converter driving inverter using dynamic phasor approach. *Y 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icpcsi.2017.8391795>.
38. Yakushkin, T. V., Yershov, R. D., & Gordienko, V. V. (2025). Analytical Model of Quasi-Z-Source DC-DC Converter Using Nodal Admittance Matrix in Laplace-Domain. *Y Lecture Notes in Networks and Systems* (c. 408–433). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90735-7_31.
39. Figueres, E., Garcera, G., Benavent, J. M., Pascual, M., & Martinez, J. A. (2006). Adaptive two-loop Voltage-mode control of DC-DC switching converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(1), 239–253. <https://doi.org/10.1109/tie.2005.862254>.
40. Truntic, M., Rodic, M., & Milanovic, M. (2013). Voltage and current-mode control for a multiphase bi-directional DC-DC converter. *Y 2013 International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/cpe.2013.6601144>.
41. Jin, C., Wang, P., Xiao, J., Tang, Y., & Choo, F. H. (2014). Implementation of Hierarchical Control in DC Microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(8), 4032–4042. <https://doi.org/10.1109/tie.2013.2286563>.
42. Dragicevic, T., Lu, X., Vasquez, J., & Guerrero, J. (2015). DC Microgrids—Part I: A Review of Control Strategies and Stabilization Techniques. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1. <https://doi.org/10.1109/tpel.2015.2478859>.
43. Agarwal, A., Deekshitha, K., Singh, S., & Fulwani, D. (2015). Sliding mode control of a bidirectional DC/DC converter with constant power load. *Y 2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icdcm.2015.7152056>.
44. Wu, L., Liu, J., Vazquez, S., & Mazumder, S. K. (2022). Sliding Mode Control in Power Converters and Drives: A Review. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 9(3), 392–406. <https://doi.org/10.1109/jas.2021.1004380>.
45. Postlethwaite, I., & Skogestad, S. (1993). Robust Multivariable Control Using H_∞ Methods: Analysis, Design and Industrial Applications. *Y Essays on Control* (c. 269–337). Birkhäuser Boston. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0313-1_9.
46. Kemin, Z. (1998). *Essentials of robust control* (D. J. Comstock, Ed.). Prentice Hall.
47. Khomenko, M., Veligorskyi, O., Husev, O., Tytelmaier, K., & Yershov, R. (2017). Model predictive control of photovoltaic bidirectional DC-DC converter with coupled inductors. *Y 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ukrcon.2017.8100308>.
48. Wu, F., Fan, S., & Luo, S. (2020). Small-Signal Modeling and Closed-loop Control of Bidirectional Buck-Boost Current-Fed Isolated DC-DC Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1. <https://doi.org/10.1109/tie.2020.2984448>.
49. Biswas, I., Kastha, D., & Bajpai, P. (2021). Small Signal Modeling and Decoupled Controller Design for a Triple Active Bridge Multiport DC–DC Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(2), 1856–1869. <https://doi.org/10.1109/tpel.2020.3006782>.
50. Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., de Vicuna, L. G., & Castilla, M. (2011). Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 158–172. <https://doi.org/10.1109/tie.2010.2066534>.

Дата першого надходження статті до видання: 24.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.12.2025

Tymofii Yakushkin¹, Roman Yershov²

¹PhD Student, Junior Scientific Researcher at
Electrical Engineering, Information and Measurement Technologies Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: yakushkintima@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3432-9237>. SCOPUS Author ID: 57282689600

²Senior Lecturer at Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: roman.d.yershov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0267-2906>

ResearcherID: H-1432-2016. SCOPUS Author ID: 57188719994

REVIEW OF BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTERS WITH WIDE INPUT AND OUTPUT VOLTAGE RANGES FOR AUTONOMOUS ELECTRIC POWER GENERATION SYSTEMS BASED ON PHOTOVOLTAIC CONVERTERS

Under unstable operation of Ukraine power infrastructure caused by numerous damages, the development of autonomous electric power generation systems based on renewable energy sources, in particular photovoltaic (PV) converters, has become increasingly relevant. These systems allow achieving uninterrupted power supply to consumers under conditions of limited or completely unavailable access to a centralized low-voltage residential distribution network.

A key functional component of autonomous electric power generation systems are bidirectional dc-dc converters, which ensure efficient bidirectional energy exchange between the battery storage system, the DC link, and other system components. The fundamental difference of bidirectional converters from other types of semiconductor power converters lies in their capability to reverse the direction of power flow, as well as in the specific structure of the power stage and the applied control algorithms that support this feature.

This paper presents an analytical review and classification of semiconductor bidirectional dc-dc converters. In particular, the main power-stage topologies without galvanic isolation between energy exchange sides and those with galvanic isolation implemented by means of a high-frequency power transformer are considered. An original approach to the selection of a resonant tank topology within resonant isolated bidirectional converters is formulated. Furthermore, the principles and algorithms underlying the design of automatic control systems for bidirectional converters are analyzed, and the advantages, limitations, and application domains of the main control strategies are generalized.

The fundamental principles of designing multidirectional and multiport converters are highlighted, along with specific techniques for interconnecting power-stage components and implementing their control. Special attention is paid to methods for increasing input and output voltage levels, handling higher current ratings, and extending the conversion range through the application of cascading techniques, as well as to the process of power flow reversal in bidirectional converters.

Based on the obtained results, for bidirectional dc-dc converters operating under wide input and output voltage variation ranges, the dual active bridge (DAB) topology is recommended as a baseline solution for the power stage, with the remained possibility for integrating a resonant tank. Regarding to the control strategy, the use of model predictive control or one of the robust control algorithm embodiments is considered the most appropriate choice for such converters.

Keywords: autonomous electric grids; autonomous generation systems; bidirectional converters; semiconductor power converters; dc-dc converters; comparative analysis; photovoltaic panels; converter topologies; power flow reversal; automatic control systems.

Fig.: 18. References: 50.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-414-419](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-414-419)

УДК 621.316.9

Гліб Миколайович Стрункін¹, Андрій Євгенович Шамрай²¹магістр, інженер

ТОВ «Плутон ІС» (Запоріжжя, Україна)

E-mail: strunkingleb@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1719-4132>. ResearcherID: [LNQ-2155-2024](https://orcid.org/0009-0007-3516-1989)²аспірант кафедри електричних машин

Національний університет «Запорізька Політехніка» (Запоріжжя, Україна),

заступник Генерального директора

ТОВ «Плутон ІС» (Запоріжжя, Україна)

E-mail: Andrey.Shamray@pluton.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3516-1989>

МОДЕЛЮВАННЯ ВИМИКАННЯ НАДШВИДКОДІЮЧОГО БЕЗДУГОВОГО ВИМИКАЧА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Наведено відомості про захист контактної мережі постійного струму міського електричного транспорту та метрополітену. Показано, що підвищити швидкодію автоматичних вимикачів можливо при застосуванні комутації струмів короткого замикання за допомогою вакуумної камери. Для гасіння дуги в вакуумній камері запропоновано методи розряду попередньо зарядженого конденсатора у протифазі струму короткого замикання. Для подальшої оптимізації надшвидкодійних вимикачів виникає потреба створення імітаційної моделі. Розроблено модель надшвидкодійного вимикача постійного струму у програмі PSIM. Наведено детальний опис моделі. Виконаний аналіз процесів вимикання автоматичного вимикача. Намічено подальші кроки для використання моделі.

Ключові слова: надшвидкодійний вимикач, вакуумна камера, постійний струм, імітаційна модель, PSIM, вимикання струму короткого замикання.

Рис.: 3. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Захист тягової мережі постійного струму міського електричного транспорту та метрополітену від струмів короткого замикання залишається важливою задачею, для вирішення якої на сучасному етапі залучають не тільки методи традиційних електричних апаратів, а і їх поєднання з пристроями силової електроніки. Вакуумні вимикачі тривалий час застосовувалися лише для комутації кіл змінного струму. Проте додавання до них напівпровідникових пристроїв зробило можливим ефективне гасіння дуги й постійного струму, завдяки чому ці апарати називають бездуговими. Сучасні виробники тягового обладнання вже вийшли на ринок з такими апаратами, які дозволили зменшити час вимикання надструмів та збільшити комутаційний ресурс вимикачів без регламентного обслуговування. Подальша оптимізація бездугових апаратів пов'язана з потребою або проведення натурного експерименту, або залучання імітаційного моделювання. В останньому випадку модель повинна бути адекватною, яку потрібно підтвердити існуючим експериментом.

Постановка проблеми. При розробці надшвидкодійного бездугового автоматичного вимикача постійного струму, зважаючи на те, що натурний експеримент пов'язаний зі значними фінансовими витратами, можливістю виникнення аварійних ситуацій з руйнуванням дослідного зразка та залученням людиногодин спеціалістів різного профілю, спеціалістами ТОВ «Плутон ІС» було побудовано та перевірено імітаційну модель, яка описує його вимикання при відключенні аварійних струмів та дозволяє здійснювати віртуальний експеримент при оптимізації його параметрів, що і є змістом цієї роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання використання швидкодійних вимикачів для захисту тягових мереж постійного струму неодноразово підіймалося в літературі [1; 2]. Проте йдеться виключно про використання суто механічних вимикачів, в яких енергія ланцюгів постійного струму розсіювалася у вигляді тепла при виникненні дуги під час вимикання [3]. Попри деякий прогрес, який пов'язано з вибором нових матеріалів та форми дугогасильних камер, використання електродинамічних приводів та залучання методів прогнозування розвитку короткого замикання, суттєво підвищити надійність, зменшити час вимикання надструмів та покращити габарити вимикачів не вдавалося [4; 5]. Ідея використання вакуумних вимикачів стикалася з потребою гасіння дуги постійного струму, без якого ваку-

умна камера руйнувалася через велике тепловиділення [6]. Розвиток силової електроніки дозволив поєднати вакуумний контактор та ланцюг гасіння, що складався з попередньо зарядженого конденсатора, який розряджався напівпровідниковим пристроєм зустрічно струму короткого замикання. Коли алгебраїчна сума струмів короткого замикання та гасіння ставала рівною нулю, дуга гасла, а вимикач переходив у вимкнений стан [7; 8].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Інженерні розробки таких вимикачів стикалися з відсутністю або складністю теоретичних основ для опису та моделювання процесу комутації, який пов'язаний не тільки з електромагнітними процесами в електронній схемі вимикача, а й з електромеханічним процесом руху контакту вакуумної камери та коротким горінням дуги постійного струму, тому альтернативним рішенням може стати імітаційне моделювання. Імітаційне моделювання дозволяє спростити процес розрахунку та оптимізації вимикача, що пришвидшує його конструкторську розробку.

Метою статті є побудова імітаційної моделі, яка дозволяє проаналізувати процес вимикання надшвидкодіючого вимикача постійного струму й дає можливість знизити фінансові витрати при розробці серійного продукту та надалі провести оптимізацію його параметрів.

Виклад основного матеріалу. Захист тягової мережі постійного струму міського електричного транспорту та метрополітену вимагає від автоматичного вимикача високої швидкодії, здатності розсіювати енергію, накопичену в контактній мережі, та високу надійність. Комутація постійного струму значно складніша за комутацію змінного. Якщо в мережах змінного струму фізичні процеси сприяють гасінню дуги завдяки природному переходу струму через нуль, то в колах постійного струму цей ефект відсутній. Дугогасильна камера, розділяючи велику дугу на менші, лише частково вирішує проблему.

Попри значні успіхи в розробці вимикачів постійного струму, зокрема збільшення струмів вимкнення, покращення динамічних характеристик та скорочення часу вимикання, існуючі рішення не досягли рівня надійності, безпеки та економічності вакуумних вимикачів змінного струму. Головною проблемою залишається ненадійність головного контакту та необхідність регулярного обслуговування дугогасної камери, що підвищує вартість експлуатації та свідчить про недосконалість технології [8]. Екологічна безпека також залишається питанням, що потребує покращення. Фактично, технологія комутації постійного струму практично не змінювалася із середини минулого століття. На відміну від цього, технологія комутації змінного струму давно вирішила більшість цих проблем, використовуючи вакуумне середовище (або інертний газ), відсутність газовиділення та необхідності обслуговування контактів, що робить її значно надійнішою та безпечнішою.

У ТОВ «Плутон ІС» розроблено гібридний вимикач постійного струму AFB на струми 2,5 та 4 кА і напругою до 1000 В (рис. 1), який поєднує механічні комутаційні елементи із силовими електронними компонентами, дозволяючи переривати струм без виникнення дуги [8; 9].

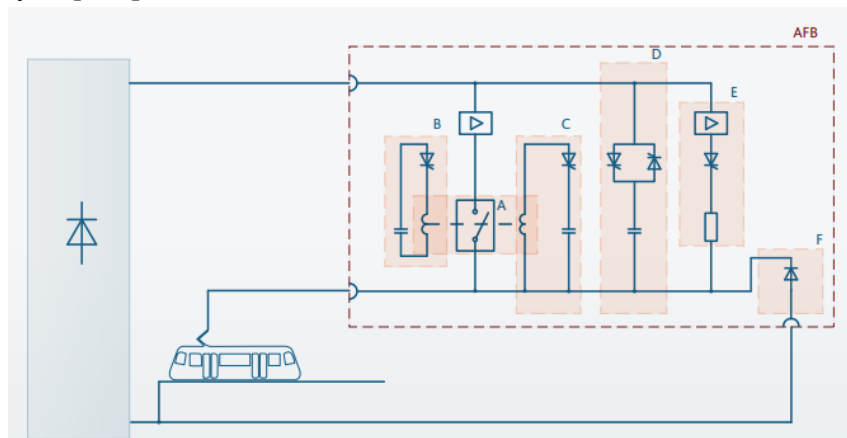


Рис. 1. Структурна схема вимикача AFB

Джерело: розроблено автором за [8].

Перед вмиканням ланцюг Е перевіряє наявність короткого замикання в контактній мережі. Вмикання автоматичного вимикача відбувається за допомогою електромагнітного приводу В. При отриманні команди на вимикання, система управління активує тиристор С, що перенаправляє енергію високовольтного конденсатора на котушку вимикання. Створене магнітне поле запускає механізм розмикання контактів вакуумної камери А. Під час розмикання виникає дуга, яка гаситься енергією попередньо зарядженого конденсатора. Струм розряду конденсатора, керований тиристором D, подається в протифазі до основного струму силового кола. Коли їх алгебраїчна сума досягає нуля, дуга гасне, і контакти остаточно розмикаються, перериваючи струм. Надлишок енергії контактного проводу замикається через зворотний діод F [8].

Вимикач AFB характеризується надшвидкою дією з часом вимикання менш як 1 мс на відміну від традиційних вимикачів з власним часом вимикання 4,5 мс та більше [10]. Подальше покращення характеристик вимикача потребує або проведення фізичного експерименту при різних параметрах ланцюга гасіння D (ємність конденсатора, індуктивність дроселя, момент включення тиристора відносно початку комутації, або побудови імітаційної моделі для віртуальних експериментів. Фізичний експеримент пов'язаний з фінансовими витратами, можливістю виникнення аварійних ситуацій та складністю реалізації, тому було побудовано імітаційну модель в середовищі PSIM 2023 від Altair, що призначено для аналізу пристроїв силової електроніки, електромеханіки, джерел електроживлення тощо [11].

На рис. 2 зображено модель автоматичного вимикача AFB-25 для аналізу процесів вимикання струму короткого замикання.

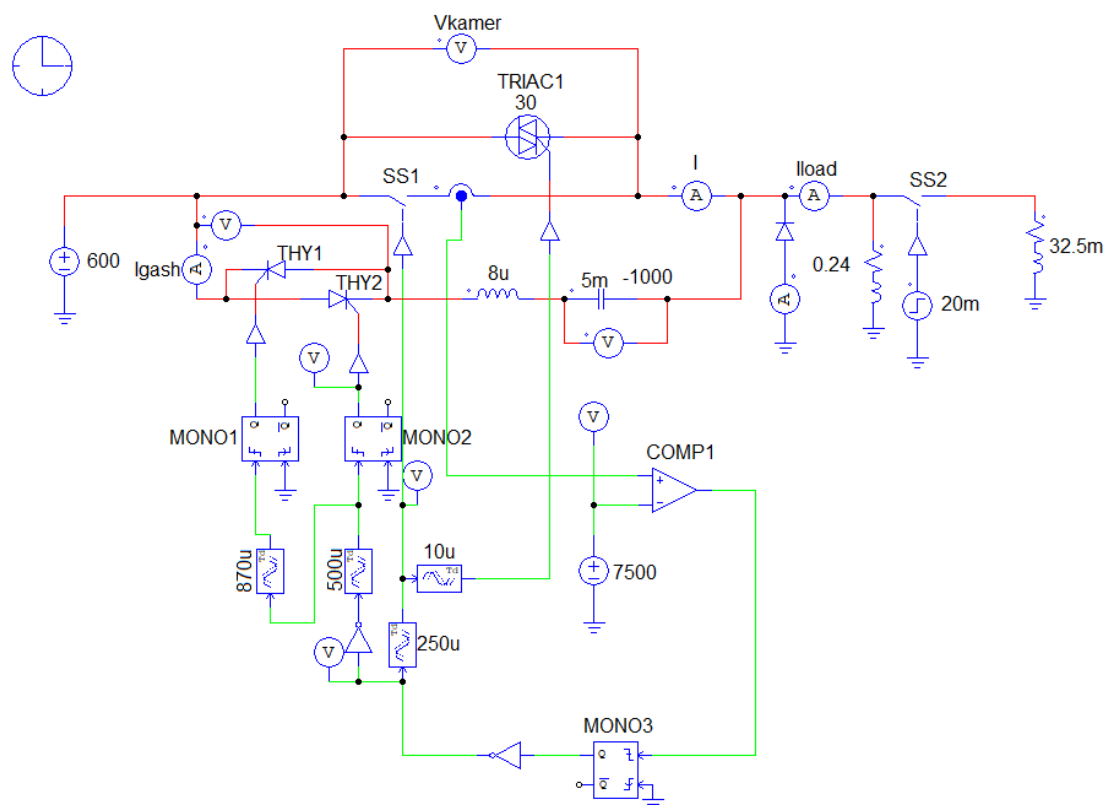


Рис. 2. Імітаційна модель вимикача AFB-25

Джерело: розроблено автором.

Випрямляч тягової підстанції моделюється у першому наближенні джерелом ЕРС, з напругою 600 В. Ідеальний ключ SS1 використано для імітації вакуумної камери, послідовно з якою увімкнено датчик для вимірювання робочого струму через вимикач. Паралельно камері підключено ланцюг гасіння, який складається із зустрічно-паралельних

тиристорів THY1, THY2, індуктивності величиною 8 мкГн та конденсатора ємністю 5 мФ з початковим зарядом негативною напругою -1000 В. Також паралельно вакуумній камері додано симістор TRIAC1, який своєю пороговою напругою імітує падіння напруги на дузі після її виникнення. Відомо [12], що падіння напруги на дузі у вакуумі описується формулою

$$U = U_c + U_a + E \cdot l, \quad (1)$$

де U_c – напруга катодної плями (зазвичай становить 15-30 В); U_a – напруга на аноді (зазвичай 2-5 В); E – напруженість електричного поля в стовпі дуги ($10^{-4} - 10^{-5}$ В/м); l – довжина дуги. Зважаючи, що у вимикачі AFB, який працює з напругою до 1000 В немає потреби використовувати повний хід вакуумної камери, розрахованої для напруги 35 кВ, зазор між її електродами обмежений лише 4 мм. При цьому падінням напруги на стовпі дуги знехтуємо, а порогову напругу TRIAC1 прийнято 30 В. Навантаження прийнято рівним 0,24 Ом, що відповідає протіканню номінального струму 2,5 кА. Ключем SS2 навантаження в момент часу 20 мс шунтується, що імітує виникнення короткого замикання. Також паралельно навантаженню підключено зворотний діод. Система управління являє собою компаратор, який порівнює значення робочого струму з уставкою (7500 А), сигнал з якого формує стійкий імпульс вимикання за допомогою одновібратора MONO3. Лінія затримки 250 мкс моделює затримку часу, пов'язану з вимірюванням струму, фільтрацією та обробкою інформації у мікроконтролері. Її вихідний сигнал вмикає вакуумну камеру SS1. Робочий струм при цьому перехоплюється симістором TRIAC1 із запізненням 10 мкс, що імітує процес формування дуги. Після зменшення струму до нуля симістор закривається, що моделює обрив дуги. Відповідно до імпульсу вимикання з MONO3 із затримкою часу, відповідно, 500 мкс та 870 мкс формуються імпульси управління для тиристорів гасіння.

На рис. 3 наведено результати моделювання струмів у схемі в процесі відключення вимикача AFB-25.

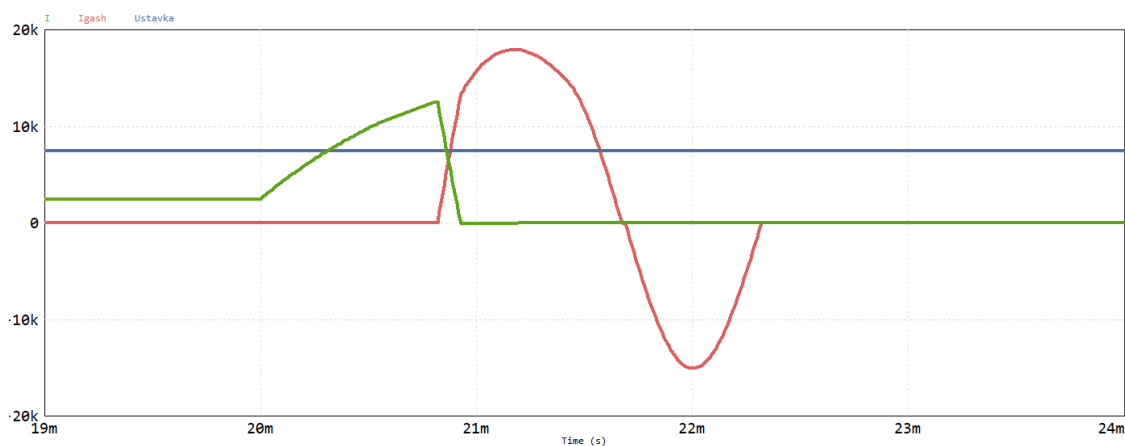


Рис. 3. Результат моделювання вимикача AFB-25

Джерело: розроблено автором.

Після перевищення значення уставки (синій тренд) 7500 А робочий струм (зелений) деякий час продовжує наростати, після чого формується імпульс гасіння (червоний), який швидко гасить дугу, після чого, перезаряджає конденсатор через навантаження та джерело живлення. Власний час вимикання AFB-25 становить менш як 1 мс.

Порівняння результатів моделювання з процесами вимикання реального вимикача підтверджує ідентичність кривих струмів, що протікають у ньому.

Подальша робота планується в уточненні моделі в частині вимикання зворотних струмів та струмів із великою швидкістю наростання, а також оптимізації параметрів схеми гасіння для зменшення ефективного часу вимикання та величини струму гасіння.

Висновки. У статті презентовано імітаційну модель надшвидкодіючого вимикача постійного струму в середовищі PSIM, за допомогою якої розраховано струми, які виникають при вимиканні короткого замикання у навантажені тягової підстанції. Модель підтвердила високу швидкість вимикання пристрою (власний час переривання струму становив менше за 1 мс), підтвердила свою адекватність реальним значенням та може бути використаною у подальшій оптимізації продукту.

Список використаних джерел

1. Hu, H., Liu, Y., Li, Y., et al. (2024). Traction power systems for electrified railways: Evolution, state of the art, and future trends. *Railway Engineering Science*, 32, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s40534-023-00320-6>.
2. Павленко, Т. П., Петренко, О. М., & Лукашова, Н. П. (2018). *Електропостачання транспорту: конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова.
3. Lindmayer, M., Marzahn, E., Mutzke, A., Ruther, T., & Springstubbe, M. (2004). The process of arc-splitting between metal plates in low voltage arc chutes. In *Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts* (pp. 28–34). Seattle, WA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/HOLM.2004.1353090>.
4. Dai, S., Xia, K., Shi, L., & Xie, M. (2020). Design on universal circuit breaker via improved gray wolf optimization algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 1–12. <http://dx.doi.org/10.1155/2020/8071057>.
5. Zhao, X., Wang, J., Wang, Y., Kang, Q., Long, C., & Shen, J. (2022). A novel DC circuit breaker with fast breaking capability in full current range. *Journal of Physics: Conference Series*, 2213(1), 012028. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2213/1/012028>.
6. Andersen, J. M., & Carroll, J. J. (1978). Applicability of a vacuum interrupter as the basic switch element in HVDC breakers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 97(5), 1893–1900.
7. Fuji Electric. (n.d.). *DC high-speed vacuum circuit breaker*. https://www.fujielectric.com/products/transmission_distribution/box/doc/23B1-E-0007.pdf.
8. Овсяникер, Д. Е., Стрункін, Г. Н., Шмаровоз, С. В., Станишевський, Д. С., & Михневич, М. И. (2019). Инновационное решение компании «Плутон» для распределения постоянного тока – бездуговой сверхбыстродействующий выключатель AFB. *METRO INFO International*, 1, 14–19.
9. Pluton. (n.d.). *AFB arc-free ultra high-speed DC circuit breaker*. <https://pluton.ua/en/products/innovative-solutions-for-dc-current-switching/afb-arc-free-ultra-high-speed-dc-circuit-breaker->
10. Secheron. (n.d.). *High-speed DC circuit breakers for fixed installations*. https://www.secheron.com/wp-content/uploads/2024/12/SG104309BEN_B14_Brochure_Circuit-breaker-DC_UR26-80S-IEEE-03.24.pdf.
11. Powersim. (n.d.). *PSIM user's guide*. <https://powersimtech.com/wp-content/uploads/2021/01/PSIM-User-Manual.pdf>.
12. Lafferty, J. M. (1980). *Vacuum arcs: Theory and application*. New York, NY: Wiley.

References

1. Hu, H., Liu, Y., Li, Y., et al. (2024). Traction power systems for electrified railways: Evolution, state of the art, and future trends. *Railway Engineering Science*, 32, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s40534-023-00320-6>.
2. Pavlenko, T. P., Petrenko, O. M., & Lukashova, N. P. (2018). *Elektropostachannia transportu: kon-spekt lektzii (dlia studentiv usikh form navchannia za spetsialnistiu 141 – Elektroenerhetyka, elektrotekhnika ta elektromekhanika) [Power supply for transport: lecture notes (for students of all forms of study in the speciality 141 – Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics)]*. O. M. Beketov National University of Urban Economy.
3. Lindmayer, M., Marzahn, E., Mutzke, A., Ruther, T., & Springstubbe, M. (2004). The process of arc-splitting between metal plates in low voltage arc chutes. In *Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts* (pp. 28–34). Seattle, WA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/HOLM.2004.1353090>.

4. Dai, S., Xia, K., Shi, L., & Xie, M. (2020). Design on universal circuit breaker via improved gray wolf optimization algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 1–12. <http://dx.doi.org/10.1155/2020/8071057>.
5. Zhao, X., Wang, J., Wang, Y., Kang, Q., Long, C., & Shen, J. (2022). A novel DC circuit breaker with fast breaking capability in full current range. *Journal of Physics: Conference Series*, 2213(1), 012028. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2213/1/012028>.
6. Andersen, J. M., & Carroll, J. J. (1978). Applicability of a vacuum interrupter as the basic switch element in HVDC breakers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 97(5), 1893–1900.
7. Fuji Electric. (n.d.). *DC high-speed vacuum circuit breaker*. https://www.fujielectric.com/products/transmission_distribution/box/doc/23B1-E-0007.pdf.
8. Ovsiankyer, D. E., Strunkin, H. N., Shmarovoz, S. B., Stanyshchyskyi, D. S., & Mykhnevych, M. I. (2019). Ynnovatsyonnoe reshennye kompanyy «Pluton» dlia raspredeleniya postoiannoho toka – bezduhovoivo sverkhbystrodeistvuiushchyy vykliuchatel AFB [Pluto's innovative solution for direct current distribution – the AFB arc-free ultra-fast circuit breaker]. *METRO INFO International*, 1, 14–19.
9. Pluton. (n.d.). *AFB arc-free ultra high-speed DC circuit breaker*. <https://pluton.ua/en/products/innovative-solutions-for-dc-current-switching/afb-arc-free-ultra-high-speed-dc-circuit-breaker->.
10. Secheron. (n.d.). *High-speed DC circuit breakers for fixed installations*. https://www.secheron.com/wp-content/uploads/2024/12/SG104309BEN_B14_Brochure_Circuit-breaker-DC_UR26-80S-IEEE-03.24.pdf.
11. Powersim. (n.d.). *PSIM user's guide*. <https://powersimtech.com/wp-content/uploads/2021/01/PSIM-User-Manual.pdf>.
12. Lafferty, J. M. (1980). *Vacuum arcs: Theory and application*. New York, NY: Wiley.

Дата першого надходження статті до видання: 22.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.11.2025

UDC 621.316.9

Hlib Strunkin¹, Andrii Shamrai²

¹M.Eng., engineer

“Pluton IC” LLC (Zaporizhia, Ukraine)

E-mail: strunkingleb@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1719-4132>. ResearcherID: [LNQ-2155-2024](https://orcid.org/0009-0009-1719-4132)

²Postgraduate Student of Electrical Machine Department

National University “Zaporizhzhia Polytechnic” (Zaporizhia, Ukraine)

Deputy CEO “Pluton IC” LLC (Zaporizhia, Ukraine)

E-mail: Andrey.Shamray@pluton.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3516-1989>

SIMULATION OF ULTRA-FAST ARC-LESS DC CIRCUIT BREAKER TRIPPING

Information on the current state of protection of the DC contact network of urban electric transport and the subway is provided. It is shown that it is possible to increase the speed of automatic circuit breakers and their reliability when using short-circuit current tripping using a vacuum chamber. For forced arc extinguishing in a vacuum chamber, discharge methods of a pre-charged capacitor using thyristors in the antiphase of the short-circuit current are proposed. The operation of the AFB type automatic circuit breaker developed by “Pluton IC” LLC is described. For further optimization of ultra-high-speed circuit breakers, there is a need to create a simulation model. A simulation model of the AFB-2.5 ultra-high-speed DC circuit breaker has been developed in the PSIM program. A detailed description of the simulation model is provided. The vacuum chamber is modeled by an ideal switch, in parallel with which an extinguishing circuit is connected. To simulate the voltage drop across the arc in the vacuum chamber, a linear model was used, which depends on its length, which is simulated by the threshold voltage of the triac. The signal from the current sensor is compared with the setpoint using a comparator. The delay elements form the necessary delays during the signal passage. The analysis was performed using a model of the circuit breaker tripping processes. The intrinsic tripping time of the ultra-fast DC circuit breaker was less than 1 ms, which corresponds to the results obtained during the operation of a real AFB-2.5 circuit breaker at a traction substation. Further steps are planned for using and improving the model when tripping reverse currents and currents with a high rate of increase, as well as for optimizing the circuit breaker parameters.

Keywords: ultra-fast circuit breaker; vacuum chamber; direct current; simulation model; PSIM; short-circuit current tripping.

Fig.: 3. References: 12.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-420-429](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-420-429)

УДК 631.937.33

Сергій Вікторович Єрмолов¹, Данііл Юрійович Денисов²¹аспірант кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: sergey.ermolow@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8786-2430>

ResearcherID: MBI-0037-2025

²здобувач вищої освіти

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: den.danya.denysov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1887-068X>

Scopus Author ID: 59810175100

МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ СИСТЕМ КВАДРОКОПТЕРА

Розвиток сучасних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) вимагає підвищення надійності та ефективності їхніх електроенергетичних систем. У статті досліджено метод моделювання електроенергетичних процесів у системі квадрокоптера, що дозволяє оцінити зміну напруги, струму та енергоспоживання в різних умовах польоту. Проведено аналіз впливу маси корисного навантаження, швидкості руху та форми траєкторії на стабільність роботи квадрокоптера та тривалість автономного польоту. Показано, що використання математичного моделювання дає можливість оптимізувати систему живлення й підвищити ефективність експлуатації безпілотного апарата.

Ключові слова: квадрокоптер; електроенергетичні процеси; моделювання; енергоспоживання; стабільність роботи; оптимізація живлення; безпілотні літальні апарати; MATLAB.

Рис.: 5. Табл.: 1. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА), зокрема квадрокоптери, набувають дедалі більшого поширення в різних сферах, включаючи аграрний сектор, екологічний моніторинг, інфраструктурний аудит та рятувальні операції. Однією з ключових складових ефективної експлуатації таких апаратів є їхня енергетична автономність та оптимізація споживання енергії. За даними дослідження “Quadrotor Model for Energy Consumption Analysis”, середнього класу квадрокоптер вагою 4,689 кг використовували як тестову платформу для моделювання енергоспоживання під час маневрів, демонструє значну енергоефективність при використанні спеціально розроблених динамічних моделей для аналізу споживання енергії під час тривалих польотів на відкритому повітрі [1; 2].

Моделювання енергетичних процесів у квадрокоптерах є важливим інструментом для прогнозування тривалості польоту, оптимізації використання акумуляторних батарей та зменшення ризику втрат енергії під час маневрів. Використання спеціалізованих програмних середовищ для створення таких моделей дозволяє враховувати вплив багатьох факторів, включаючи атмосферні збурення, параметри системи керування та експериментальні дані, що забезпечує більш точний аналіз енергетичних процесів [3-5]. Зважаючи на високі вимоги до енергетичної ефективності квадрокоптерів, особливо в умовах обмеженого часу автономного польоту, дослідження в галузі моделювання енергетичних процесів є надзвичайно актуальними. Розробка та вдосконалення таких моделей сприятиме підвищенню надійності та ефективності безпілотних літальних апаратів, що, своєю чергою, розширить їхнє застосування в різних сферах діяльності [6].

Постановка проблеми. Квадрокоптери потребують надійних електроенергетичних систем для забезпечення стабільної та безпечної роботи під час польотів у різних сферах. Сучасні квадрокоптери мають складні системи живлення, що включають акумуляторні батареї, електроприводи та контролери, які повинні ефективно взаємодіяти між собою для підтримки необхідного рівня енергії протягом усього часу польоту.

З розвитком технологій, інтеграції нових акумуляторів, удосконалення систем управління та автоматизації польоту, квадрокоптери стали більш автономними та енергоефективними. Це дозволяє збільшувати тривалість польоту, підвищувати стабільність під час виконання маневрів і зменшувати ризик аварійних ситуацій. Однак навіть за сучасного рівня розвитку існує потреба у точному прогнозуванні роботи електроенергетичних систем у реальних умовах, що включає зміну навантажень, швидкостей та висоти польоту.

Сьогодні методи моделювання електроенергетичних процесів у квадрокоптерах залишаються недостатньо дослідженими. Особливо актуальною є відсутність комплексних моделей, що враховують вплив маси корисного навантаження, швидкості польоту та форми траєкторії на енергоспоживання. Це ускладнює оптимізацію системи живлення та підвищення надійності польотів, що обмежує можливості практичного застосування квадрокоптерів у складних та критично важливих умовах. Тому виникає необхідність у розробці ефективних методів моделювання електроенергетичних процесів, які дозволять аналізувати роботу системи живлення, прогнозувати витрати енергії та оптимізувати роботу квадрокоптера для підвищення його ефективності та надійності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема енергетичної ефективності безпілотних літальних апаратів, зокрема квадрокоптерів, останніми роками привертає значну увагу науковців. У низці праць розглядається питання моделювання енергоспоживання та впливу конструктивних і експлуатаційних параметрів на тривалість польоту.

У роботі Hoffmann G. M. було проведено детальний аналіз динаміки квадрокоптера та представлено методи математичного моделювання, які стали основою для подальших досліджень у цій сфері [7]. У монографії Beard і McLain наведено комплексний опис теоретичних основ керування малими безпілотними апаратами, включаючи енергетичні аспекти роботи електроприводів [8]. У більш нових дослідженнях зосереджено увагу безпосередньо на моделюванні енергоспоживання. Так, у праці Quadrotor Model for Energy Consumption Analysis було представлено модель квадрокоптера середнього класу масою 4,689 кг для оцінки споживання енергії під час польотів за різних умов. Автори показали, що використання динамічних моделей дозволяє більш точно прогнозувати витрати енергії та визначати оптимальні режими роботи [1].

Окрему увагу приділено дослідженню впливу параметрів акумуляторних батарей та гвинтомоторних груп на ефективність систем живлення квадрокоптерів. У роботі Mahony, Kumar і Corke розглянуто питання оцінки та керування багатороторними апаратами, що безпосередньо пов'язано з оптимізацією енергетичних процесів [9]. Попри наявність значної кількості досліджень, питання комплексного аналізу енергоспоживання квадрокоптера з урахуванням маси корисного навантаження, швидкості польоту та форми траєкторії залишаються недостатньо вивченими. Саме тому доцільним є розроблення моделей, які б дозволяли прогнозувати витрати енергії з урахуванням цих параметрів та формувати практичні рекомендації щодо оптимізації роботи квадрокоптерів.

Мета дослідження. Метою даного дослідження є застосування методу моделювання електроенергетичних процесів у системі квадрокоптера для оцінки впливу основних параметрів польоту на енергоспоживання. Зокрема, поставлено завдання проаналізувати зміну стану заряду акумулятора та споживаного струму залежно від маси корисного навантаження, швидкості руху та форми траєкторії.

Реалізація цієї мети дозволяє визначити ключові фактори, що впливають на тривалість автономного польоту, та сформулювати практичні рекомендації щодо оптимізації системи живлення квадрокоптера для підвищення його ефективності та надійності.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри наявність значної кількості праць, присвячених моделюванню та аналізу роботи безпілотних літальних

апаратів, низка аспектів електроенергетичних процесів у квадрокоптерах залишається недостатньо дослідженою. Зокрема, більшість наявних моделей фокусуються або на аеродинамічних властивостях апарата, або на оптимізації системи керування, тоді як питання комплексного врахування енергетичних параметрів під час виконання реальних польотних завдань висвітлено фрагментарно.

Окремою проблемою є обмежена кількість досліджень, що аналізують вплив маси корисного навантаження, профілю траєкторії та швидкісних режимів на миттєве споживання струму та динаміку зміни рівня заряду акумулятора. Більшість наявних робіт описують ці залежності лише теоретично або на основі спрощених моделей, що не забезпечує достатньої точності при прогнозуванні автономності польоту. Недостатньо опрацьованими також залишаються питання взаємодії між електромеханічними процесами у двигунах, втрачаними на пропелерах, ефективністю перетворення енергії та реакцією системи керування в умовах змінних навантажень. Саме комплексне моделювання цих явищ у єдиному середовищі, зокрема MATLAB/Simulink, розглядається як перспективний напрям, але потребує подальшого розвитку та практичного підтвердження. Таким чином, потребує уточнення і подальшого дослідження вплив польотних параметрів на енергетичні характеристики квадрокоптера, а також формування узагальненої методики, що дозволить оцінювати енергоспоживання апарата у різних сценаріях реальної експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Розвиток безпілотних літальних апаратів, зокрема квадрокоптерів, відкрив широкі можливості їх застосування в різних сферах діяльності людини – від аерофотознімання та моніторингу місцевості до доставки вантажів і виконання наукових експериментів [10]. Незважаючи на конструктивну простоту та високу маневровість, квадрокоптери характеризуються обмеженим часом автономної роботи, що визначається запасом енергії акумуляторної батареї [9]. Саме тому дослідження енергетичних процесів у їхніх системах є надзвичайно актуальним для підвищення ефективності використання таких апаратів.

У загальному випадку тривалість польоту та рівень енергоспоживання квадрокоптера залежать від низки факторів: маси апарата з корисним навантаженням, швидкості руху, форми та складності траєкторії, а також режимів роботи електроприводів [8; 11]. Зміна будь-якого з цих параметрів призводить до відчутних відмінностей у витратах енергії, що може вплинути як на час автономного польоту, так і на можливість виконання поставленого завдання. Для дослідження цих процесів використовується математичний опис взаємозв'язку між електричними та механічними величинами системи квадрокоптера. Зокрема, важливим є аналіз залежностей між струмом і напругою живлення двигунів, споживаною потужністю та сумарною енергією, що витрачається під час виконання польоту [7]. Такі співвідношення дозволяють оцінити характер зміни енергетичних параметрів у різних умовах та сформулювати рекомендації щодо вибору оптимальних режимів роботи.

Енергетичні процеси в системі квадрокоптера визначаються взаємодією електричних параметрів джерела живлення та механічних характеристик електроприводів. Основними елементами, що споживають енергію, є безколекторні двигуни постійного струму, які через пропелери створюють підйомну силу. Для опису цих процесів застосовується низка класичних залежностей електротехніки та механіки [8; 9].

1. Рівняння електричного кола двигуна:

$$U = E + I \cdot R \quad (1)$$

де U – напруга живлення обмотки двигуна; E – електрорушійна сила, що виникає при обертанні ротора; I – струм, споживаний двигуном; R – активний опір обмотки.

Це рівняння показує баланс між прикладеною напругою, внутрішніми втратами та корисною ЕРС, що відображає перетворення електричної енергії на механічну.

2. Зв'язок частоти обертання і кутової швидкості:

$$\omega = \pi n, \quad (2)$$

де ω – кутова швидкість ротора (рад/с); n – частота обертання вала двигуна (об/с). Цей вираз дозволяє перейти від електричних характеристик двигуна до механічних, що важливо для визначення тяги пропелерів.

3. Момент двигуна через струм:

$$T = k_t \cdot I, \quad (3)$$

де T – електромагнітний момент двигуна; k_t – коефіцієнт моменту (характеризує перетворення струму в момент). Формула підкреслює, що керування струмом безпосередньо впливає на створювану тягу квадрокоптера.

4. Потужність двигуна:

$$P = U \cdot I, \quad (4)$$

де P – споживана потужність.

Ця залежність є ключовою для аналізу енергетичних процесів, оскільки дозволяє обчислити миттєве навантаження на джерело живлення.

5. Енергія, витрачена під час польоту:

$$W = \int P dt, \quad (5)$$

де W – сумарна енергія, спожита квадрокоптером; t – час польоту.

Цей вираз дає можливість визначити повний обсяг енергії, необхідної для виконання місії. Він безпосередньо пов'язаний із ємністю акумулятора та часом автономної роботи апарата.

Значення параметрів, що використовувалися для розрахунків наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Список параметрів, що використовувалися для розрахунків

№	Параметр	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
1	Маса квадрокоптера (без навантаження)	m_{drone}	1,2726	кг
2	Ємність акумулятора	C_{bat}	22,8	А·год
3	Максимальна потужність двигуна	P_{max}	160	Вт
4	Максимальний крутний момент двигуна	T_{max}	0,8	Н·м
5	Постійна часу двигуна	r	0,02	с
6	ККД двигуна (номінальний)	η	≈83	%
7	Діаметр пропелера	D	0,254	м
8	Коефіцієнт підйомної сили пропелера	K_{thrust}	0,1072	-
9	Коефіцієнт опору пропелера	K_{drag}	0,01	-
10	Густина повітря	ρ_{air}	1,225	Кг/м ³
11	Температура повітря	T_{air}	298 (25 °C)	К
12	Коефіцієнт аеродинамічного опору по осі X	C_{dX}	0,35	-
13	Коефіцієнт аеродинамічного опору по осі Y	C_{dY}	0,35	-
14	Коефіцієнт аеродинамічного опору по осі Z	C_{dZ}	0,6	-

Результати розрахунків

Одним із ключових факторів, що впливає на енергоспоживання квадрокоптера, є маса корисного навантаження [13]. Для аналізу було проведено серію розрахунків зі зміною маси вантажу в діапазоні від 0,5 до 2,2 кг. Результати наведено на рис. 1.

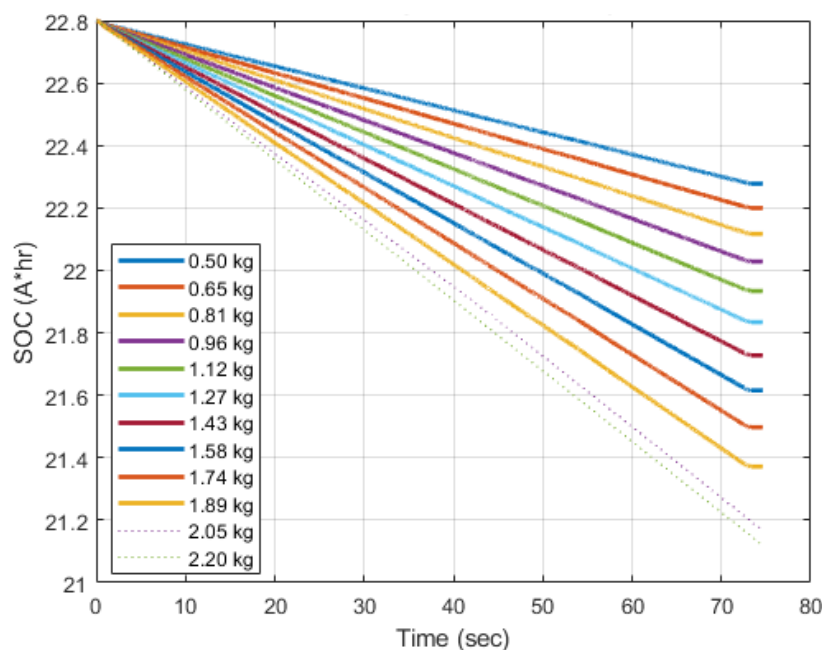


Рис. 1. Вплив маси корисного навантаження на рівень заряду акумулятора

На графіку наведено залежність стану заряду акумулятора (SOC) від часу для різних значень маси вантажу. Кожна крива відповідає окремому сценарію польоту з різною вагою вантажу. З результатів видно, що збільшення маси призводить до значного прискорення розрядження батареї. Це пояснюється тим, що при більшій вазі квадрокоптер повинен створювати вищу підйомну силу, а отже, двигуни споживають більший струм. Відповідно до формули (3) для створення більшого моменту (а отже, і тяги) потрібно збільшення струму I , що безпосередньо відображається у рівнянні миттєвої потужності (4).

Таким чином, при більшій масі вантажу відбувається підвищення потужності, яку споживає система, і як наслідок – швидше зменшення SOC.

На рис. 2 наведено накладені траєкторії польоту для різних значень маси вантажу.

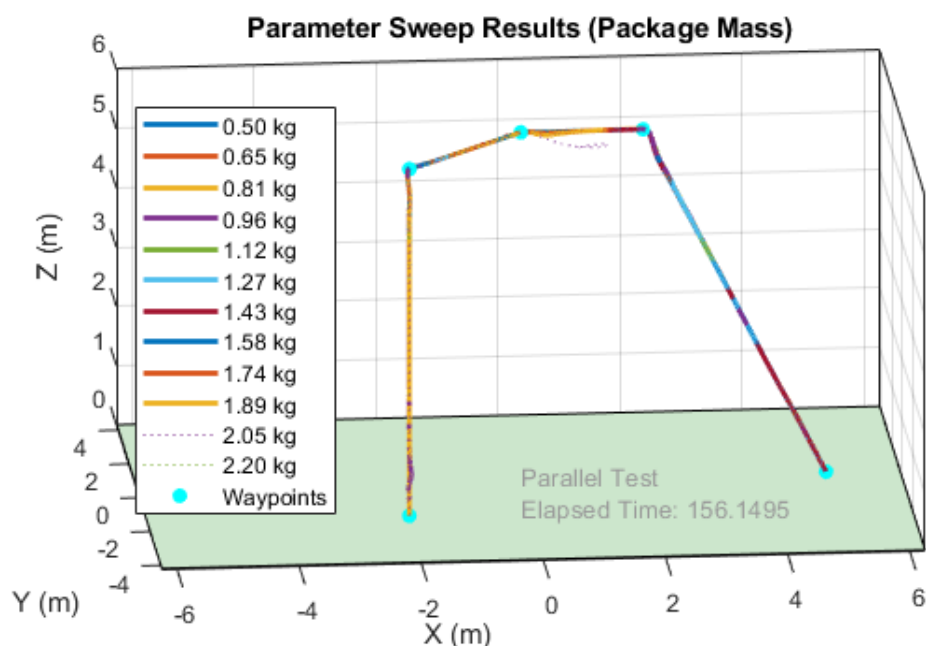


Рис. 2. Накладання траєкторій польоту для різних значень маси корисного навантаження

Видно, що при збільшенні навантаження траєкторія стає менш стабільною: з'являються відхилення від еталонного маршруту, а в окремих випадках квадрокоптер опускається нижче очікуваного рівня висоти. Ці відхилення пояснюються тим, що для підтримання рівноваги при більшій масі двигуни повинні створювати вищу тягу, що потребує збільшення струму споживання. При цьому система керування змушена вносити частіші корекції в положення та швидкість апарата.

Іншим важливим фактором, що визначає енергоспоживання квадрокоптера, є швидкість руху по траєкторії. Для дослідження було виконано параметричний аналіз при різних швидкостях польоту. Результати зображено на рис. 3.

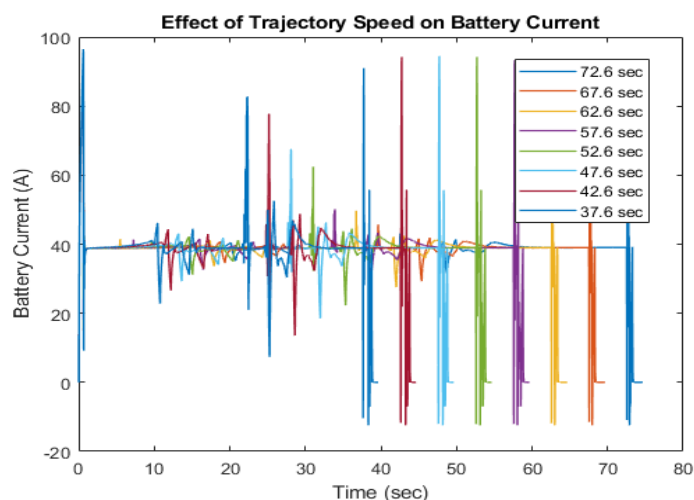


Рис. 3. Вплив швидкості руху по траєкторії на струм, споживаний акумулятором

На графіку наведено зміни струму акумулятора залежно від часу для різних швидкостей польоту. Криві показують, що зі зростанням швидкості збільшується як середнє значення струму, так і його пікові значення. Найбільш інтенсивні стрибки спостерігаються у моменти маневрів та зміни напрямку руху. З позиції теоретичних співвідношень, це відповідає рівнянню (4) де зростання струму I при незмінній напрузі живлення призводить до збільшення миттєвої потужності P . Таким чином, при вищих швидкостях польоту акумулятор працює в режимах з підвищеним навантаженням, що може створювати додаткові теплові проблеми.

На рис. 4 видно залишковий рівень заряду батареї (SOC) після виконання польоту з різними швидкостями.

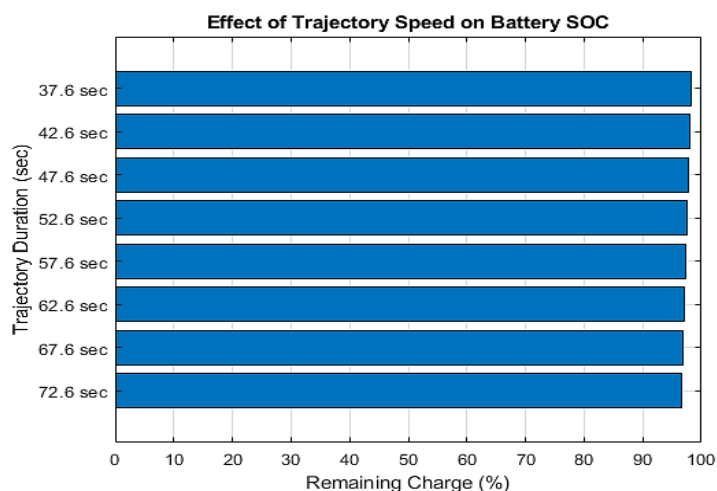


Рис. 4. Вплив швидкості польоту на залишковий рівень заряду акумулятора

Чітко видно, що чим вищою є швидкість руху, тим менший залишковий заряд після завершення місії. Це пояснюється тим, що при швидшому русі квадрокоптер витрачає більше енергії на підтримку стабільності та подолання аеродинамічного опору. Таким чином, збільшення швидкості польоту призводить до двох наслідків:

- зростання пікових струмів, що підвищує миттєве енергоспоживання;
- більш швидке зниження SOC, що скорочує загальну тривалість польоту.

Практично це означає, що при виборі режимів руху необхідно враховувати компроміс між швидкістю доставки та часом автономної роботи квадрокоптера.

Крім маси навантаження та швидкості руху, на енергоспоживання квадрокоптера впливає геометрія траєкторії польоту. Для дослідження було обрано два різних маршрути: «Zig-Zag» (зі значною кількістю поворотів і маневрів) та «L-shaped» (із простішою формою). Результати зображено на рис. 5.

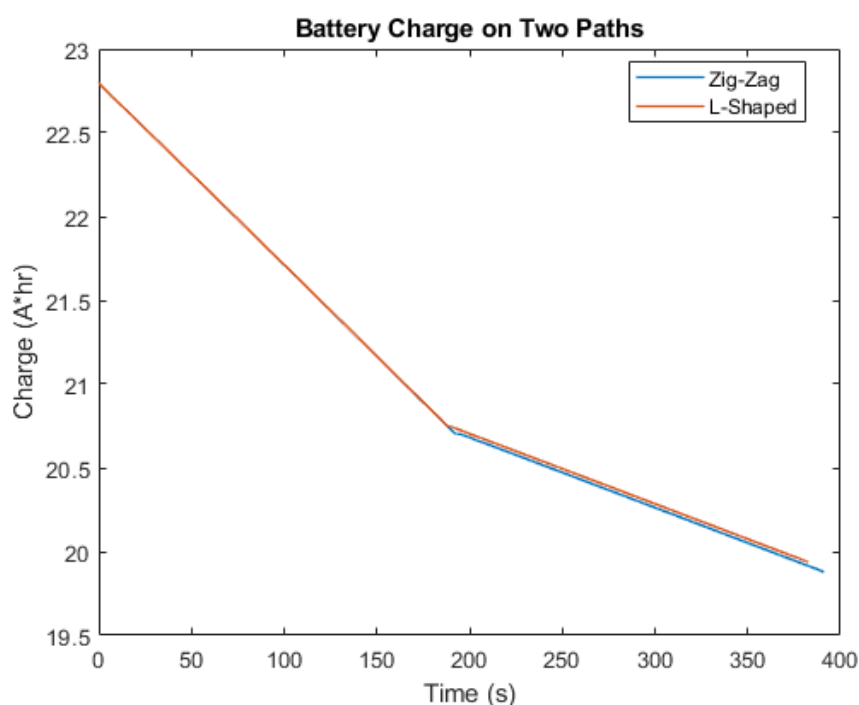


Рис. 5. Порівняння зміни заряду батареї для двох варіантів траєкторій польоту

На графіку наведено залежність зміни заряду акумулятора (в ампер-годинах) від часу для двох розглянутих маршрутів. Видно, що при русі за траєкторією типу «Zig-Zag» витрати енергії є більшими, ніж при польоті за маршрутом «L-shaped». Це пояснюється тим, що часті зміни напрямку потребують від двигунів додаткових зусиль для стабілізації апарата, що призводить до зростання споживаного струму.

Фізично цей ефект узгоджується з виразами (3) та (4). Оскільки в моменти маневрів збільшується потрібний момент T , відповідно зростає струм I , що викликає короточасні піки потужності P . При множинних маневрах ці пікові навантаження накопичуються й значно прискорюють розряд акумулятора.

Отже, проведений аналіз залежності споживання енергії від форми траєкторії показав, що складні маршрути з частими маневрами призводять до зростання миттєвих струмових навантажень та швидшого зниження рівня заряду акумулятора. Порівняння двох шляхів демонструє, що траєкторії зі збільшеною кількістю поворотів формують додаткові енергетичні витрати, що узгоджується з відомими моделями динаміки квадрокоптерів. Таким чином, форма траєкторії є суттєвим фактором, який необхідно враховувати під час планування польотних завдань.

Висновки. Проведене дослідження електроенергетичних процесів у системі квадрокоптера дозволило встановити декілька важливих закономірностей:

1. **Маса корисного навантаження** має прямий вплив на витрати енергії. Зі збільшенням маси відбувається зростання струму споживання двигунами, що призводить до швидшого зниження стану заряду (SOC) та скорочення часу автономної роботи.

2. **Швидкість польоту** визначає як середній рівень енергоспоживання, так і пікові навантаження на систему. При підвищенні швидкості зростають пікові струми, що супроводжується підвищенням миттєвої потужності та швидшим розрядженням батареї. Це створює додаткові вимоги до вибору джерела живлення й системи охолодження.

3. **Форма маршруту** також є важливим фактором. Складні траєкторії з великою кількістю маневрів («Zig-Zag») вимагають більших енергетичних витрат у порівнянні з простішими («L-shaped»), навіть при однаковій довжині шляху. Це пояснюється частими корекціями положення та орієнтації квадрокоптера.

Загалом отримані результати підтверджують правильність теоретичних співвідношень між електричними та механічними величинами та демонструють їх практичне значення для оцінки ефективності роботи квадрокоптера. На основі цих висновків можна сформулювати рекомендації щодо планування місій: оптимізація маси вантажу, вибір помірних швидкостей та спрощення траєкторій здатні значно збільшити тривалість автономного польоту.

Перспектива подальших досліджень. Отримані результати підтверджують важливість урахування маси вантажу, швидкості руху та форми маршруту при аналізі електроенергетичних процесів квадрокоптера. Водночас проведене дослідження відкриває багато напрямів для подальшої роботи.

1. **Розширення моделі живлення.** Доцільним є врахування детальніших характеристик акумулятора, зокрема залежності внутрішнього опору від рівня заряду та температури. Це дозволить точніше оцінювати динаміку розрядження в реальних умовах експлуатації.

2. **Урахування зовнішніх впливів.** Перспективним є моделювання впливу поривів вітру, зміни температури навколишнього середовища та аеродинамічних збурень, що можуть суттєво впливати на споживання енергії.

3. **Аналіз системи керування.** Важливим напрямом є дослідження ефективності алгоритмів стабілізації та навігації, оскільки їхня робота визначає характер струмових піків і загальну економію енергії під час польоту.

4. **Використання альтернативних джерел живлення.** Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оцінку застосування високоефективних літій-полімерних та літій-сірчаних акумуляторів, а також гібридних рішень (поєднання акумуляторів із сонячними панелями чи паливними елементами).

5. **Практичні експерименти.** Наступним кроком є експериментальна перевірка результатів моделювання на реальному зразку квадрокоптера. Це дозволить верифікувати модель та зробити висновки щодо її точності й застосовувати їх у практичних завданнях.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання текстів.

Під час написання наукової статті в деяких випадках був використаний штучний інтелект (GPT-5). ШІ дозволяє швидше знайти потрібну інформацію, яка була перевірена та вказана в списку використаних джерел.

Список використаних джерел

1. Jacewicz, M., Żugaj, M., Głębocki, R., & Bibik, P. (2022). Quadrotor model for energy consumption analysis. *Energies*, 15(19), 7136. <https://doi.org/10.3390/en15197136>.
2. Ghafir, S., Alam, M. A., Siddiqui, F., & Naaz, S. (2023). Load balancing in cloud computing via intelligent pso-based feedback controller. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 100948. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2023.100948>.

3. Тихоміров, М. Н. Р. (2025). *Моделювання процесів керування безпілотних літальних апаратів*. ЧНУ ім. П. Могили. <https://krs.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2935/1/%D0%A2%D1%96%D1%85%D0%BE%D0%BC%D1%96%D1%80%D0%BE%D0%B2%20%D0%9C%D0%9D%D0%A0.pdf>.
4. Data-efficient modeling for power consumption estimation of quadrotor operations using ensemble learning. (2023). *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 39, 100687. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1270963823006879>.
5. Betancourt, H., Rahman, A., & Vasant, P. (2024). Predicting power consumption of drones using explainable optimized mathematical and machine learning models. *The Journal of Supercomputing*. <https://doi.org/10.1007/s11227-025-07105-0>.
6. Choudhury, S., & Prasad, R. (2023). *A comparative study on energy consumption models for drones*. SSRN. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4356073.
7. Hoffmann, G., Huang, H., Waslander, S., & Tomlin, C. (2007). Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment. In *AIAA guidance, navigation and control conference and exhibit*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2007-6461>.
8. Beard, R., & McLain, T. (2012). *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton University Press.
9. Mahony, R., Kumar, V., & Corke, P. (2012). Multirotor Aerial Vehicles: Modeling, Estimation, and Control. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 19(3), 20–32. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6290694>.
10. Valavanis, K. P., & Vachtsevanos, G. J. (2015). *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1>.
11. Zhang, J., Campbell, J. F., Sweeney II, D. C., & Hupman, A. C. (2021). Energy consumption models for delivery drones: A comparison and assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 90, 102668. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102668>.
12. Grewe, L., Dreier, D., & Heuermann, H. (2022). Drone flight data reveal energy and greenhouse gas emissions. *Nature Communications*, 13, 4829. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32486-0>.
13. Kierzkowski, A., Dziewoński, B., Kaliszuk, K., & Kucharski, M. (2025). Evaluation of light electric flying-wing unmanned aerial system energy consumption during holding maneuver. *Energies*, 18(5), 1300. <https://doi.org/10.3390/en18051300>.

References

1. Sánchez-García, J., Heredia, G., & Ollero, A. (2022). Quadrotor Model for Energy Consumption Analysis. *Energies*, 15(19), 7136. <https://doi.org/10.3390/en15197136>.
2. Torabbeigi, M., Maghsoudi, A., & de Koster, R. (2023). Power consumption model for Unmanned Aerial Vehicles. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 39, 100948. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2023.100948>.
3. Tikhomirov, M. (2021). *Modeliuvannia protsesiv keruvannia bezpilotnykh litalnykh apparativ [Modeling of control processes of unmanned aerial vehicles]*. Petro Mohyla Black Sea National University. <https://krs.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2935/1/%D0%A2%D1%96%D1%85%D0%BE%D0%BC%D1%96%D1%80%D0%BE%D0%B2%20%D0%9C%D0%9D%D0%A0.pdf>.
4. Data-efficient modeling for power consumption estimation of quadrotor operations using ensemble learning. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 39, 100687 (2023). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1270963823006879>.
5. Betancourt, H., Rahman, A., & Vasant, P. (2024). Predicting power consumption of drones using explainable optimized mathematical and machine learning models. *The Journal of Supercomputing*. <https://doi.org/10.1007/s11227-025-07105-0>.
6. Choudhury, S., & Prasad, R. (2023). A Comparative Study on Energy Consumption Models for Drones. *SSRN Electronic Journal*. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4356073.
7. Hoffmann, G. M., Huang, H., Waslander, S. L., & Tomlin, C. J. (2007). Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment. *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2007-6461>.
8. Beard, R., & McLain, T. (2012). *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton University Press.
9. Mahony, R., Kumar, V., & Corke, P. (2012). Multirotor Aerial Vehicles: Modeling, Estimation, and Control. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 19(3), 20–32. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6290694>.

10. Valavanis, K. P., & Vachtsevanos, G. J. (2015). *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1>.
11. Al Zamil, A. M., & Jaradat, M. A. (2020). Energy consumption models for delivery drones: A comparison and assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 86, 102418. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102418>.
12. Grewe, L., Dreier, D., & Heuermann, H. (2022). Drone flight data reveal energy and greenhouse gas emissions. *Nature Communications*, 13, 4829. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9403403>.
13. Kierzkowski, A., Dziewoński, B., Kaliszuk, K., & Kucharski, M. (2025). Evaluation of Light Electric Flying-Wing Unmanned Aerial System Energy Consumption During Holding Maneuver. *Energies*, 18(5), 1300. <https://doi.org/10.3390/en18051300>.

Дата першого надходження статті до видання: 30.10.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.11.2025

UDC631.937.33

Sergey Yermolov¹, Daniil Denisov²

¹Postgraduate student of the Department of Electric Engineering and Information and Measuring Technologies
National University «Chernihiv Polytechnic» (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: sergey.ermolow@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8786-2430>

ResearcherID: MBI-0037-2025

² Higher Education Student

National University «Chernihiv Polytechnic» (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: den.danya.denysov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1887-068X>

Scopus Author ID: 59810175100

WAYS TO MODEL THE ELECTROENERGY PROCESSES OF A QUADCOPTER SYSTEM

The rapid development of unmanned aerial vehicles (UAVs), in particular quadcopters, requires ensuring high reliability and efficiency of their power supply systems. Since the duration of autonomous flight is strictly limited by battery capacity, accurate modeling of electrical energy consumption processes is crucial for predicting performance and optimizing system operation.

Quadcopters are complex technical systems which energy consumption depends on load mass, trajectory shape, and flight speed. However, the analysis of these dependencies is still insufficiently covered in scientific research, which limits the ability to optimize UAV operation.

Numerous works by researchers are devoted to UAV dynamics and control. For example, Hoffmann et al. (2007) presented quadrotor flight dynamics, and Mahony, Kumar & Corke (2012) described multirotor modeling and control. Recent studies focus on energy consumption, such as the Quadrotor Model for Energy Consumption Analysis (Sánchez-García et al., 2022), which demonstrated the effect of payload mass on battery discharge. However, comprehensive studies combining payload, trajectory, and speed remain scarce.

The combined influence of payload weight, trajectory parameters, and flight speed on UAV energy consumption has not yet been sufficiently studied. There is also a lack of models that would integrate these factors into a unified analysis of quadcopter electroenergy processes.

The objective of this study is to develop and apply a method of modeling electroenergy processes in a quadcopter system in order to evaluate how payload mass, flight trajectory, and speed affect energy consumption, current, and battery state of charge (SOC).

The research used MATLAB/Simulink models of a quadcopter system. Mathematical relationships between power, current, and energy were defined, and simulation results were analyzed. The obtained graphs demonstrate: the effect of payload mass on battery SOC; the effect of trajectory speed on battery current and SOC; the difference in battery charge for various flight paths. The analysis confirmed that an increase in payload mass or flight speed leads to higher energy consumption and faster battery discharge.

The conducted study confirmed that energy consumption of a quadcopter system strongly depends on payload mass, flight trajectory, and speed. Simulation results demonstrated clear correlations between these factors and battery performance, which allows for optimizing power supply systems and extending flight duration.

Keywords: quadcopter; UAV; power supply; energy consumption; modeling; MATLAB/Simulink; battery SOC; optimization.

Figures: 5. **Tables:** 1. **References:** 13.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-430-443](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-430-443)

УДК 697.3:697.9:620.9

Сергій Петрович Данилів¹, Павло Сергійович Гусєв²¹аспірант

Інститут загальної енергетики НАН України, (Київ, Україна)

E-mail: sergiy@hajster.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9842-5501>²аспірант

Інститут загальної енергетики НАН України, (Київ, Україна)

E-mail: gusiev@hajster.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1354-5181>

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ТА ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ, ВСТАНОВЛЕНИХ В УКРАЇНІ

У статті представлено порівняльний аналіз двох основних типів теплових насосів: повітря/вода (ASHP) та геотермальних (GSHP) на основі даних систем, встановлених в Україні. В рамках дослідження отримано дані продуктивності та ефективності теплових насосів. Окремо проаналізовано вплив типу системи опалення/охолодження на параметри продуктивності теплонасосного обладнання. Також, розглянуто вплив змін клімату на ефективність роботи обох типів теплових насосів. Як результат дослідження, виділено ключові фактори, які слід враховувати в майбутньому під час планування систем з тепловими насосами. Крім цього, надано рекомендації щодо вибору типу теплових насосів, враховуючи прогнозовані кліматичні зміни та умови експлуатації.

Дослідження показало, що середній SCOP геотермальних ТН становив 4.8, а повітряних - 3.8. Ключовим чинником ефективності виявилася температура теплоносія: низькотемпературні системи підвищують SCOP на 20-30 %. Кліматичні зміни, що призводять до зростання середньої температури опалювального сезону, сприяють ширшому впровадженню повітряних теплових насосів. Внаслідок збільшення тривалості жарких періодів, зростає навантаження на системи охолодження, що додає переваги геотермальним тепловим насосам, завдяки можливості облаштування системи природного охолодження будівель (NC - natural cooling).

Ключові слова: геотермальні теплові насоси; повітряні теплові насоси; COP; SCOP; низькотемпературні системи опалення.

Рис.: 6. Табл.: 3. Бібл.: 24.

Актуальність теми дослідження. У загальному розподілі споживання енергії в Україні, витрати на теплопостачання будівель складають значну частину. Через військову агресію росії були втрачені значні промислові потужності, що призвело до зміни енергетичного балансу України, в якому основними споживачами стали житловий та комунальний сектори [1]. Зношена та моральна застаріла інфраструктура існуючих систем теплопостачання, їхня залежність від викопного палива потребують впровадження нових високоефективних та екологічних рішень, серед яких застосування технології теплових насосів відіграє ключову роль [2]. Подальша електрифікація всіх сфер економіки та можливість створювати децентралізовані системи теплопостачання ще більше підсилюють позиції теплонасосного обладнання.

Постановка проблеми. Суттєвою перевагою теплових насосів є те, що вони можуть бути використані не тільки в новому будівництві, але і під час реконструкції об'єктів різного призначення та розмірів [3; 4]. Тепловий насос може бути ефективно застосований як в житловому, так і промисловому секторах, задовольняючи потреби в опаленні, охолодженні та гарячому водопостачанні об'єктів будь-якої складності [5]. Також технологія теплових насосів успішно застосовується в промислових процесах, що потребують гарячої води чи пари [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Європейський ринок теплових насосів демонструє постійне зростання. Хоча після стрімкого зростання у 2022 та 2023 рр. відбувся деякий спад продажів. Так, за даними звіту EurObserv'ER [7], що створюється на замовлення Європейської Комісії, у 2022 році в країнах ЄС було встановлено 1 573 232 одиниць обладнання, а у 2023 році – 1 448 943 штук. Повітряні теплові насоси займають домінуючу позицію, з часткою більш ніж 90 % від загальної кількості встановлених при-

строїв. Водночас на фоні загального спаду ринку продажі геотермальних теплових насосів показали у 2023 році зростання – було встановлено 136 914 пристроїв проти 123 485 одиниць у 2022 році.

Лідерами європейського ринку є Франція, Німеччина, Нідерланди, Італія та Швеція. У цих країнах активно розвивається ринок як повітряних, так і геотермальних теплових насосів. У країнах півдня Європи, з більш м'яким кліматом, переважають повітряні теплові насоси. Водночас у Північній Європі та Альпійському регіоні встановлюється більша кількість геотермальних теплових насосів, що зумовлено сталою роботою таких пристроїв в умовах холодного клімату.

Український ринок теплових насосів останні роки активно розвивається, але поки що залишається дуже далеким від європейських обсягів. І без масштабних програм державної підтримки впровадження теплових насосів та ринкових цін на викопне паливо (зокрема, природний газ) не слід очікувати суттєвого збільшення кількості теплонасосних установок [8]. Офіційної статистики щодо обсягів продаж та виробництва теплової енергії тепловими насосами в Україні немає. Ринок характеризується практично повною залежністю від імпорту обладнання. Згідно з митними даними, у 2020 році було імпортовано 1433 теплові насоси, а у 2021 році – 3019 одиниць. У 2023–2024 рр. оціночний щорічний обсяг встановлення теплових насосів усіх типів та потужностей в Україні коливався від 1300 до 1500 одиниць. Більшість продажів припадає на теплові насоси «повітря-вода» потужністю 10...15 кВт [9].

Як і в країнах ЄС, в Україні частка повітряних теплових насосів становить близько 80 % [10]. Геотермальні теплові насоси використовуються переважно в комерційних проєктах або приватному житловому будівництві преміумсегмента, що зумовлено високою початковою вартістю бурових робіт та обладнання для геотермального поля. Водночас геотермальні системи забезпечують більш сталу ефективність під час зміни погодних умов та надають можливість пасивного охолодження будівель, що є дуже актуальним, враховуючи збільшення спекотних періодів, внаслідок кліматичних змін [11].

Впродовж останнього десятиріччя кліматичні умови в Україні зазнають суттєвих змін. За даними Українського Гідрометцентру та міжнародних дослідницьких інституцій спостерігається стійка тенденція до зростання середньорічної температури, яка в середньому становить +0,7...+1,1 °C за останні 15 років [12]. Уже зараз спостерігається скорочення тривалості опалювального періоду, пом'якшення зим та збільшення періодів літньої спеки [13].

Вибірка температурних даних аеропорту Жуляни (Київ, Україна) з 2014 по 2019 рік (рис. 1) підтверджує тенденцію підвищення середньої температури та відсутність екстремально низьких значень в зимовий період [14]. Найнижча температура, яка була зафіксована в межах цієї вибірки, припала на опалювальний сезон 2015/2016 та становила - 18,8 °C і при цьому, тривала лише протягом декількох годин. Водночас 67 % цього опалювального періоду (113 днів) зовнішня температура не опускалась нижче 0 °C і лише 30 днів мали температуру нижче за -2,5 °C, з яких тільки 3 дні були з температурою нижче ніж -15 °C.

Такі кліматичні зміни впливають на структуру ринку теплових насосів:

- повітряні теплові насоси (ASHP), внаслідок підвищення зимових температур та скорочення опалювального сезону, демонструють вищу продуктивність та зростання сезонного коефіцієнта продуктивності (SCOP). У поєднанні з нижчою вартістю встановлення ніж геотермальні установки, повітряні теплові насоси стають дедалі привабливішими для кінцевого споживача [15].

- зміна зовнішніх умов практично не впливає на роботу геотермальних теплових насосів (GSHP), їхню ефективність залишається майже сталою протягом всього опалювального сезону. Однак висока вартість є перешкодою для широкого впровадження геотермальних установок [16]. З іншого боку, можливість використання пасивного охолодження за рахунок низької температури геотермального поля, дає суттєву перевагу таким рішенням в умовах збільшення періодів спеки та зростання попиту на охолодження [17].

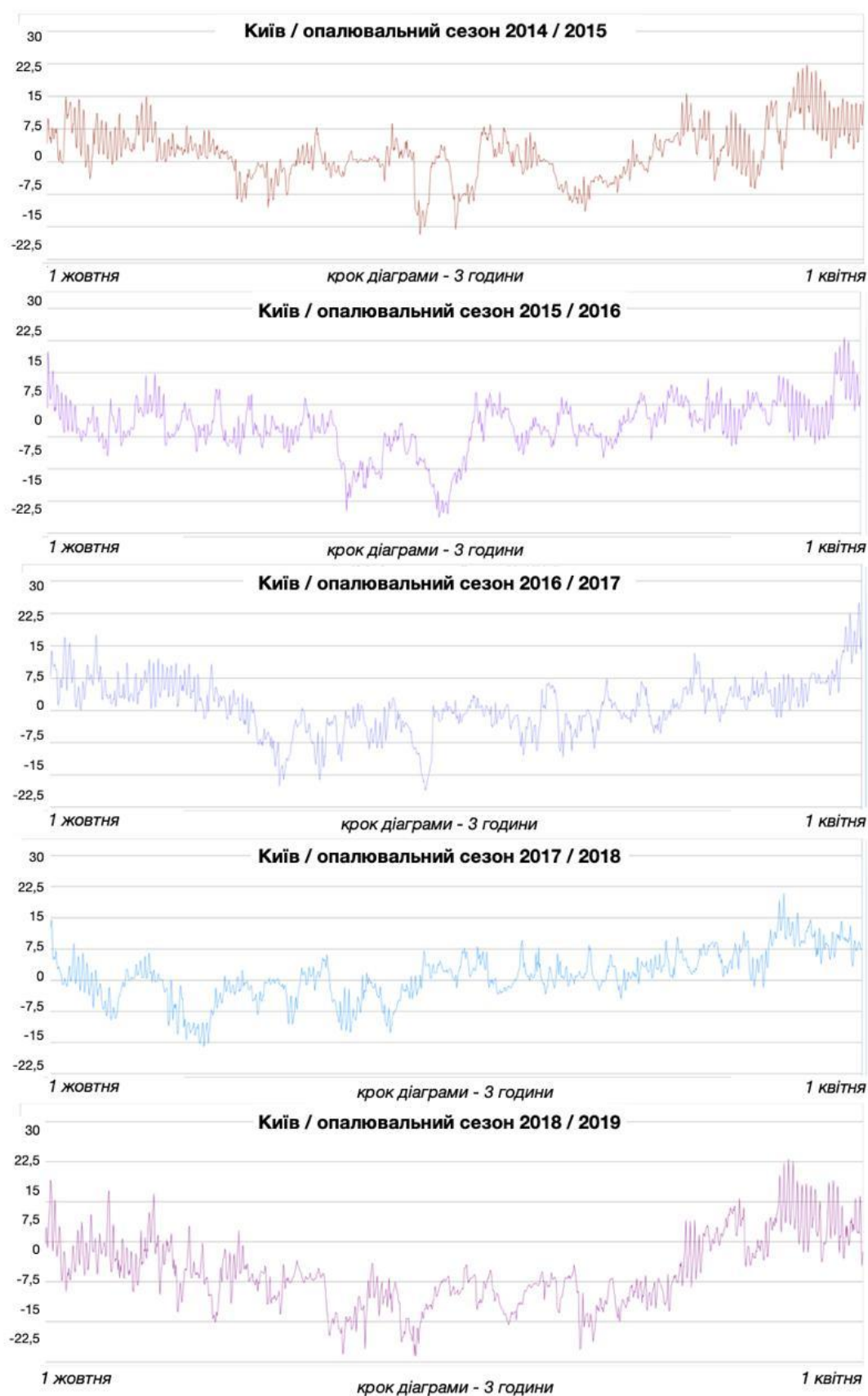


Рис. 1. Вибірка даних температур (опалювальний сезон) у м. Києві, аеропорт Жуляни в період з 2014 по 2019 роки

Важливо зазначити, що подальше підвищення температури веде до різкого зростання потреби в охолодженні. Згідно зі статистичними даними, кількість днів із температурою вище 30 °C в період з 2010 до 2023 року в Україні зросла на 20...40 %, залежно від регіону [18]. За таких умов, навантаження на охолодження в Україні наблизатиметься до потреб теплопостачання і в майбутньому може потребувати більше енергії ніж опалення. Такі зміни та тенденції повинні враховуватись при розрахунках потужності, виборі типу теплового насоса, конфігурації системи та економічному обґрунтуванні.

Умови експлуатації в Україні дозволяють ефективно використовувати як повітряні, так і геотермальні теплові насоси. Враховуючи актуальні температурні показники та прогнозовані кліматичні зміни, використання повітряних теплових насосів доцільне не лише у південних та західних регіонах з м'якшими зимами, але також стає більш обґрунтованим у центральних та північних областях України.

Вибір типу теплового насоса залежить від низки технічних, експлуатаційних та економічних параметрів. Основними показниками ефективності є COP (coefficient of performance / коефіцієнт перетворення), SCOP (Seasonal COP / сезонний COP), а також стабільність продуктивності в умовах низьких температур. Окрім цього, важливо враховувати навантаження системи охолодження та прогнозовані витрати на її функціонування [19; 20].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Одним з важливих факторів, що впливає на ефективність застосування теплових насосів є конфігурація системи опалення/охолодження. Попри те, що сьогодні як холодоагент дедалі частіше використовується R290 (пропан), що здатен забезпечити вищу температуру подачі теплоносія, низькотемпературні системи опалення залишаються важливим фактором загальної ефективності теплових насосів. Адже, зниження температури подачі в режимі нагріву на 1 °C збільшує COP системи орієнтовно на 2...4 % (залежить від типу теплового насоса, холодоагенту та температурного режиму) [21]. З іншого боку, використання води з вищою температурою в поверхневих системах охолодження збільшує ефективність установки в літній період. Тому оптимальним рішенням є поєднання теплових насосів з поверхневими системами: теплою підлогою, стіновими та стельовими панелями, особливо, якщо використовується пасивне охолодження (NC). Важливою перевагою такої комбінації є здатність поверхневих систем працювати як в режимі опалення, так і охолодження [22].

Метою статті є питання ефективності теплових насосів в кліматичних умовах України, яке порушувалося в декількох дослідженнях [23]. Проте оскільки кількість встановлених в Україні теплових насосів є відносно невеликою і переважна більшість пристроїв встановлено в приватному секторі, досліджень енергетичної ефективності діючих теплових насосів в Україні проводилось недостатньо.

У контексті вищезазначеного виникає потреба у глибшому аналізі ефективності діючих в Україні теплових насосів обох типів: повітряних і геотермальних, що і становить предмет дослідження цієї статті.

Метою дослідження є проведення порівняльного аналізу COP (коефіцієнт перетворення) та SCOP (сезонний COP) теплових насосів типу повітря-вода (ASHP) та геотермальних (GSHP) у реальних умовах експлуатації в Україні. Особливу увагу в дослідженні приділено:

- впливу кліматичних умов на ефективність теплових насосів;
- впливу типу джерела тепла на ефективність системи (повітря/грунт);
- ролі конфігурації систем опалення та охолодження

Виклад основного матеріалу.

Методи й матеріали.

Об'єкти дослідження. Для аналізу вибрано 11 об'єктів з тепловими насосами, потужністю від 13 до 84 кВт, які розташовані в містах Київ та Львів, їх основні характеристики наведено в Таблиці 1.

Всі об'єкти вибірки мають встановлені теплові насоси однієї торгової марки - Ватеркотте, що використовують той же самий фреон - R410. Також ці теплові насоси оснащені однаковим програмним забезпеченням. Усі досліджувані геотермальні теплові насоси використовують як джерело тепла вертикальні ґрунтові зонди.

Однакові конструктивні особливості теплових насосів та аналогічний холодоагент, дозволяють провести більше коректне порівняння параметрів ефективності. Усі теплові насоси, робота яких аналізується, обладнані системою енергетичного менеджменту, яка дозволяє фіксувати такі дані:

- кількість спожитої електроенергії;
- кількість виробленої теплової енергії;
- COP / SCOP (миттєвий / сезонний);
- аналіз даних в розрізі різних режимів роботи: опалення / ГВП;
- аналіз даних в розрізі різних часових проміжків: місяць/рік;
- частку роботи додаткового нагрівача.

Об'єкти дослідження розташовані у двох областях України, що мають деякі кліматичні відмінності. Розподіл об'єктів за регіонами дозволяє проаналізувати вплив різних кліматичних зон на продуктивність теплових насосів. Усі проекти, які досліджуються, є новими будівлями, що мають якісну теплоізоляцію та енергоефективні вікна. Обрані теплові насоси експлуатуються не менше 3-х років.

Таблиця 1. Основні характеристики об'єктів, що досліджуються

№	Регіон	Тип ТН	Модель та виробник ТН	Теплова потужність	Фреон	Джерело тепла	Тип системи опалення	Тип системи охолодження
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Київ	GSHP	Waterkotte Eco Touch 5056T	42,4 кВт (при B0/W35)	R410a	Вертикальні ґрунтові зонди	Тепла підлога + стіни + стельові панелі	Тепла підлога + стіни + стельові панелі
2	Київ	GSHP	Waterkotte Eco Touch 5112.5DT	84,8 кВт (при B0/W35)	R410	Вертикальні ґрунтові зонди	Тепла підлога + радіатори + конвектори	Фанкойли
3	Київ	GSHP	Waterkotte Eco Touch 5018	13,1 кВт (при B0/W35)	R410	Вертикальні ґрунтові зонди	Тепла підлога + стіни	Тепла підлога + стіни
4	Київ	GSHP	Waterkotte Eco Touch 5023	17,3 кВт (при B0/W35)	R410	Вертикальні ґрунтові зонди	Тепла підлога + стіни	Тепла підлога + фанкойли
5	Київ	GSHP	Waterkotte Eco Touch 5056T	42,4 кВт (при B0/W35)	R410	Вертикальні ґрунтові зонди	Тепла підлога + радіатори + конвектори	Фанкойли
6	Київ	ASHP	Waterkotte EcoTouch Air Kaskade 5030.5	26,8 кВт (при A2/W35)	R410	Зовнішнє повітря	Тепла підлога + стіни + стельові панелі	Тепла підлога + стіни + стельові панелі
7	Київ	ASHP	Waterkotte Eco Touch DA 5018.Ai	16 кВт (при A2/W35)	R410	Зовнішнє повітря	Тепла підлога + радіатори	Фанкойли
8	Львів	GSHP	Waterkotte Eco Touch 5056T	42,4 кВт (при B0/W35)	R410	Вертикальні ґрунтові зонди	Тепла підлога + радіатори	Стельові панелі + стіни

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	Львів	GSHP	Waterkotte Eco Touch 5018	13,1 кВт (при B0/W35)	R410	Вертикальні ґрунтові зони	Тепла підлога + конвектори	Фанкойли
10	Львів	ASHP	Waterkotte Eco Touch Split 5015.5	13,4 кВт (при A2/W35)	R410a	Зовнішнє повітря	Тепла підлога + радіатори	Фанкойли
11	Львів	ASHP	Waterkotte EcoTouch Air Kaskade 5030.5	26,8 кВт (при A2/W35)	R410	Зовнішнє повітря	Тепла підлога + стіни + стельові панелі	Тепла підлога + стіни + стельові панелі

Параметри аналізу. Усі показники беруться з вбудованих датчиків та приладів обліку енергії теплових насосів Waterkotte. Для кожного об'єкта проаналізовано такі показники: сезонний COP (SCOP) для режимів опалення, ГВП; питомі витрати електроенергії (кВт·год/м²/рік); вироблена теплова енергія в режимах опалення та ГВП; річна динаміка продуктивності в залежності від температури зовнішнього середовища; вплив типу розподільчої системи тепла/холоду (поверхневе / конвекційне / змішане) на SCOP.

Результати аналізу.

Для аналізу роботи теплових насосів використано опалювальний сезон 2023/2024 років. Період вибірки: 15.10.2024 - 31.03.2025. Отримані дані ефективності теплових насосів та температурні показники роботи установок приведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Дані аналізу продуктивності та ефективності теплових насосів (період вибірки: 15.10.2024 - 31.03.2025)

№	Регіон	Тип ТН	Теплова потужність	Тип системи опалення	COP, згідно з даними виробника	SCOP опалення	SCOP ГВП	Т.сер. опалення, °C	Т.макс. опалення, °C	Т. гаряча вода, °C
1	Київ	GSHP	42,4 кВт (при B0/W35)	Тепла підлога стельові панелі	4,5 (при B0/W35)	5,17	3,2	31,5	35,6	50
2	Київ	GSHP	84,8 кВт (при B0/W35)	Тепла підлога + радіатори + конвектори	4,5 (при B0/W35)	4,0	2,92	45,3	52	55
3	Київ	GSHP	13,1 кВт (при B0/W35)	Тепла підлога + стіни	5 (при B0/W35)	5,03	3,2	35,1	38,3	50
4	Київ	GSHP	17,3 кВт (при B0/W35)	Тепла підлога + стіни	4,7 (при B0/W35)	4,52	3,15	40,2	49	50
5	Київ	GSHP	42,4 кВт (при B0/W35)	Тепла підлога + радіатори + конвектори	4,5 (при B0/W35)	3,85	2,82	43,6	54	55
6	Київ	ASHP	26,8 кВт (при A2/W35)	Тепла підлога + стельові панелі	4,5 (при A2/W35)	4,02	2,58	33,6	35,2	55
7	Київ	ASHP	16 кВт (при A2/W35)	Тепла підлога + радіатори	4,6 (при A2/W35)	3,53	2,53	43,8	53	55
8	Львів	GSHP	42,4 кВт (при B0/W35)	Тепла підлога + стельові панелі	4,5 (при B0/W35)	5,0	3,17	33,4	38,7	52
9	Львів	GSHP	13,1 кВт (при B0/W35)	Тепла підлога + конвектори	5 (при B0/W35)	4,83	3,1	34,8	40,0	50
10	Львів	ASHP	13,4 кВт (при A2/W35)	Тепла підлога + радіатори	4,5 (при A2/W35)	3,63	3	41,4	52,7	50
11	Львів	ASHP	26,8 кВт (при A2/W35)	Тепла підлога + стельові панелі	4,5 (при A2/W35)	4,08	2,9	32,1	36,8	55

Аналіз даних ефективності теплових насосів (рис. 2 і 3) показує вплив зовнішньої температури на значення SCOP. Зменшення COP внаслідок зниження зовнішньої температури чітко простежується для повітряних теплових насосів. Значення COP повітряних ТН коливаються від 2,7 до 5.

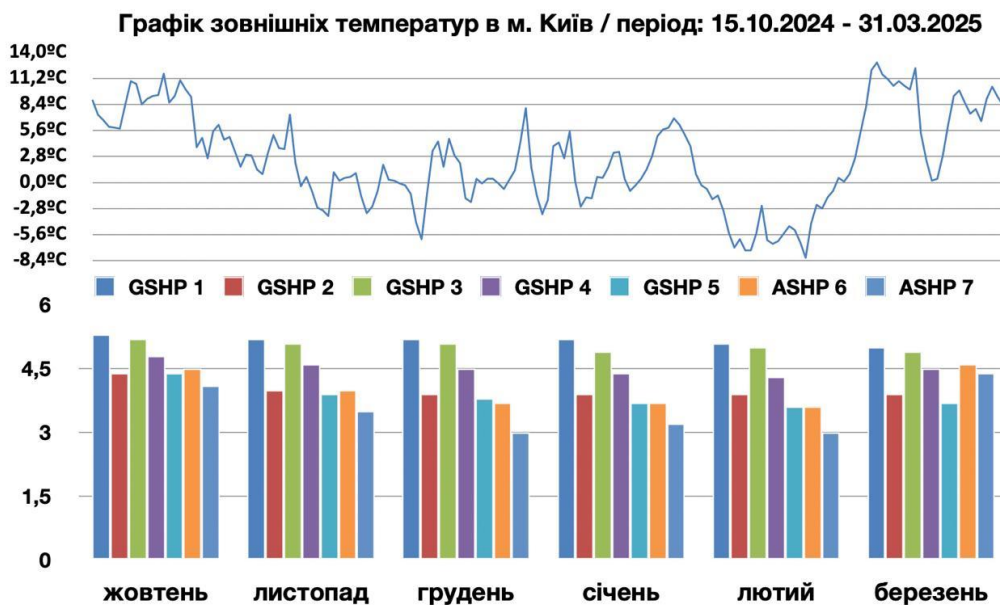


Рис. 2. Вплив зовнішньої температури на SCOP (опалення) геотермальних і повітряних теплових насосів (локація: Київ)

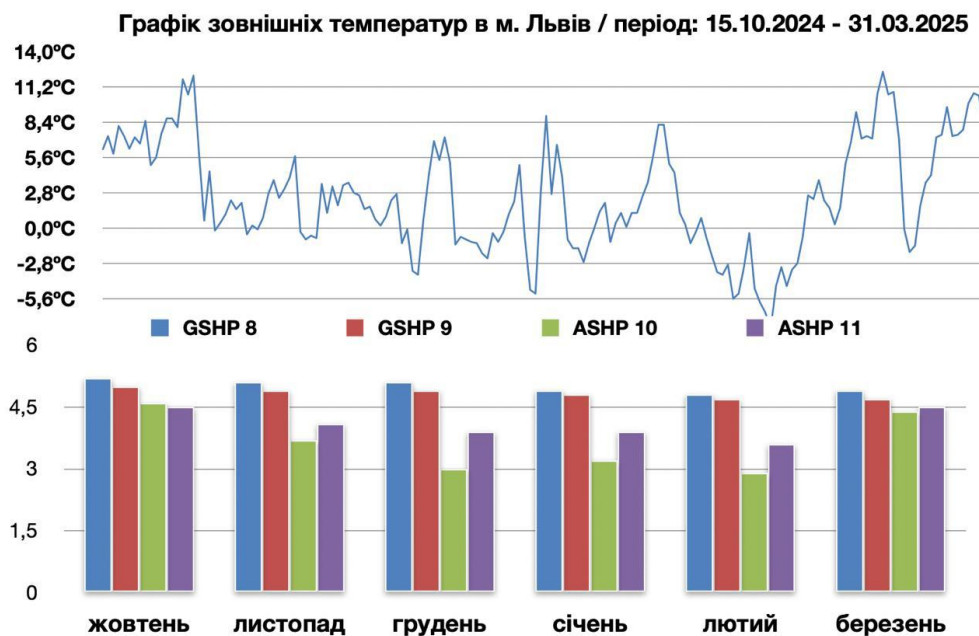


Рис. 3. Вплив зовнішньої температури на SCOP (опалення) геотермальних і повітряних теплових насосів (локація: Львів)

Повітряні теплові насоси на початку та в кінці опалювального сезону, коли температура зовнішнього повітря підвищується, мають схожі до геотермальних теплових насосів значення ефективності.

Для геотермальних теплових насосів характерні незначні коливання ефективності, які виникають внаслідок зростання тепловтрат будівлі, і як наслідок – необхідності підвищення температури подачі теплоносія. Також, на зменшення COP геотермальних насосів впливає зниження температури геотермального поля в другій половині опалювального сезону.

Слід зазначити, що в жовтні та березні повітряні теплові насоси мають вищу ефективність ніж окремі геотермальні теплові насоси. Загалом спостерігається більш стабільна робота геотермальних теплових насосів протягом усього опалювального сезону. А на зменшення ефективності GSHP більший вплив має зниження температури геотермального поля, а не зовнішня температура.

Графіки зовнішньої температури для Києва та Львова (рис. 2 і 3) мають схожі середні показники, що призводить до практично однакових параметрів ефективності для теплових насосів, що встановлені в цих двох регіонах.

Порівняння значень енергоефективності теплових насосів у режимі гарячого водопостачання (ГВП) вказує на ті ж самі тенденції, що і в режимі опалення. Нижчі температури зовнішнього повітря призводять до зменшення COP повітряних теплових насосів. Крім цього, вища температура теплоносія (55...60 °C) у режимі ГВП призводить до значного зниження SCOP теплових насосів, значення якого коливається 2,53 до 3,2.

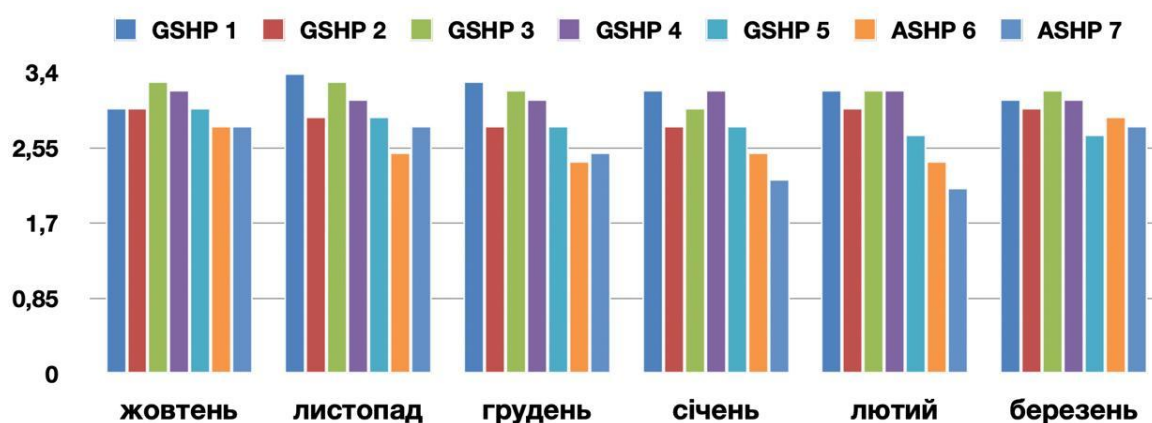


Рис. 3. Дані аналізу SCOP у режимі ГВП геотермальних і повітряних теплових насосів (локація – Київ)

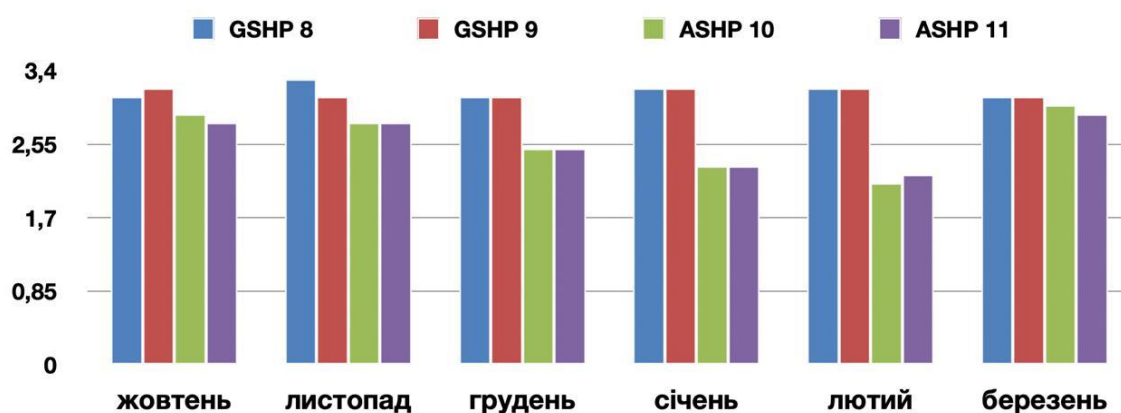


Рис. 4. Дані аналізу SCOP в режимі ГВП геотермальних і повітряних теплових насосів (локація – Львів)

Аналіз даних, наведених у табл. 3, чітко показує вплив конфігурації системи опалення на ефективність роботи теплових насосів. Завдяки використанню низькотемпературних поверхневих систем досягаються високі показники SCOP. У той час, як традиційні опалювальні пристрої (радіатори, конвектори) потребують температури теплоносія вище 45 °С, поверхневі системи (тепла підлога, стінові та стельові панелі) забезпечують комфортні умови всередині будівель, використовуючи теплоносії з температурою 30...35 °С.

Таблиця 3 – Таблиця даних енергоефективності теплових насосів у розрізі конфігурації системи опалення

№	Регіон	Тип ТН	Теплова потужність	Тип системи опалення	SCOP опалення	Т.сер. опалення, °С	Частка роботи додаткового нагрівача, %
<i>Геотермальні теплові насоси</i>							
1	Київ	GSHP	42,4 кВт (при В0/W35)	Тепла підлога + стіни + стельові панелі	5,17	31,5	0
4	Київ	GSHP	17,3 кВт (при В0/W35)	Тепла підлога + стіни	4,52	40,2	0
5	Київ	GSHP	42,4 кВт (при В0/W35)	Тепла підлога + радіатори + конвектори	3,85	43,6	7
8	Львів	GSHP	42,4 кВт (при В0/W35)	Тепла підлога + стіни + стельові панелі	5,0	33,4	0
<i>Повітряні теплові насоси</i>							
6	Київ	ASHP	26,8 кВт (при А2/W35)	Тепла підлога + стіни + стельові панелі	4,02	33,6	8
7	Київ	ASHP	16 кВт (при А2/W35)	Тепла підлога + радіатори	3,53	43,8	17
10	Львів	ASHP	13,4 кВт (при А2/W35)	Тепла підлога + радіатори	3,63	41,4	14
11	Львів	ASHP	26,8 кВт (при А2/W35)	Тепла підлога + стіни + стельові панелі	4,08	32,1	9

Наприклад, об'єкт № 1 з геотермальним тепловим насосом, потужністю 42,4 кВт оснащено теплою підлогою, теплими стінами та стельовими панелями, які можуть працювати в режимах опалення та охолодження. Завдяки такій конфігурації системи, середня температура теплоносія протягом опалювального сезону складає 31,5 °С, що дало змогу забезпечити SCOP - 5,17. Така низькотемпературна система опалення дозволяє досягати тепловому насосу COP на рівні 6,2 (рис. 5).

Така ж висока ефективність спостерігається на об'єкті № 8, де аналогічний геотермальний тепловий насос, потужністю 42,4 кВт, працює в комбінації з теплою підлогою, стіновими та стельовими панелями. Таке поєднання забезпечило SCOP - 5,0. А COP на цьому об'єкті досягав - 6,9 (рис. 6).

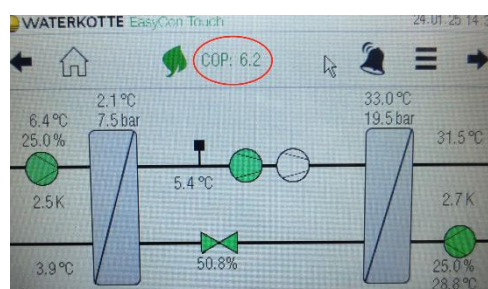


Рис. 5. Фото поточного значення COP геотермального теплового насоса об'єкта № 1. Дата: 24.01.2025

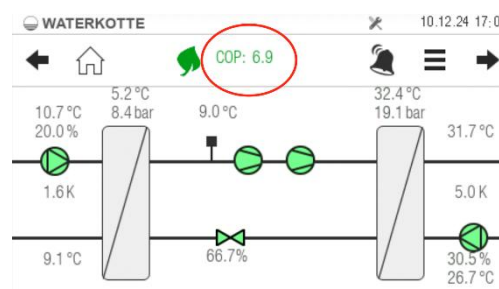


Рис. 6. Фото поточного значення COP геотермального теплового насоса об'єкта № 8. Дата: 10.12.2024

З іншого боку, геотермальний тепловий насос з об'єкта № 5, потужністю 42,4 кВт, працює в комбінації з радіаторами та конвекторами, що потребує вищої температури теплоносія - 43,6 °С. І як наслідок, спостерігаємо значно нижче значення SCOP - 3,85.

Схожа залежність простежується і для повітряних теплових насосів. Об'єкти 6 та 11, що обладнані низькотемпературною системою опалення, мають SCOP на рівні 4,02-4,08. У той час як у проєктах 7 та 10, де використовуються радіатори, значення SCOP 3,53-3,63.

У проєктах, де використовуються радіатори та конвектори, які потребують вищої температури теплоносія, частіше використовується додатковий нагрів. Наприклад, частка додаткового нагріву на об'єктах 7 та 10, що використовують комбінацію повітряних теплових насосів та стандартних опалювальних приладів, в середньому складає 17 % та 14 %. Навіть у системах з геотермальними тепловими насосами, наприклад, об'єкт № 5, в яких використовуються радіатори та конвектори, зростає необхідність додаткового нагріву для підвищення температури теплоносія.

Висновки. Проведений аналіз роботи теплових насосів демонструє, що обидва типи теплових насосів (ASHP та GSHP) показують високі показники енергоефективності в умовах експлуатації в Україні.

Геотермальні теплові насоси забезпечують високий SCOP і вплив кліматичних факторів на їх роботу мінімальний під час усього опалювального періоду. Більшою мірою ефективність GSHP залежить від поведінки геотермального поля, температура якого знижується до кінця опалювального сезону.

Водночас ефективність повітряних теплових насосів більшою мірою залежить від зовнішньої температури. SCOP повітряних теплових насосів нижчий в порівнянні з геотермальними тепловими насосами. Проте на початку та в кінці опалювальних сезонів за рахунок того, що зовнішня температура може бути вищою ніж температура геотермального поля, COP ASHP може бути вищим ніж в GSHP.

Кліматичні зміни вже зараз суттєво впливають на ефективність теплових насосів: скорочується тривалість опалювального сезону та підвищуються середні зимові температури. Прогнозується, що до середини 21 століття температура середнього періоду опалення в Україні значно зросте - від 0,8 °С до 1,5 °С. Тривалість періоду опалення буде скорочена в середньому на 15...18 днів. Практично на всій території України середня температура опалювального періоду досягне додатних значень [24]. Таким чином, використання ASHP стає ще більш обґрунтованим. Однак попри такі кліматичні зміни, ефективність GSHP залишається вищою, а їх робота більш стабільною.

Тип конфігурації системи опалення/охолодження є надзвичайно важливим для ефективності роботи теплових насосів. Найвищих показників досягають опалювальні системи з низькотемпературними системами опалення (тепла підлога, стіни, стелі). Наприклад, об'єкти з GSHP та поверхневим опаленням досягали SCOP > 5, у той час як проєкти з радіаторами демонстрували SCOP < 4 і мали більшу частку роботи додаткового нагріву. Згідно з отриманими даними, вартість виробництва 1 кВт·год тепла з геотермальних теплових насосів у поєднанні з низькотемпературною системою опалення може бути до 30% нижчою, ніж у випадку повітряних теплових насосів з класичним опалювальними пристроями (радіатори, конвектори).

Щоб досягти високих показників ефективності теплових насосів, спростити їх впровадження і забезпечити актуальні технічні вимоги, слід переглянути значення розрахункових температур зовнішнього повітря та провести їх корегування, виходячи з актуальних та прогнозованих змін клімату. Заходи для зниження споживання енергії, зокрема поєднання теплових насосів і поверхневих систем, є важливим кроком для побудови стійких систем.

Список використаних джерел

1. International Energy Agency. (n.d.). *Energy system of Ukraine*. <https://www.iea.org/countries/ukraine/efficiency-demand>.

2. Karp, I. M., Nikitin, Ye. Ye., Pyanykh, K. Ye., Sigal, O. I., Dubovskyi, S. V., Heletukha, H. H., Tarnovskyi, M. V., Dutka, O. V., Zubenko, V. I., Komkov, I. S., Oliinyk, Ye. M., Paderno, D. Yu., Pyanykh, K. K., Sylakin, O. E., Stepanov, M. V., & Fedorenko, V. M. (2020). *Stan ta shliakhy rozvytku system tsentralizovanoho teplopostachannia v Ukraini* (Kn. 1). Naukova Dumka; National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Gas, Institute of Engineering Thermophysics.
3. Lämmle, M., Metz, J., Kropp, M., Wapler, J., Oltersdorf, T., Günther, D., Herkel, S., & Bongs, C. (2023). Heat pump systems in existing multifamily buildings: A meta-analysis of field measurement data focusing on the relationship of temperature and performance of heat pump systems. *Energy Technology*, 11(6), Article 2300379. <https://doi.org/10.1002/ente.202300379>.
4. Bayer, D. R., & Pruckner, M. (2024). Data-driven heat pump retrofit analysis in residential buildings: Carbon emission reductions and economic viability. *Applied Energy*, 373, 123823. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123823>.
5. Mukhtar, M., Ameyaw, B., Yimen, N., Zhang, Q., Bamisile, O., Adun, H., & Dagbasi, M. (2021). Building retrofit and energy conservation/efficiency review: A techno-enviro-economic assessment of heat pump system retrofit in housing stock. *Sustainability*, 13(2), 983. <https://doi.org/10.3390/su13020983>.
6. Klute, S., Budt, M., van Beek, M., & Doetsch, C. (2024). Steam generating heat pumps – Overview, classification, economics, and basic modeling principles. *Energy Conversion and Management*, 299, 117882. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117882>.
7. Eurobserv'ER. (2024, October). *Heat Pumps Barometer*. <https://www.eurobserv-er.org/category/all-heat-pumps-barometers>.
8. European Heat Pump Association. (2024). *European heat pump market and statistics report 2024*. https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2024/08/Executive-summary_EHPA-heat-pump-market-and-statistic-report-2024-2.pdf.
9. Stanytsina, V., Horskyi, V., Danyliv, S., Zaporozhets, A., Kovtun, S., Maevsky, O., Garbuz, I., & Artemchuk, V. (2025). Comparative analysis of levelized cost of heat in implemented and calculated heat supply systems with heat pumps in Ukraine. *Energies*, 18(5), 1110. <https://doi.org/10.3390/en18051110>.
10. REF.org.ua. (2023). *Ринкові дослідження потенціалу зменшення впливу ОРР та ФПГ для теплових насосів і торговельного холодильного обладнання в Україні*. <https://ref.org.ua/upload/iblock/d20/Doslidzhennya-ukrayins`kogo-rynku-u-sektori-RACHP.pdf>.
11. Salhein, K., Salheen, S. A., Annekaa, A. M., Hawsawi, M., Alhawsawi, E. Y., Kobus, C. J., & Zohdy, M. (2025). A comprehensive review of geothermal heat pump systems. *Processes*, 13(7), 2142. <https://doi.org/10.3390/pr13072142>.
12. Boychenko, S., & Maidanovych, N. (2024). A century-long tendency of change in surface air temperature on the territory of Ukraine. *Geofizychnyi Zhurnal*, 46(2), 53–79. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i2.297227>.
13. Eurostat. (2024, June). *Heating and cooling degree days – Statistics*. <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/92378.pdf>.
14. Погода в аеропортах України. <https://ua.ivao.aero/resources/weather/airports>.
15. Kutbay Sezen, A., & Gungor, A. (2022). Performance analysis of air source heat pump according to outside temperature and relative humidity with mathematical modeling. *Energy Conversion and Management*, 263, 115702. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115702>.
16. Дерій, В., Тесленко, О., & Соколовська, І. (2024). Фінансові перешкоди впровадженню тепл, ових насосів в централізованому теплопостачанні. *Системні дослідження в енергетиці*, (3 (79), 4-12. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.03.004>.
17. Arghand, T., Javed, S., & Dalenbäck, J.-O. (2023). Combining direct ground cooling with ground-source heat pumps and district heating: Energy and economic analysis. *Energy*, 270, 126944. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126944>.
18. StatBase. (n.d.). *Number of hot days ($T > 30^{\circ}\text{C}$) | Ukraine*. <https://statbase.org/data/ukr-number-of-hot-days-max-30c>.
19. Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. (2010). ДСТУ Б В.2.5-44:2010. *Проектування систем опалення будівель з тепловими насосами*. Київ.

20. Арсеньєв, В. М., & Мелейчук, С. С. (2018). *Теплові насоси: основи теорії і розрахунку: навчальний посібник*. Суми: Сумський державний університет.
21. Bogdanov, D., Satymov, R., & Breyer, C. (2024). Impact of temperature dependent coefficient of performance of heat pumps on heating systems in national and regional energy systems modelling. *Applied Energy*, 371, 123647. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123647>.
22. Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2015). A study of the performances of low-temperature heating systems. *Energy Efficiency*, 8, 609–627. <https://doi.org/10.1007/s12053-014-9312-4>.
23. Білодід, В. Д., & Станиціна, В. В. (2020). Оцінка ефективності вироблення теплової енергії теплонасосними станціями на основі теплоти низькотемпературних підземних вод за методологією повних енергетичних витрат. *Системні дослідження в енергетиці*, 3(62), 46–52. <https://doi.org/10.15407/page2020.03.046>.
24. Krakovska, S. V., Palamarchuk, L. V., & Shpytal, T. M. (2019). Climatic projections of heating season in Ukraine up to the middle of the 21st century. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 41(6), 144–164. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190072>.

References

1. International Energy Agency. (n.d.). *Energy system of Ukraine*. <https://www.iea.org/countries/ukraine/efficiency-demand>.
2. Karp, I. M., Nikitin, Ye. Ye., Pyanykh, K. Ye., Sigal, O. I., Dubovskyi, S. V., Heletukha, H. H., Tarnovskyi, M. V., Dutka, O. V., Zubenko, V. I., Komkov, I. S., Oliinyk, Ye. M., Paderno, D. Yu., Pyanykh, K. K., Sylakin, O. E., Stepanov, M. V., & Fedorenko, V. M. (2020). *Stan ta shliakhy rozvytku system tseentralizovanoho teplopostachannia v Ukraini* (Kn. 1). Naukova Dumka; National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Gas, Institute of Engineering Thermophysics.
3. Lämmle, M., Metz, J., Kropp, M., Wapler, J., Oltersdorf, T., Günther, D., Herkel, S., & Bongs, C. (2023). Heat pump systems in existing multifamily buildings: A meta-analysis of field measurement data focusing on the relationship of temperature and performance of heat pump systems. *Energy Technology*, 11(6), Article 2300379. <https://doi.org/10.1002/ente.202300379>.
4. Bayer, D. R., & Pruckner, M. (2024). Data-driven heat pump retrofit analysis in residential buildings: Carbon emission reductions and economic viability. *Applied Energy*, 373, 123823. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123823>.
5. Mukhtar, M., Ameyaw, B., Yimen, N., Zhang, Q., Bamisile, O., Adun, H., & Dagbasi, M. (2021). Building retrofit and energy conservation/efficiency review: A techno-environ-economic assessment of heat pump system retrofit in housing stock. *Sustainability*, 13(2), 983. <https://doi.org/10.3390/su13020983>.
6. Klute, S., Budt, M., van Beek, M., & Doetsch, C. (2024). Steam generating heat pumps – Overview, classification, economics, and basic modeling principles. *Energy Conversion and Management*, 299, 117882. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117882>.
7. Eurobserv'ER. (2024, October). *Heat Pumps Barometer*. <https://www.eurobserv-er.org/category/all-heat-pumps-barometers/>.
8. European Heat Pump Association. (2024). *European heat pump market and statistics report 2024*. https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2024/08/Executive-summary_EHPA-heat-pump-market-and-statistic-report-2024-2.pdf.
9. Stanytsina, V., Horskyi, V., Danyliv, S., Zaporozhets, A., Kovtun, S., Maevsky, O., Garbuz, I., & Artemchuk, V. (2025). Comparative analysis of levelized cost of heat in implemented and calculated heat supply systems with heat pumps in Ukraine. *Energies*, 18(5), 1110. <https://doi.org/10.3390/en18051110>.
10. REF.org.ua. (2023). *Ринкові дослідження потенціалу зменшення впливу ОРР та ФПГ для теплових насосів і торговельного холодильного обладнання в Україні*. <https://ref.org.ua/upload/iblock/d20/Doslidzhennya-ukrayins'kogo-rynku-u-sektori-RACHP.pdf>.
11. Salhein, K., Salhein, S. A., Annekaa, A. M., Hawsawi, M., Alhawsawi, E. Y., Kobus, C. J., & Zohdy, M. (2025). A comprehensive review of geothermal heat pump systems. *Processes*, 13(7), 2142. <https://doi.org/10.3390/pr13072142>.
12. Boychenko, S., & Maidanovych, N. (2024). A century-long tendency of change in surface air temperature on the territory of Ukraine. *Geofizychnyi Zhurnal*, 46(2), 53–79. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i2.297227>.

13. Eurostat. (2024, June). *Heating and cooling degree days – Statistics*. <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/92378.pdf>.
14. Pohoda v aeroportakh Ukrainy. [Weather in the airports of Ukraine] <https://ua.ivao.aero/resources/weather/airports>.
15. Kutbay Sezen, A., & Gungor, A. (2022). Performance analysis of air source heat pump according to outside temperature and relative humidity with mathematical modeling. *Energy Conversion and Management*, 263, 115702. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115702>.
16. Derii, V., Teslenko, O., & Sokolovska, I. (2024). Finansovi pereshkody vprovadzhenniu tepl, ovyykh nasosiv v tsentralizovanomu teplopostachanni [Financial barriers to the introduction of heat pumps in centralised heat supply.] *Systemni doslidzhennia v enerhetytsi – Systemic research in energy*, 3(79), 4-12. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.03.004>.
17. Arghand, T., Javed, S., & Dalenbäck, J.-O. (2023). Combining direct ground cooling with ground-source heat pumps and district heating: Energy and economic analysis. *Energy*, 270, 126944. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126944>.
18. StatBase. (n.d.). *Number of hot days ($T > 30^{\circ}\text{C}$). Ukraine*. <https://statbase.org/data/ukr-number-of-hot-days-max-30c>.
19. Ministerstvo rehionalnoho rozvytku ta budivnytstva Ukrainy. (2010). DSTU B V.2.5-44:2010. [Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine. (2010). DSTU B V.2.5-44:2010]. *Proektuvannia system opalennia budivel z teplovymy nasosamy*. Kyiv. - Designing heating systems for buildings with heat pumps. Kyiv.
20. Arseniev, V. M., & Meleichenko, S. S. (2018). *Teplovi nasosy: osnovy teorii i rozrakhunku* [Heat pumps: fundamentals of theory and calculation]. *Sumskyi derzhavnyi universytet – Symu State University*.
21. Bogdanov, D., Satymov, R., & Breyer, C. (2024). Impact of temperature dependent coefficient of performance of heat pumps on heating systems in national and regional energy systems modelling. *Applied Energy*, 371, 123647. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123647>.
22. Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2015). A study of the performances of low-temperature heating systems. *Energy Efficiency*, 8, 609–627. <https://doi.org/10.1007/s12053-014-9312-4>.
23. Bilodid, V. D., & Stanytsina, V. V. (2020). Otsinka efektyvnosti vyroblennia teplovoi enerhii teplonasosnykh stantsiiamy na osnovi teploty nyzkotemperaturnykh pidzemnykh vod za metodolohiiu povnykh enerhetychnykh vytrat. [Assessment of the efficiency of heat production by heat pump stations based on low-temperature groundwater heat using the total energy consumption methodology.] *Systemni doslidzhennia v enerhetytsi – System reserch in the energy sector*, 3(62), 46–52. <https://doi.org/10.15407/pge2020.03.046>.
24. Krakovska, S. V., Palamarchuk, L. V., & Shpytal, T. M. (2019). Climatic projections of heating season in Ukraine up to the middle of the 21st century. *Geofizicheskyy Zhurnal*, 41(6), 144–164. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190072>.

Дата першого надходження статті до видання: 24.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.12.2025

UDC 697.3:697.9:620.9

Serhii Danyliv¹, Pavlo Gusiev²

¹Postgraduate Student

General Energy Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: sergiy@hajster.com. ORCID <https://orcid.org/0009-0009-9842-5501>

²Postgraduate Student

General Energy Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: gusiev@hajster.com. ORCID <https://orcid.org/0009-0003-1354-5181>

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF AIR-SOURCE AND GROUND-SOURCE HEAT PUMPS INSTALLED IN UKRAINE

The paper presents a comparative analysis of two major heat pump technologies—air-to-water (ASHP) and ground-to-water (GSHP)—based on real operational data from systems installed in Ukraine. For a representative monitoring period, time series of thermal output, electricity consumption, source/sink temperatures, and control parameters were collected, enabling the calculation of COP and SCOP and their comparison across different heat emission systems (radiators/underfloor

heating/fan-coils) and operating modes (heating/cooling). The results show an average SCOP of 4.8 for GSHPs and 3.8 for ASHPs. The dominant efficiency driver is the heating-system supply temperature: low-temperature heat distribution reduces the temperature lift and increases SCOP by 20–30%.

The study further examines how the expected increase in the average heating-season ambient temperature improves seasonal ASHP performance and reduces operation under extreme low-temperature conditions, supporting wider ASHP deployment. At the same time, longer and more frequent hot periods increase cooling demand and provide additional advantages for GSHPs due to the possibility of natural cooling (NC) with minimal electricity use. Practical recommendations are formulated for heat pump technology selection, hydraulic configuration, and control settings considering climate trends and real operating conditions in Ukraine. It is shown that elevated supply temperatures and heat pump oversizing lead to frequent cycling and SCOP degradation; for ASHPs, additional losses are associated with defrost cycles under high humidity. Weather-compensated control and the use of buffer/thermal storage are recommended to stabilize operating regimes and mitigate electrical peak loads.

Keywords: ground-source heat pumps; air-source heat pumps; COP; SCOP; low-temperature heating systems.

Fig.: 6. Table: 3. References: 24.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-444-456](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-444-456)

UDC [004.81:658.562]:621.314.225

**Vladyslav Parkhomets¹, Mykhailo Shevchenko-Hryshko²,
Anatolii Revko³, Oleksiy Gorodniy⁴**

¹Student of Department of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: vlad.parkhom.ts@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-5699-6088>

²Student of Department of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: mg3202075@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-3096-531X>

³PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor of department of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: asrmeister@stu.cn.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6818-2961>

ResearcherID: [ABA-7094-2021](https://orcid.org/0000-0001-6818-2961), **Scopus Author ID:** [57188714850](https://orcid.org/0000-0001-6818-2961)

⁴ PhD in Technical Sciences, Associate Professor of department of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: aleksey.gorodny@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5303-9564>

ResearcherID: [H-1425-2016](https://orcid.org/0000-0001-5303-9564), **Scopus Author ID:** [55327980200](https://orcid.org/0000-0001-5303-9564)

ARTIFICIAL INTELLIGENCE MODELS FOR QUALITY CONTROL OF TOROID TRANSFORMER WINDINGS

The paper presents a review and comparative analysis of modern artificial intelligence models suitable for real-time quality control of toroidal transformer winding. It is shown that existing AI solutions for transformer diagnostics and electronic product quality control are mainly focused on post-production (offline) analysis and do not address the specifics of the winding process. More than 25 neural network architectures were evaluated according to model size (≤ 200 MB), accuracy, computational load, and relative efficiency metrics. The most promising models were identified: EfficientNetV2-S and YOLOv11l as primary options for classification and object detection respectively, and EfficientNetB0 with YOLOv8n as lightweight alternatives. A universal four-stage scheme for integrating AI into a winding quality control system is defined and analyzed. The obtained results provide a scientific basis for developing low-cost intelligent monitoring systems for toroidal transformer winding machines, suitable for laboratory, educational, and small-batch production.

Keywords: artificial intelligence; quality control; toroidal transformer winding; convolutional neural networks; EfficientNet; YOLO; real-time; embedded systems.

Fig.: 5. Table: 7. References: 18.

Relevance of the research topic. In the modern world, the influence of artificial intelligence (AI) is growing rapidly. Due to the significant potential and great flexibility of AI as a data processing tool, more and more companies are implementing the use of AI in their work. Between 2017 and 2025, the percentage of companies using AI increased from 20 % to 78 % [1].

The growing demand for the AI use stimulates an increase in the number of studies conducted to investigate its working principles [2], [3], rules and methods of application [2], [4], improvement of its accuracy [2], [5], or new areas of application [6].

According to [7], the percentage of manufacturing companies that use generative AI is 4% (see Fig. 1, a).

This indicator can be explained by the fact that in manufacturing companies, the need for generative AI appears at the initial stages of establishing the manufacture.

Once production begins, the need for this AI decreases sharply, and instead, there is a need for analytical AI, which allows for analysis of the course of production processes and their precise control. This explains the large share of technology companies investing in the development and use of analytical AI (see Fig. 1.b).

These statistics confirm the relevance of the topic of this study, as the demand for the use of AI in production processes, in particular in quality control of final products, encourages the study of new and additional analysis of existing solutions. The analysis of existing solutions will allow us to examine current AI models from a different perspective and identify unconventional and creative approaches to their application.

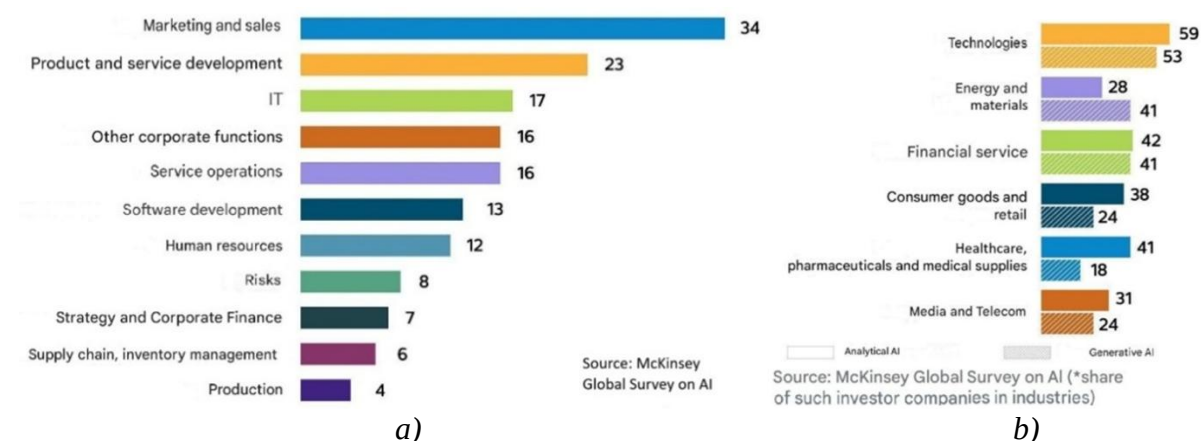


Fig. 1. Statistics data:

a – the direction of activity of companies using generative AI in 2024, by function, %;

b – shares of companies investing more than 10% of technologies in AI by industry, % [7]

Problem Statement. The absence of ready-made AI solutions for specialized manufacturing problems is driving the current trend of investing in the development of corresponding AI systems. In modern production of toroidal transformers, quality control of the winding process remains one of the key challenges that affects the efficiency and reliability of the final products. Currently, the accuracy of the control process depends to a significant extent on monitoring systems, human factors (operator errors, psychological characteristics of individuals, visual acuity, and others), winding process parameters (wire tension, angle of the applied turn, winding speed, and others), and the quality of the final product (uniformity of turn distribution, quality of turn overlay, number of detected defects, number of turns, and others).

This problem is accompanied by the following objectives: the aspiration for real-time control, the desire to increase the number of acquired parameters, and the aim to determine parameters that would be difficult to measure without the use of AI. These objectives indicate potential avenues for improving the quality control system for the winding of toroidal transformers on the machine.

Furthermore, in winding machines similar to those described in the previous work [8], it is proposed to integrate artificial intelligence models for automated real-time quality control. Fig. 2 presents an example of this machine manufactured by us, in which the implementation of AI will significantly reduce the influence of the human factor and improve the accuracy of monitoring winding parameters.

Real-time control enables the timely detection of defects and the implementation of corrective measures, sometimes without interrupting the winding process itself. It also allows for the proactive halting of the production process to prevent significant losses associated with the failure of involved equipment.

Increasing the number and complexity of monitored parameters makes it possible to substantially reduce the amount of defective output in the manufacturing process. This reduction in defects is achieved through enhanced adaptability of the manufacturing process, facilitated by the increased volume of information obtained about the product.

The simultaneous achievement of all these objectives is ensured by the appropriate selection of an AI model and the properly conducted process of its training. As a result, the AI becomes capable of processing large volumes of data, which enables the monitoring of the required number of parameters that are complex to detect. It is also capable of flexibly and accurately processing visual information, thereby significantly reducing the influence of the human factor on the winding process.

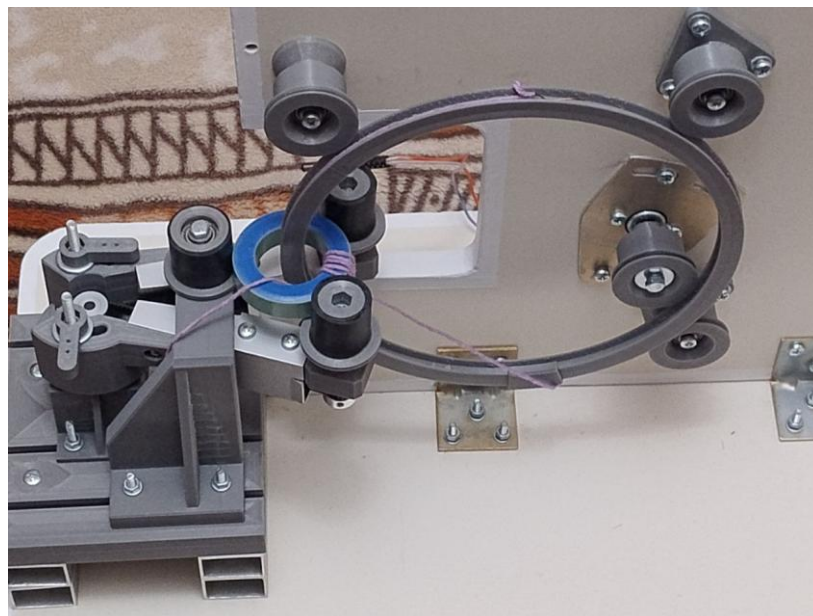


Fig. 2. Image of manufactured machine

Source: created by the authors.

Review of Recent Research and Publications. Recent studies in the field of artificial intelligence (AI) and its applications in transformer diagnostics demonstrate significant progress in improving the accuracy and automation of quality control. However, their focus remains limited with respect to real-time monitoring of the winding process for toroidal transformers, as evidenced by the following:

- In [5], deep learning (DL) techniques (CNN, RNN, Autoencoders, GAN) are described, achieving accuracies of 90–99% for multimodal data, but the emphasis is on IoT and medical applications rather than manufacturing, with noted dependence on GPU resources.
- In [9], the integration of Frequency Response Analysis (FRA) with ML/DL models (SVM, CNN, ANN) is investigated, achieving accuracies of 90–99 % in detecting winding defects (axial displacement, short circuits). The focus is on offline analysis, without adaptation for real-time application on winding machines.
- In [10], DL models (ResNet, AlexNet) are examined for visual inspection, with accuracies of 91–98 %, but without specific application to transformers or online monitoring.
- In [11], CNN-based approaches are proposed for inspecting cast products (accuracy up to 99%), yet they concentrate on offline analysis.
- In [12], traditional methods (88–91%), ML (92–94 %), and DL (up to 98 %) are compared for detection, but without emphasis on real-time operation or transformers.
- In [13], a comparison is presented between CNN-based AI models for defect detection and classification (87 %) in semiconductor manufacturing processes and traditional methods (77 %). However, there are no mentions of potential applications in the winding process of toroidal transformers.

The sources reviewed above provide the following examples of AI applications in electronics:

1. AI as an analyzer of data obtained from Frequency Response Analysis (FRA) diagnostics of transformers [9].
2. AI as a component for quality control of soldered components on PCB boards [10], [12].
3. AI as a classifier of defects during semiconductor manufacturing [13].
4. AI as a regulating element in quasi-resonant and switching converters [6].
5. AI as a classifier of defects in finished rapid-response radio stations [14].

In the first example, AI serves as a component of the transformer diagnostic process. Its task is to interpret data obtained from FRA testing of an assembled transformer. Specialized equipment designed for conducting and capturing the transformer's transient response is used as the data acquisition means (DAM).

In this example, AI does not participate directly in measuring characteristics, as time is required to obtain the complete transient response graph for subsequent analysis and interpretation. Here, AI operates in a post-processing mode. The implementation of AI demonstrated high accuracy—ranging from 90 % to 100 % in detecting and classifying defects—compared to 80–85 % accuracy achieved by traditional methods without AI. The best results were obtained using SVM (up to 100 %), ANN (up to 99.3 %), CNN (up to 98.27 %), and hybrid models with optimization (up to 99.75 %).

In the second example, AI is a component of the visual inspection process for defects in manufactured printed circuit boards. Its task is to identify incorrectly placed components on the board. A camera installed and configured on the production line conveyor serves as the DAM.

In this example, AI participates directly in measurement and defect detection, as the frame captured by the camera contains the entire defect and does not require prolonged measurements. This enables AI operation in real time. The introduction of AI in printed circuit board production increased defect detection accuracy to 99.5%, reduced inspection time from 20 to 5 seconds, and boosted production speed by 30%.

In the third example, AI is a component of the visual inspection process for the surface of manufactured semiconductors. Its task is to identify defects (see Fig. 3) on the semiconductor surface. A Scanning Electron Microscope (SEM), which provides high resolution, is used as the DAM for capturing the surface of the manufactured semiconductors.

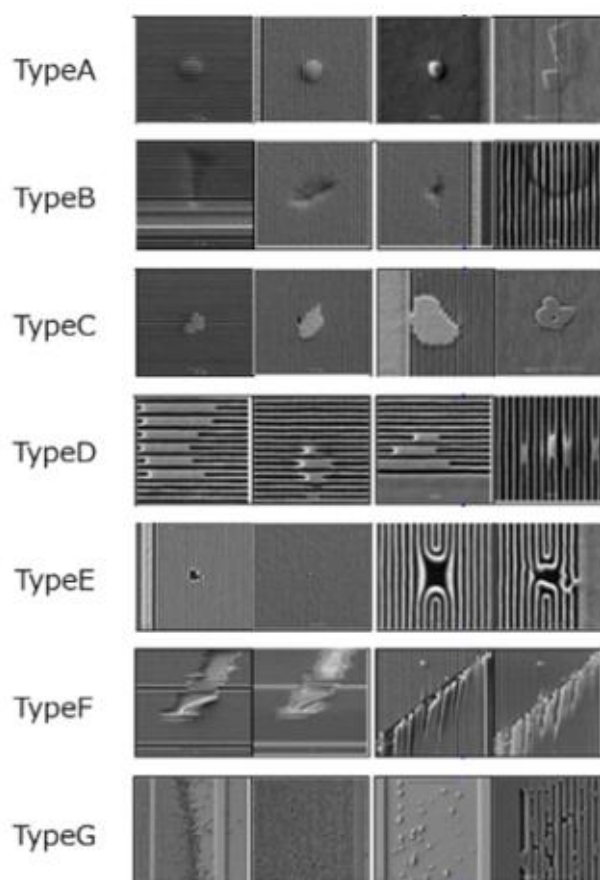


Fig. 3. Types of defects on the surface of semi-conductor [12]

In this example, AI participates directly in measurement and defect detection, as the frame obtained from the SEM contains the entire defect and does not require prolonged measurements. Here, AI operates in real-time mode. The implementation of CNN-based AI improved the average defect detection accuracy (87.26%) compared to traditional methods (77.23 %). It also reduced manual inspection labor costs by two-thirds relative to traditional approaches.

In the fourth example, the use of AI is proposed for controlling the energy conversion process in quasi-resonant and switching converters. Its task involves continuous and flexible monitoring of the system's control inputs to maintain the specified output voltage. Voltage and current transformers equipped with sensors, which generate voltage and current signals to provide data for the AI, are used as the data acquisition means (DAM).

In this example, AI directly participates in detecting deviations of output values from the setpoints, as the signals formed by the DAM clearly reflect discrepancies between actual and desired values. Here, AI operates in real-time mode. The implementation of AI is expected to enhance the device's energy efficiency, increase adaptability and robustness, and improve dynamic performance.

In the fifth example, AI is employed for visual inspection of finished rapid-response radio stations. Its task consists of the final product verification and detection of defects (e.g., misplaced buttons, missing labels). A system comprising multiple configured cameras, which provide images of the entire product surface, serves as the DAM.

In this example, AI directly participates in measurement and defect detection, as the frames obtained from the DAM contain the complete defect and do not require prolonged measurements. The introduction of AI reduced the time required for instrument evaluation from 30 seconds to 0.8 seconds. AI-based quality control systems achieve defect detection accuracy of up to 99 %, surpassing the human level of 80%. A pilot study on 1,000 units demonstrated payback on the investment within one month, owing to reduced inspection time and operator staffing.

Highlighting Previously Unresolved Aspects of the General Problem. The conducted analysis of key sources allows us to assess the current state of research and identify significant gaps that justify the necessity of the present study. In summary, the reviewed literature demonstrates that publications addressing transformer diagnostics are predominantly focused on post-production (offline) analysis, primarily using Frequency Response Analysis (FRA) combined with machine learning and deep learning methods [9]. No approaches have been proposed for implementing artificial intelligence directly during the toroidal transformer winding process on winding machines.

Other sources describe successful applications of AI in various manufacturing quality control processes (PCB inspection [10, 12], semiconductor surface defect detection [13], etc.), yet none of them mention or adapt these techniques specifically to the real-time monitoring of the toroidal transformer winding process.

Thus, to date, there are no ready-made artificial intelligence solutions adapted for real-time quality control during the winding of toroidal transformers on winding machines or suggestions on which artificial neural network to use. It is precisely this research gap that the present study aims to address.

Aim of the Article. The aim of this article is to examine variants of existing AI models for quality control of manufactured products and to assess their potential applicability to monitoring the winding process of toroidal transformers. It involves analyzing the advantages and disadvantages of each considered type. Additionally, key model parameters will be determined, such as prediction accuracy, computational load for inference, and model size. These parameters provide initial information regarding the capabilities of the selected AI model and enable forecasting of future training costs based on these values.

Relative metrics will be calculated, including the ratio of prediction accuracy to computational load and the ratio of prediction accuracy to model size. These metrics facilitate the selection of an appropriate model depending on available resources and time constraints.

Based on the obtained information about the AI models, variants of the most effective ones will be proposed for implementing quality control in the winding process of toroidal transformers.

Main Body. The overall analysis of the preceding examples revealed four main stages in the diagnostic process using a trained AI model, namely:

1. Preparatory stage – deployment of the DAM and the AI model takes place.
2. Measurement stage – initial data about the product are obtained using the DAM.
3. Information processing stage – the acquired initial data are transmitted to the AI for processing and interpretation. At this stage, the AI identifies the presence of defects for which it has been trained.
4. Completion stage – based on the AI's conclusions, appropriate measures are taken to correct the defect or dispose of the defective item.

Having analyzed the sources, all mentioned methods of information processing and defect detection were identified and systematized. Results of analysis and arrangement are shown in Table 1 and Table 2.

Table 1 – Learning based classifiers

Type of artificial neural network	Examples
Feedforward	Multilayer Perceptron (MLP) Deep Belief Networks (DBN) Autoencoders
Convolutional neural network (CNN)	VGG-Net (Visual Geometry Group Network) ResNet (Residual Network) DenseNet EfficientNetB0
Object Detection	YOLO (You Only Look Once) SSD (Single Shot MultiBox Detector)
Transformers	Vision Transformer (ViT)
Recurrent neural networks (RNN)	Recurrent Neural Networks (RNN)
Hybrids	Deep Ensemble Learning

Source: created by the authors

Table 2 – Classical machine learning methods

Type of artificial neural network	Examples
Core methods	Support Vector Machines (SVM) Support Vector Regression (SVR)
Tree type methods	Decision Trees Random Forest
Rule-based classifiers	Fuzzy Logic Control (FLC) Sliding Mode Control (SMC)

Source: created by the authors

To initially reduce the potential AI variants, only the types of AI models would be retained from the list of classifiers.

The next stage of reduction will be based on model size, as a larger model size results in longer training and inference times, as well as greater consumption of available resources and energy. It should be noted that, for comparison purposes, priority will be given to variations of AI models that process images of 224×224 pixels. In this case, the model architecture directly influences its size and performance speed.

The search results, based on data from sources [15], [16], are summarized in Table 3.

Table 3 – AI models sizes

Architecture	Input tensor size	Model size (MB)	Notes
Multilayer Perceptron (MLP)	$224 \times 224 \times 3 = 150.528$	Varying	Size depends on number of layers
Deep Belief Networks (DBN)	$224 \times 224 \times 3 = 150.528$	Varying	Size depends on number of layers
Autoencoders	$224 \times 224 \times 3$	Varying	Size depends on number of layers
VGG-16	$224 \times 224 \times 3$	528 [15]	138M parameters $\times 4$ bytes = 552 MB $\rightarrow \sim 528$ MB (optimized).
ResNet-50	$224 \times 224 \times 3$	98 [15]	$25.6M \times 4 = 102.4 \rightarrow \sim 98$ MB
ResNet-101	$224 \times 224 \times 3$	170 [15]	44.5M parameters.
DenseNet-121	$224 \times 224 \times 3$	31 [15]	8M parameters.
DenseNet-201	$224 \times 224 \times 3$	77.4 [15]	20M parameters
EfficientNetB0	$224 \times 224 \times 3$	20 [15]	5.3M parameters.
EfficientNetB7	$600 \times 600 \times 3$	253 [15]	66.3M parameters.
EfficientnetV2-s	$384 \times 384 \times 3$	82.7 [15]	21.5M parameters.
YOLOv8n (nano)	$224 \times 224 \times 3$	6.53 [16]	2.7M parameters. Has object detection version
YOLOv8l (large)	$224 \times 224 \times 3$	87 [16]	37.5M parameters. Has object detection version
YOLOv11l (large)	$224 \times 224 \times 3$	51.4 [16]	14.1M parameters. Has object detection version
SSD300 (with VGG-16 backbone)	$300 \times 300 \times 3$	136 [15]	35.6M parameters.
Vision Transformer (ViT-B/16)	$224 \times 224 \times 3$	330 [15]	86.5M parameters.
ViT-L/16	$224 \times 224 \times 3$	1100 [15]	304.3M parameters.

Source: created by the authors.

Models with a defined architecture and a size of less than 200 MB were selected. A predefined architecture saves time during training by eliminating the need for stages involving the adjustment of the number of layers or their dimensions, ensuring that the AI can effectively detect objects (defects) in images. A size limit of less than 200 MB simplifies the process of selecting the appropriate AI model by excluding excessively large models, thereby saving time on training in the future and retaining compact, high-performance models capable of operating in real-time mode on the machine.

For the next selection stage, initial accuracy and computational load values were identified for each model that met the previous criteria [15], [16]. These parameters help mitigate the influence of the deployment device's specifications on the AI model and provide a realistic representation of its capabilities.

The models were also divided into classifiers (those that determine what is depicted in the image) and detectors (those that identify the location of the target in the image). This distinction is justified by the possibility of implementing defect detection systems at different levels of complexity. For instance, if the system only needs to determine whether a defect is present in the image, it is advisable to use an AI classifier, as its objective is to categorize images into those containing a defect and those that do not.

If the system needs to determine whether a defect is present in the image while simultaneously indicating to the user the exact location of the detected defect, object detection models must be employed, as they are capable of marking the location of the defect in the image (most commonly with a bounding box).

The search results and classification are presented in Tables 4 and 5.

Table 4 – Accuracy and speed of AI classifier models

Architecture	Accuracy, %	Computational load, GFLOP/s	Size, MB
ResNet-50	80.9	4.1	98.0
ResNet-101	81.9	7.8	170.0
DenseNet-121	74.4	2.8	31.0
DenseNet-201	76.9	4.3	77.4
EfficientNetB0	77.7	0.4	20.0
EfficientNetV2-s	84.3	8.4	82.7
YOLOv8n	69.0	0.5	6.5
YOLOv8l	73.8	12.3	87.8
YOLOv11l	78.3	6.2	51.4

Source: created by the authors

Table 5 – Accuracy and speed of object detection models

Architecture	Accuracy, %	Computational load, GFLOP/s	Size, MB
YOLOv8n (nano)	37.3	8.7	6.5
YOLOv8s	52.9	165.2	87.8
YOLOv11l	53.4	86.9	51.4
SSD300 (with VGG-16 backbone)	25.1	34.9	136.0

Source: created by the authors

For the final step in model selection, in addition to the established prediction accuracy, relative metrics were calculated: the ratio of prediction accuracy to computational load and the ratio of prediction accuracy to model size. These metrics indicate the amount of resources utilized to achieve 1% of the model's accuracy; the higher the value of this metric, the more efficient the AI model.

The formulas for calculating these metrics are presented as (1) and (2).

$$P_{load} = \frac{A_{acc}}{R_{load}}, \quad (1)$$

where:

P_{load} – ratio of prediction accuracy to computational load (s);

A_{acc} – prediction accuracy (%);

R_{load} – computational load (1/s).

$$P_{size} = \frac{A_{acc}}{N_{size}}, \quad (2)$$

where:

P_{size} – ratio of prediction accuracy to model size (MB^{-1});

A_{acc} – prediction accuracy (%);

N_{size} – model size (MB).

The results of the searches and calculations are given in Table 6 and Table 7.

Table 6 – Efficiency of classification AI models

Architecture	Accuracy, %	P_{load}, s	P_{size}, MB^{-1}
EfficientnetV2-s	84.2	10.1	1.0185
ResNet-101	81.9	10.5	0.4817
ResNet-50	80.9	19.8	0.8251
YOLOv11l	78.3	12.6	1.5233
EfficientNetB0	77.7	199.2	3.8846
DenseNet-201	76.9	17.9	0.9935
DenseNet-121	74.4	26.3	2.4011
YOLOv8l	73.8	6.0	0.8405
YOLOv8n	69.0	138.0	10.5666

Source: created by the authors.

Table 7 – Efficiency of object detection AI models

Architecture	Accuracy, %	P_{load}, s	P_{size}, MB^{-1}
YOLOv11l	53.4	0.61	1.0389
YOLOv8s	52.9	0.32	0.6025
YOLOv8n (nano)	37.3	4.29	5.7120
SSD300 (with VGG-16 backbone)	25.1	0.72	0.1846

Source: created by the authors.

As a result of the analysis, two AI models were selected for each category: image classification and object detection. The first model in each pair prioritizes maximum prediction accuracy, with only minor differences in metrics compared to other models. The second serves as a backup, emphasizing maximum resource efficiency in case the primary model proves to be too demanding.

For image classification, it is advisable to use the EfficientNetV2-S model, as it achieves the highest prediction accuracy while being more efficient than ResNet-101, the next most accurate model. As a backup option, EfficientNetB0 is recommended, given its moderate accuracy among the considered AI models and its superior resource efficiency.

For object detection in images, the YOLOv11l model is recommended, as it offers higher accuracy and greater resource efficiency than YOLOv8s, the next most accurate model. As a backup, YOLOv8n is appropriate, as it provides the best optimization, although its accuracy is significantly lower.

The objective of training the selected AI model is to enable clear identification of four types of defects (gap, protrusion, conductor break, and conductor crossover). To achieve this objective, a specialized dataset was created containing images with clearly expressed defects. Examples of correct conductor winding and examples of defects are shown in Fig. 4.

A dataset containing correctly classified images with clearly expressed defects enables the training of an AI model capable of accurately and precisely classifying the specified types.

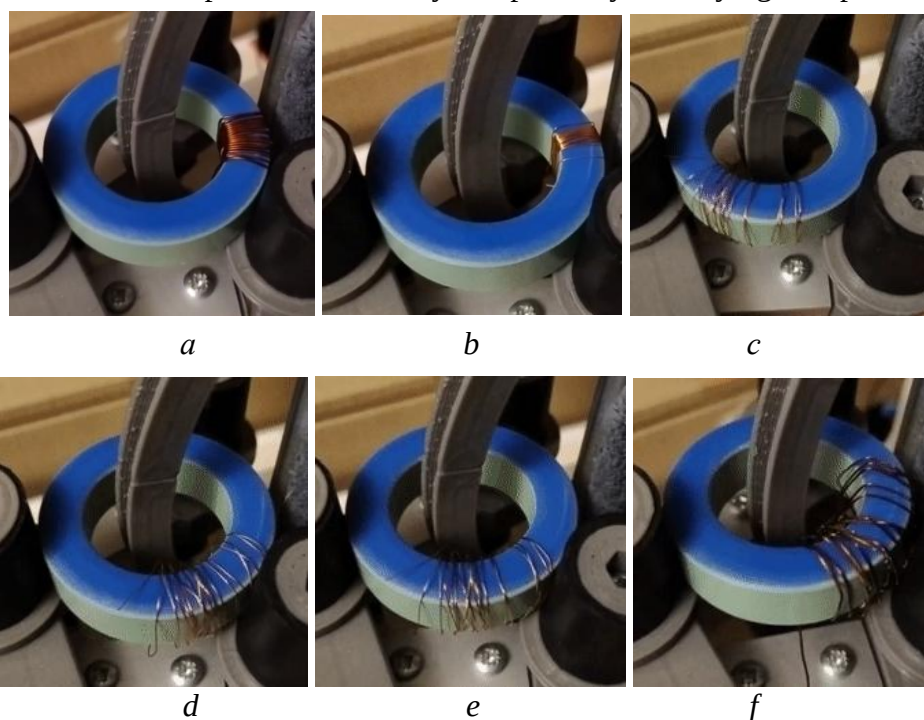


Fig. 4. Examples of winding:

a, b – correct conductor winding; c – defects conductor break;

d – defects conductor crossover; e – defects gap; f – defects protrusion

Source: created by the authors.

Experience with AI applications has shown a trend whereby the larger the dataset, the more accurate the trained AI model becomes. However, manually creating and classifying a large volume of data is highly time-consuming. Therefore, to artificially increase the dataset size, data augmentation algorithms are employed [17], [18]. Their operating principle involves applying various transformation methods to existing images (geometric transformations, color adjustments, sharpness modifications, random erasing, etc.) and saving the results of these transformations as new classified data. Examples of these transformations are illustrated in Fig. 5.



Fig. 5. Examples of data augmentation

Source: created by the authors.

Conclutions. The systematic analysis of contemporary research in the application of artificial intelligence for quality control of electronic products and transformer diagnostics has revealed that, to date, there are no ready-made AI solutions adapted for real-time monitoring of the winding process in toroidal transformers.

A comparative analysis of more than 25 neural network architectures (convolutional, transformer-based, object detectors, and classical methods) was conducted based on four key criteria: model size (≤ 200 MB), classification/detection accuracy, computational load, and relative efficiency (accuracy-to-load ratio and accuracy-to-size ratio).

Based on the analysis and calculations, the most promising models for implementation on cost-effective embedded platforms such as Raspberry Pi 5 or STM32 + NPU (Neural Processing Unit) were identified as follows:

- for classifying the presence of winding defects — EfficientNetV2-S (highest accuracy with acceptable resource requirements);
- for localizing and marking defects — YOLOv11l (optimal accuracy-to-performance ratio);
- as lightweight backup options — EfficientNetB0 and YOLOv8n, for classification and localization of defects, respectively.

A four-stage scheme for integrating AI into the quality control system for toroidal transformer winding was defined (preparatory, measurement, information processing, and completion stages), which enables real-time operation and minimizes the influence of the human factor.

The obtained results provide a scientifically substantiated foundation for the further practical implementation of intelligent quality control systems for toroidal core winding in laboratory, educational, and small-scale production environments.

In the future, it will be necessary to perform fine-tuning of the selected models and to carry out hardware implementation of the system on a winding machine.

References

1. 50 novykh faktiv pro SHI: Hlobalni trendy, biznes-vykorystannia ta prohnozy [50 new facts about AI: Global trends, business use and forecasts]. (n.d.). *Galera News*. <https://galera.news/50-novykh-faktiv-pro-shi-hlobalni-trendy-biznes-vykorystannia-ta-prohnozy-11655/>.

2. Kneusel, R. T. (2025). *Practical deep learning: A Python-based introduction* (2nd ed.). No Starch Press. <https://course.fast.ai/>.
3. Bellini, V., Cascella, M., Cutugno, F., Russo, G. F., Lanza, A., Tomlinson, M. C., & Bignami, E. (2022). Understanding basic principles of artificial intelligence: A practical guide for intensivists. *Acta Bio Medica: Atenei Parmensis*, 93(5), Article e2022197. <https://doi.org/10.23750/abm.v93i5.13626>.
4. Gunasekara, L., El-Haber, N., Nagpal, S., & McDonald-Maier, K. (2025). Responsible AI principles and practice: A systematic review. *Applied System Innovation*, 8(4), 97. <https://doi.org/10.3390/asi8040097>.
5. Sarker, I. H. (2021). Deep learning: A comprehensive overview on techniques, taxonomy, applications and research directions. *SN Computer Science*, 2(6), 420. <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00815-1>.
6. Tarasiuk, V., & Horodnii, O. (2025). Adaptive control to enhance energy efficiency in quasi-resonant switched-mode converters under dynamic loads. *Technical Sciences and Technologies*, 3(41), 419–431.
7. Haluzevi trendy. Shtuchnyi intelekt v Ukraini: yak rozvyvaietsia haluz [Industry trends. Artificial intelligence in Ukraine: How the industry is developing]. (2025, January 13). *Kyivstar Business Hub*. <https://hub.kyivstar.ua/articles/galuzevi-trendi-shtuchnij-intelekt-v-ukrayini-yak-rozvivayetsya-galuz>.
8. Shevchenko-Hryshko, M., Parkhomets, V., Revko, A., & Gorodniy, O. (2025). Research on methods of modification of winding machine for toroid transformers. *Technical Sciences and Technologies*, 3(41), 432–441.
9. Beheshti Asl, M., Fofana, I., Meghnefi, F., Brahami, Y., & Da Costa Souza, J. P. (2025). A comprehensive review of transformer winding diagnostics: Integrating frequency response analysis with machine learning approaches. *Energies*, 18(5), Article 1209. <https://doi.org/10.3390/en18051209>.
10. Sundaram, S., & Zeid, A. (2024). AI-driven quality control in PCB manufacturing: Enhancing production efficiency and precision. *International Journal of Scientific Research & Management*. <https://ijsrm.net/index.php/ijsrm/article/view/5772>.
11. Sundaram, S., & Zeid, A. (2023). Artificial intelligence-based smart quality inspection for manufacturing. *Micromachines*, 14(3), 570. <https://doi.org/10.3390/mi14030570>.
12. Kovalskiy, S., & Koval, V. (2024). Comparison of image processing techniques for defect detection. In *Proceedings of the AISD Conference* (Vol. 3716). CEUR-WS.org. <http://ceur-ws.org/Vol-3716/paper13.pdf>.
13. Imoto, K., Nakai, T., & Ike, T. (2019). A CNN-based transfer learning method for defect classification in semiconductor manufacturing. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 32(4), 455–461. <https://doi.org/10.1109/TSM.2019.2940250>.
14. Case studies of AI for superhuman quality control in electronics. (2025, January 9). *Quality Magazine*. <https://www.qualitymag.com/articles/98484-case-studies-of-ai-for-superhuman-quality-control-in-electronics>.
15. PyTorch. (n.d.). *Models and pre-trained weights*. Torchvision documentation. <https://docs.pytorch.org/vision/main/models.html>.
16. Ultralytics. (n.d.). *Ultralytics YOLO* [GitHub repository]. <https://github.com/ultralytics/ultralytics>.
17. Mikolajczyk, A., & Grochowski, M. (n.d.). *A complete guide to data augmentation*. DataCamp <https://www.datacamp.com/tutorial/complete-guide-data-augmentation>.
18. Shorten, C., & Khoshgoftaar, T. M. (2019). A survey on image data augmentation for deep learning. *Journal of Big Data*, 6(1), Article 60. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0>.

Список використаних джерел

1. 50 novykh faktiv pro SHI: Hlobalni trendy, biznes-vykorystannia ta prohnozy [50 new facts about AI: Global trends, business use and forecasts]. (n.d.). *Galera News*. <https://galera.news/50-novykh-faktiv-pro-shi-hlobalni-trendy-biznes-vykorystannia-ta-prohnozy-11655/>.
2. Kneusel, R. T. (2025). *Practical deep learning: A Python-based introduction* (2nd ed.). No Starch Press. <https://course.fast.ai/>.

3. Bellini, V., Cascella, M., Cutugno, F., Russo, G. F., Lanza, A., Tomlinson, M. C., & Bignami, E. (2022). Understanding basic principles of artificial intelligence: A practical guide for intensivists. *Acta Bio Medica: Atenei Parmensis*, 93(5), Article e2022197. <https://doi.org/10.23750/abm.v93i5.13626>.
4. Gunasekara, L., El-Haber, N., Nagpal, S., & McDonald-Maier, K. (2025). Responsible AI principles and practice: A systematic review. *Applied System Innovation*, 8(4), 97. <https://doi.org/10.3390/asi8040097>.
5. Sarker, I. H. (2021). Deep learning: A comprehensive overview on techniques, taxonomy, applications and research directions. *SN Computer Science*, 2(6), 420. <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00815-1>.
6. Tarasiuk, V., & Horodnii, O. (2025). Adaptive control to enhance energy efficiency in quasi-resonant switched-mode converters under dynamic loads. *Technical Sciences and Technologies*, 3(41), 419–431.
7. Haluzevi trendy. Shtuchnyi intelekt v Ukraini: yak rozvyvaietsia haluz [Industry trends. Artificial intelligence in Ukraine: How the industry is developing]. (2025, January 13). *Kyivstar Business Hub*. <https://hub.kyivstar.ua/articles/galuzevi-trendi-shtuchnij-intelekt-v-ukrayini-yak-rozvivayetsya-galuz>.
8. Shevchenko-Hryshko, M., Parkhomets, V., Revko, A., & Gorodniy, O. (2025). Research on methods of modification of winding machine for toroid transformers. *Technical Sciences and Technologies*, 3(41), 432–441.
9. Beheshti Asl, M., Fofana, I., Meghnefi, F., Brahami, Y., & Da Costa Souza, J. P. (2025). A comprehensive review of transformer winding diagnostics: Integrating frequency response analysis with machine learning approaches. *Energies*, 18(5), Article 1209. <https://doi.org/10.3390/en18051209>.
10. Sundaram, S., & Zeid, A. (2024). AI-driven quality control in PCB manufacturing: Enhancing production efficiency and precision. *International Journal of Scientific Research & Management*. <https://ijsrm.net/index.php/ijsrm/article/view/5772>.
11. Sundaram, S., & Zeid, A. (2023). Artificial intelligence-based smart quality inspection for manufacturing. *Micromachines*, 14(3), 570. <https://doi.org/10.3390/mi14030570>.
12. Kovalskyi, S., & Koval, V. (2024). Comparison of image processing techniques for defect detection. In *Proceedings of the AISD Conference* (Vol. 3716). CEUR-WS.org. <http://ceur-ws.org/Vol-3716/paper13.pdf>.
13. Imoto, K., Nakai, T., & Ike, T. (2019). A CNN-based transfer learning method for defect classification in semiconductor manufacturing. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 32(4), 455–461. <https://doi.org/10.1109/TSM.2019.2940250>.
14. Case studies of AI for superhuman quality control in electronics. (2025, January 9). *Quality Magazine*. <https://www.qualitymag.com/articles/98484-case-studies-of-ai-for-superhuman-quality-control-in-electronics>.
15. PyTorch. (n.d.). *Models and pre-trained weights*. Torchvision documentation. <https://docs.pytorch.org/vision/main/models.html>.
16. Ultralytics. (n.d.). *Ultralytics YOLO* [GitHub repository]. <https://github.com/ultralytics/ultralytics>.
17. Mikolajczyk, A., & Grochowski, M. (n.d.). *A complete guide to data augmentation*. DataCamp <https://www.datacamp.com/tutorial/complete-guide-data-augmentation>.
18. Shorten, C., & Khoshgoftaar, T. M. (2019). A survey on image data augmentation for deep learning. *Journal of Big Data*, 6(1), Article 60. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0>.

Дата першого надходження статті до видання: 24.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.12.2025

УДК [004.81:658.562]:621.314.225

**Владислав Русланович Пархомець¹, Михайло Анатолійович Шевченко-Гришко²,
Анатолій Сергійович Ревко³, Олексій Миколайович Городній⁴**

¹студент кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки
Національний Університет «Чернігівська Політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: vlad.parkhom.ts@gmail.com **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-5699-6088>

²студент кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки
Національний Університет «Чернігівська Політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: mg3202075@gmail.com **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-3096-531X>

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки
Національний Університет «Чернігівська Політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: asrmeister@stu.cn.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6818-2961> **ResearcherID:** [ABA-7094-2021](https://orcid.org/0000-0001-6818-2961)

Scopus Author ID: [57188714850](https://orcid.org/0000-0001-6818-2961)

⁴кандидат технічних наук, доцент кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки
Національний Університет «Чернігівська Політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: aleksey.gorodny@gmail.com **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5303-9564> **ResearcherID:** [H-1425-2016](https://orcid.org/0000-0001-5303-9564)

Scopus Author ID: [55327980200](https://orcid.org/0000-0001-5303-9564)

МОДЕЛІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ НАМОТУВАННЯ ТОРОЇДНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Вплив штучного інтелекту (ШІ) у сучасній промисловості стрімко зростає. З 2017 по 2025 рік частка компаній, що використовують ШІ, зростає з 20% до 78%. Попит на аналітичний ШІ у виробництві збільшується для точного контролю процесів, тоді як генеративний ШІ застосовується переважно на початкових етапах (лише 4% виробничих компаній). Це підтверджує актуальність застосування ШІ для контролю якості у виробництві, зокрема намотування тороїдних трансформаторів, для зменшення впливу людського фактора та підвищення точності моніторингу.

Контроль якості намотування тороїдних трансформаторів залишається ключовою проблемою, що впливає на надійність виробів. Точність залежить від систем моніторингу, людського фактора, параметрів намотування та якості кінцевого виробу. Цілі: контроль у реальному часі, збільшення кількості параметрів та виявлення складних дефектів. Інтеграція ШІ у намотувальні верстати (як у розробленому авторами прототипі) дозволяє вчасно виявляти дефекти, підвищувати адаптивність процесу та зменшувати брак без зупинки виробництва.

Дослідження демонструють прогрес ШІ у діагностиці трансформаторів та виявленні дефектів (точність 90–99% за допомогою CNN, SVM тощо), але фокус на offline пост-виробничому аналізі (FRA, інспекція PCB, напівпровідники). Відсутні рішення для моніторингу у реальному часі під час намотування тороїдних трансформаторів, що вказує на прогалину.

В статті розглянути існуючі моделі ШІ, оцінити їх придатність для контролю якості намотування тороїдних трансформаторів, проаналізувати переваги/недоліки, ключові параметри (точність, навантаження, розмір) та відносну ефективність, запропонувати оптимальні варіанти для впровадження.

Приклади застосування ШІ в електроніці: аналіз даних FRA, виявлення дефектів на PCB (99,5% точність, реальний час), інспекція напівпровідників (87% точність) та керування перетворювачами. Визначено чотириетапну схему інтеграції ШІ: підготовчий, вимірний, обробки та завершальний. Проаналізовано понад 25 архітектур нейронних мереж за розміром, точністю, навантаженням та ефективністю. Відібрано: EfficientNetV2-S та YOLOv11 як основні (класифікація/детекція); EfficientNetB0 та YOLOv8n як легкі резервні. Створено датасет з чотирма типами дефектів (зазор, протрузія, обрив, перехрещення), доповнений для тренування.

Готові рішення ШІ для контролю намотування тороїдних трансформаторів у реальному часі відсутні. Аналіз виділяє перспективні моделі для вбудованих платформ (Raspberry Pi 5, STM32+NPU). Пропонована схема мінімізує людський фактор. Результати створюють базу для інтелектуальних систем у лабораторному та малосерійному виробництві. Подальше дослідження: тонке навчання моделей та апаратна реалізація.

Ключові слова: штучний інтелект; контроль якості; намотування тороїдальних трансформаторів; згорткові нейронні мережі; EfficientNet; YOLO; реальний час; вбудовані системи.

Рис.: 5. Табл.: 7. Бібл.: 18.

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-457-474](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-457-474)

УДК 528.94:332.3

**Віталій Іванович Зацерковний¹, Віктор Васильович Ворох²,
Володимир Геннадійович Івшин³, Олександр Леонідович Деркач⁴**

¹доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри геоінформатики

Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5187-6125>. Scopus ID: 57200165109

²аспірант, кафедри геоінформатики

Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: fainkucha@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0112-8422>

³студент бакалаврату, кафедри геоінформатики

Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: vovaivsin6@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0858-7655>

⁴студент магістратури, кафедри геоінформатики

Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: d.derkach2014@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2534-6446>

ВИКОРИСТАННЯ ДЗЗ ТА ГІС В ЕКСПЕРТНІЙ ГРОШОВІЙ ОЦІНЦІ ЗЕМЕЛЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ПРИКЛАДІ ЧЕРНІГІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

У роботі розглянуто можливість використання ГІС та даних ДЗЗ для уточнення результатів експертної грошової оцінки земель сільськогосподарського призначення. Актуальність дослідження зумовлена запровадженням ринку земель в Україні та необхідністю врахування реальної продуктивності угідь під час визначення їх вартості. Дослідження виконано на прикладі земель Чернігівської області, зайнятих під вирощування кукурудзи. Для оцінювання продуктивності використано супутникові знімки Sentinel-2 за 2017–2023 роки та вегетаційний індекс NDVI. На основі зіставлення значень NDVI зі статистичними показниками врожайності встановлено їх взаємозв'язок, що дало змогу здійснити просторовий прогноз урожайності та розрахувати рентний дохід у межах окремих земельних ділянок. Отримані результати свідчать про доцільність застосування сучасних технологій на практиці експертної грошової оцінки земель.

Ключові слова: експертна грошова оцінка; землі сільськогосподарського призначення; геоінформаційні системи (ГІС); дистанційне зондування Землі (ДЗЗ); нормалізований диференційований індекс рослинності (NDVI); урожайність кукурудзи; рентний дохід; дохідний підхід.

Рис.: 14. Табл.: 1. Бібл.: 29.

Актуальність теми дослідження. Землі сільськогосподарського призначення є стратегічним ресурсом аграрного сектору України та основою формування продовольчої безпеки держави. Ефективність їх використання значною мірою залежить від обґрунтованості управлінських рішень, зокрема у сфері оцінювання земель, яке слугує економічною базою для регулювання земельних відносин, оподаткування, укладення цивільно-правових угод та планування землекористування [28]. Відповідно до положень Земельного кодексу України, землі сільськогосподарського призначення виділяються в окрему категорію земель, для якої встановлюється спеціальний правовий режим використання та оцінювання [28].

Згідно із Законом України «Про оцінку земель», експертна грошова оцінка земельних ділянок проводиться з метою визначення їхньої вартості з урахуванням природних, економічних і виробничих характеристик, що формують дохідність землекористування [18]. Одним із ключових елементів такої оцінки є визначення рентного доходу, який безпосередньо залежить від продуктивності земель, насамперед урожайності сільськогосподарських культур. Метод прямої капіталізації рентного доходу, закріплений у чинній Методиці експертної грошової оцінки земельних ділянок, залишається базовим інструментом економічного оцінювання земель сільськогосподарського призначення в Україні [29].

Разом із тим, у практиці проведення експертної грошової оцінки земель досі переважає використання усереднених показників урожайності, отриманих на основі статистичних або нормативно-довідкових даних. Такий підхід не завжди враховує реальну просторову неоднорідність ґрунтового покриття, відмінності у зволоженні, агротехнологічних умовах та фактичному стані посівів у межах окремих земельних ділянок [20; 13]. У результаті це може призводити до спотворення величини розрахункового рентного доходу, та відповідно, до заниження або завищення оціночної вартості земель.

Особливо актуальною зазначена проблема є для земель, зайнятих під вирощування кукурудзи на зерно – однієї з провідних товарних культур в Україні. Урожайність кукурудзи характеризується значною просторовою та міжрічною мінливістю, що зумовлюється як природними чинниками, так і особливостями технології вирощування [20]. За таких умов використання медіанних нормативних показників урожайності без просторового уточнення не забезпечує достатнього рівня об'єктивності економічної оцінки земельних ділянок.

Сучасний розвиток геоінформаційних систем (ГІС) та дистанційного зондування (ДЗЗ) створює нові можливості для отримання оперативної, об'єктивної та просторово деталізованої інформації про стан рослинного покриття. Застосування багатоспектральних супутникових знімків та вегетаційних індексів, зокрема, нормалізований диференційований індекс рослинності (NDVI), дозволяє оцінювати вегетаційний стан посівів і непрямо характеризувати їхню продуктивність у межах окремих полів та земельних ділянок [1; 7; 19; 21]. Численні наукові дослідження підтверджують наявність статистично значущого зв'язку між значеннями NDVI та урожайністю сільськогосподарських культур [7; 21].

Водночас аналіз наукових публікацій свідчить, що потенціал матеріалів ДЗЗ в задачах економічної оцінки земель використовується обмежено. У більшості випадків супутникові дані застосовуються для агромоніторингу, оцінювання стану посівів або планування технологічних заходів агровиробництва, тоді як їх інтеграція безпосередньо в процедуру експертної грошової оцінки земель залишається недостатньо опрацьованою [4; 6; 11; 12]. Це формує наукову прогалину між економічними методами оцінювання земель і сучасними геоінформаційними підходами до аналізу продуктивності агроландшафтів.

У зв'язку з цим актуальним є обґрунтування підходу, який поєднує метод прямої капіталізації рентного доходу з результатами ДЗЗ, до прикладу: урожайності кукурудзи на зерно та підвищення об'єктивності експертної грошової оцінки земель сільськогосподарського призначення. Реалізація такого підходу дозволяє врахувати реальну просторову мінливість продуктивності земельних ділянок і підвищити наукову та практичну обґрунтованість економічних розрахунків у сфері землекористування.

Постановка проблеми. Чинна система експертної грошової оцінки земель сільськогосподарського призначення в Україні передбачає використання дохідного підходу, зокрема методу прямої капіталізації рентного доходу. Водночас на практиці результати такої оцінки значною мірою залежать від способу визначення урожайності сільськогосподарських культур, яка безпосередньо впливає на величину розрахункового доходу.

У більшості випадків урожайність задається на основі усереднених нормативних або статистичних показників, що не враховують просторові відмінності в межах окремих земельних ділянок та фактичний стан посівів. Це знижує чутливість оцінки до реальних умов землекористування, до прикладу: для земель, зайнятих під вирощування кукурудзи на зерно.

Разом з тим матеріали ДЗЗ дозволяють отримувати просторово деталізовану інформацію про розвиток сільськогосподарських культур, однак такі дані поки що обмежено використовуються в процедурі експертної грошової оцінки земель. У зв'язку з цим актуальним є питання поєднання традиційних підходів економічної оцінки земель із можливостями ГІС та супутникових спостережень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання оцінки земель сільськогосподарського призначення ґрунтуються на поєднанні економічних, природних та просторових чинників, що зумовлює міждисциплінарний характер відповідних досліджень. Теоретичні та методичні засади експертної грошової оцінки земель в Україні сформовані в межах національної наукової школи землеустрою та економіки землекористування. У працях А. М. Третьяка та А. Г. Мартина розглянуто принципи формування вартості земельних ресурсів, роль рентного доходу в системі оцінки земель, а також обґрунтовано застосування дохідного підходу для земель сільськогосподарського призначення [13; 20]. Зазначені дослідження підкреслюють визначальне значення урожайності сільськогосподарських культур як базового економічного показника, що безпосередньо впливає на результати експертної грошової оцінки.

Нормативно-методичні аспекти проведення експертної грошової оцінки земель закріплені у чинних законодавчих і підзаконних актах, зокрема в Земельному кодексі України, Законі України «Про оцінку земель» та Методиці експертної грошової оцінки земельних ділянок [17; 18; 28; 29]. У цих документах визначено загальні підходи до оцінювання земель, порядок застосування методу прямої капіталізації рентного доходу та перелік факторів, що мають враховуватися при визначенні вартості земельних ділянок.

Значний масив наукових досліджень присвячений використанню матеріалів ДЗЗ для оцінювання стану рослинного покриву та продуктивності сільськогосподарських культур. Класичні роботи J. Rouse, C. Tucker, A. Huete та F. Baret з колегами заклали теоретичні основи застосування вегетаційних індексів для аналізу біофізичних характеристик рослинності [4; 6; 11; 12]. Зокрема, індекс NDVI набув широкого поширення завдяки простоті розрахунку та стабільному зв'язку з параметрами біомаси й фотосинтетичної активності рослин.

Подальший розвиток супутникових систем спостереження Землі, зокрема запуск місії Sentinel-2, значно розширив можливості застосування багатоспектральних даних у сільському господарстві. У працях M. Drusch та співавторів, а також у технічній документації Європейського космічного агентства наведено характеристики спектральних каналів Sentinel-2 та обґрунтовано їх придатність для розрахунку вегетаційних індексів і моніторингу посівів [4; 6]. Ці дослідження стали методичною основою для численних прикладних робіт, спрямованих на оцінювання просторової мінливості стану сільськогосподарських угідь.

Методичні аспекти обробки та аналізу просторових даних із використанням ГІС висвітлені в працях зарубіжних і вітчизняних дослідників. Зокрема, у роботах P. Longley, T. Lillesand, J. Jensen розглянуто принципи інтеграції растрових супутникових даних у ГІС, методи просторового аналізу та інтерпретації результатів ДЗЗ [8; 11; 12]. Українські науковці В. І. Зацерковний, В. Г. Бурачек та їхні співавтори детально описали можливості застосування ГІС для аналізу просторової структури природних і господарських об'єктів, що є важливим підґрунтям для досліджень у сфері землеустрою та оцінки земель [2; 26; 27].

Разом із тим аналіз наукових публікацій свідчить, що більшість досліджень зосереджені на використанні ДЗЗ для агромоніторингу, оцінювання стану посівів або оптимізації технологій вирощування сільськогосподарських культур. Питання ж безпосереднього використання супутникових даних для уточнення економічних параметрів експертної грошової оцінки земель, зокрема показників урожайності в межах дохідного підходу, залишаються недостатньо висвітленими. Це зумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на інтеграцію матеріалів ДЗЗ у процедуру експертної грошової оцінки земель сільськогосподарського призначення.

Метою статті є обґрунтування та апробація підходу до експертної грошової оцінки земель сільськогосподарського призначення, зайнятих під посівами кукурудзи на зерно, із застосуванням ГІС та матеріалів ДЗЗ, на основі методу прямої капіталізації рентного

доходу, з використанням вегетаційного індексу NDVI для просторового уточнення показників урожайності та підвищення об'єктивності економічних розрахунків у межах чинної нормативно-правової бази України.

Виклад основного матеріалу. Застосування ГІС і матеріалів ДЗЗ в експертній грошовій оцінці земель сільськогосподарського призначення зумовлене необхідністю переходу від узагальнених економічних показників до просторово деталізованого аналізу продуктивності земельних угідь. На відміну від традиційних підходів, що базуються переважно на статистичних або нормативних даних, використання ГІС і ДЗЗ дозволяє врахувати фактичний стан земель і посівів у межах конкретних ділянок, а також просторову неоднорідність сільськогосподарського виробництва.

Основні напрями застосування ГІС і матеріалів ДЗЗ у процесі оцінювання земель сільськогосподарського призначення узагальнено на (рис. 1).

У межах цієї роботи зазначені напрями реалізовано при оцінці продуктивності посівів кукурудзи та подальшому визначенні рентного доходу.

Представлена схема ілюструє, що дані ДЗЗ та ГІС можуть використовуватися не лише для картографування землекористування, але й для аналізу стану рослинності, визначення урожайності, оцінки ґрунтових та рельєфних умов, а також для підтримки прийняття рішень у сфері землекористування та оцінної діяльності.

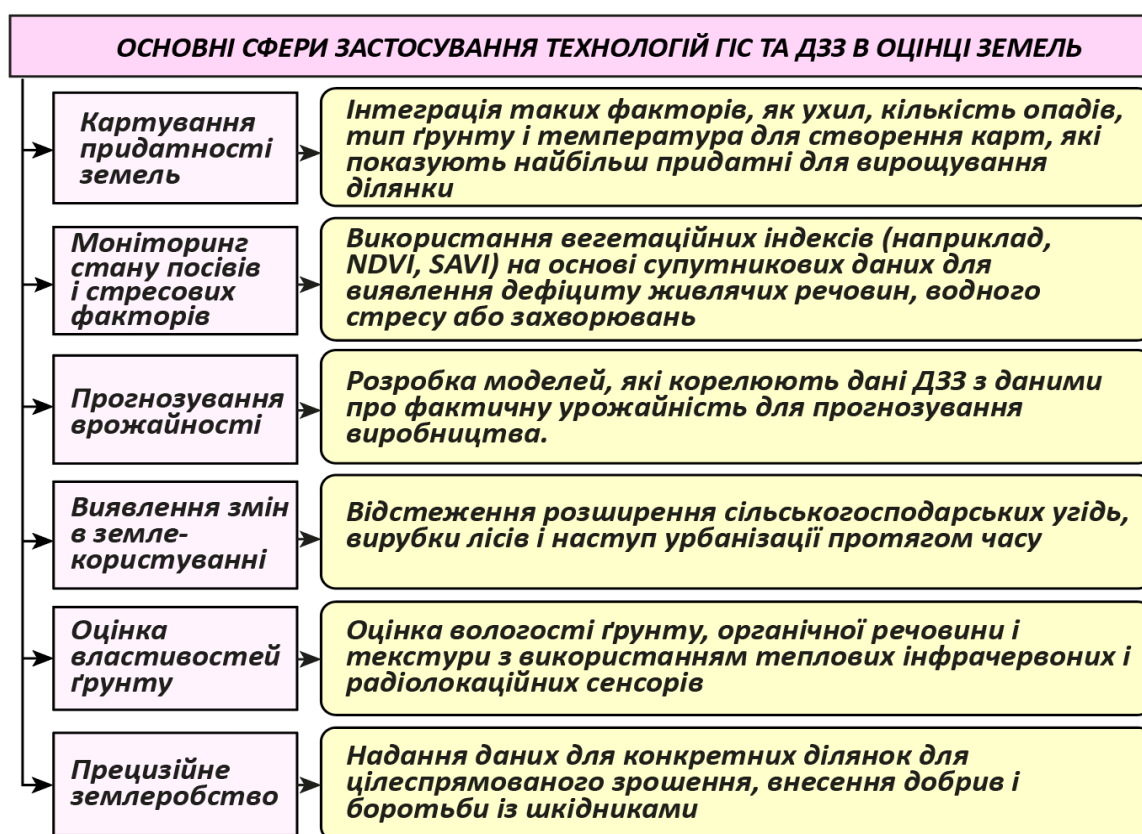


Рис. 1. Основні сфери застосування технологій ГІС та ДЗЗ в оцінці земель

Використання зазначених технологій забезпечує низку переваг порівняно з традиційними методами експертної оцінки. Зокрема, ГІС та ДЗЗ дозволяють оперативно отримувати актуальні просторові дані, здійснювати аналіз великих за площею територій, виявляти внутрішньопольову неоднорідність земельних ділянок і відстежувати зміни стану угідь у часовому розрізі. Узагальнені переваги застосування ГІС та ДЗЗ у контексті експертної оцінки земель наведено на (рис. 2).

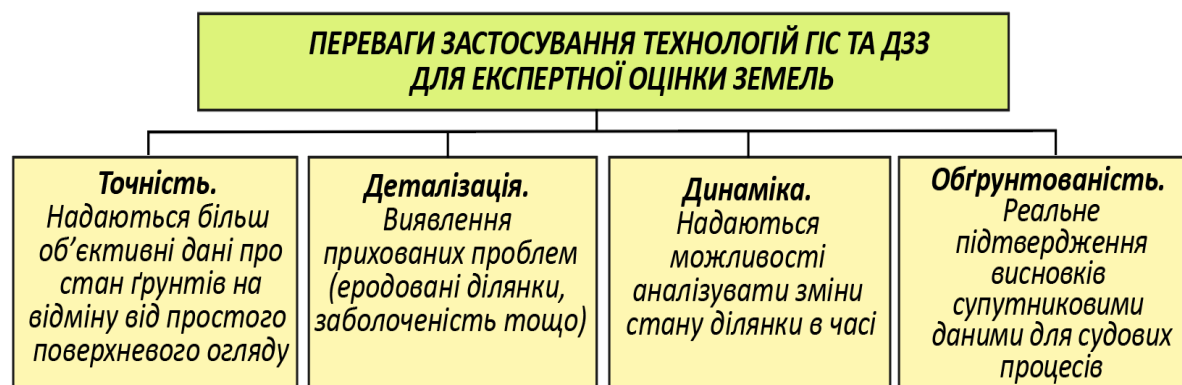


Рис. 2. Переваги застосування технологій ГІС та ДЗЗ для експертної оцінки земель

Інтеграція просторових, економічних і кадастрових даних у межах ГІС формує основу для комплексного підходу до експертної грошової оцінки земель. Узагальнену схему реалізації такого підходу із використанням ГІС та матеріалів ДЗЗ на (рис. 3), де показано взаємозв'язок між етапами збору вихідної інформації, просторового аналізу та формування результатів оцінювання.

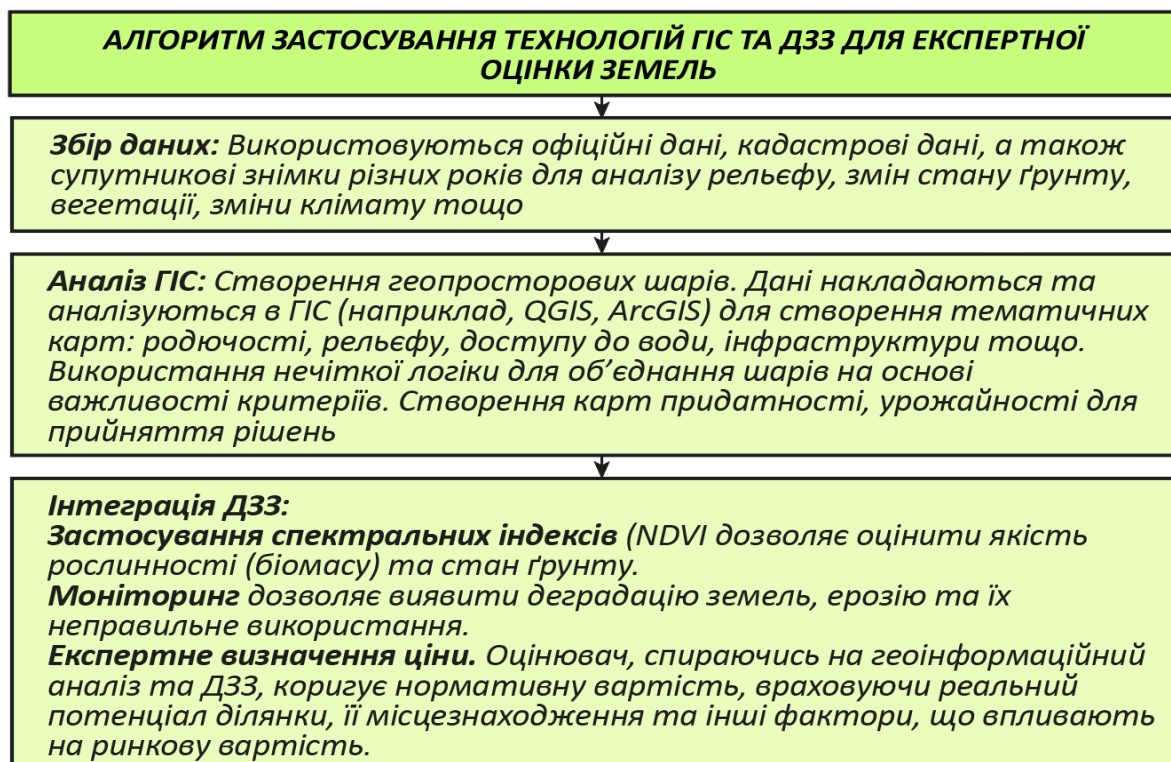


Рис. 3. Схема застосування технологій ГІС та ДЗЗ для експертної оцінки земель

Представлена схема відповідає логіці реалізації дослідження, використаний авторами при визначенні експертної грошової оцінки земель у межах Михайло-Коцюбинської територіальної громади.

Застосування ГІС і матеріалів ДЗЗ формує інформаційну основу для подальших економічних розрахунків у межах дохідного підходу. Саме на цьому етапі просторові характеристики земельних ділянок трансформуються в кількісні показники, що використовуються при визначенні рентного доходу. Зазначена схема відображає перехід від збору та обробки просторових даних до їх економічної інтерпретації, що є принципово важливим для реалізації дохідного підходу в експертній грошовій оцінці земель.

Експертна грошова оцінка земель сільськогосподарського призначення відповідно до чинного законодавства України ґрунтується на застосуванні дохідного підходу, який передбачає визначення вартості земельної ділянки через її здатність генерувати дохід у процесі господарського використання. У межах цього підходу ключовим показником є рентний дохід, що формується в результаті сільськогосподарського виробництва і відображає економічний потенціал земельної ділянки [16-18; 29].

Для подальшого обґрунтування можливості інтеграції даних ДЗЗ в процедуру експертної грошової оцінки земель необхідно розглянути загальні принципи реалізації дохідного підходу, який є базовим при оцінюванні земель сільськогосподарського призначення відповідно до чинної нормативної бази України.

У межах даного дослідження зазначені підходи реалізуються для конкретного об'єкта – земельних ділянок сільськогосподарського призначення Михайло-Коцюбинської територіальної громади Чернігівського району, що дозволяє перейти від загальних положень до практичних розрахунків.

Вартість земельної ділянки визначається як відношення рентного доходу до коефіцієнта капіталізації, який враховує рівень ризику та альтернативну дохідність інвестицій у земельні ресурси та розраховується за формулою (вираз 1):

$$V = \frac{R}{k}, \quad (1)$$

де V – вартість земельної ділянки, грн/га;

R – чистий рентний дохід, грн/га;

k – коефіцієнт капіталізації.

Чистий рентний дохід визначається як різниця між валовим доходом від реалізації сільськогосподарської продукції та витратами, пов'язаними з її виробництвом. Такий підхід дозволяє врахувати економічні умови господарювання та специфіку вирощування конкретних культур. Розрахунок рентного доходу здійснюється за формулою (вираз 2):

$$R = D - C, \quad (2)$$

де D – валовий дохід, грн/га;

C – виробничі витрати, грн/га.

Валовий дохід формується на основі показників урожайності сільськогосподарських культур та середньої ціни реалізації продукції на ринку. З урахуванням цього валовий дохід може бути представлений у вигляді, формула (вираз 3):

$$D = Y \times P, \quad (3)$$

де Y – урожайність культури, т/га;

P – ціна реалізації продукції, грн/т.

Таким чином, у межах дохідного підходу саме урожайність виступає ключовою ланкою між просторовими характеристиками земельної ділянки та її економічною вартістю. Це створює методичні передумови для використання показників, отриманих за матеріалами ДЗЗ, зокрема вегетаційних індексів у подальшому як показника уточнення економічних розрахунків.

У традиційній практиці експертної грошової оцінки урожайність часто визначається на основі усереднених статистичних або нормативних показників, що не враховують просторову неоднорідність земельних ділянок.

У зв'язку з цим у сучасних дослідженнях дедалі більшого значення набуває використання матеріалів ДЗЗ та ГІС, які дозволяють отримувати просторово детальні характеристики стану посівів і використовувати їх для уточнення показників урожайності. Саме ГІС забезпечують інтеграцію супутникових даних із кадастровою та економічною інформацією, створюючи єдине аналітичне середовище для реалізації дохідного підходу в експертній оцінці земель [8; 11; 12].

Для просторового уточнення показників урожайності в межах дохідного підходу доцільним є використання вегетаційних індексів, що відображають біофізичний стан посівів. Одним із найбільш поширених інструментів дистанційної оцінки стану рослинності є нормалізований диференційний вегетаційний індекс NDVI, який характеризує інтенсивність фотосинтетичної активності рослин і має тісний зв'язок з біомасою та врожайністю сільськогосподарських культур. Значення індексу NDVI визначається за співвідношенням, формула (вираз 4):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (4),$$

де NIR – відбивна здатність у ближньому інфрачервоному діапазоні;

RED – відбивна здатність у червоному спектральному діапазоні.

На основі отриманих середніх значень вегетаційного індексу NDVI в межах окремих полів та відповідних статистичних показників урожайності кукурудзи формується математична залежність, яка описує взаємозв'язок між біофізичним станом посівів і їхньою продуктивністю. Зазначена залежність реалізується у вигляді простої лінійної регресійної моделі, узагальнений вигляд якої може бути представлений таким чином:

$$Y = a * NDVI + b, \quad (5),$$

де Y – прогнозована урожайність кукурудзи, ц/га;

$NDVI$ – середнє значення вегетаційного індексу в межах відповідного поля;

a, b – параметри регресійної моделі, визначені за результатами статистичної обробки багаторічних даних.

Використання такої залежності дає змогу перейти від дистанційно отриманих індикаторів стану рослинності до кількісної оцінки урожайності, що надалі використовується для просторового моделювання продуктивності сільськогосподарських угідь у середовищі ГІС.

У практичному вимірі значущість удосконалення підходів до експертної грошової оцінки земель суттєво зросла після запровадження ринку земель сільськогосподарського призначення. З 31 березня 2020 року Верховною Радою України було ухвалено Закон України № 2178-10 «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо обігу земель сільськогосподарського призначення», яким запроваджено поетапне відкриття ринку земель. З 1 липня 2021 року зазначений закон набрав чинності, надавши фізичним і юридичним особам право купівлі та продажу земель сільськогосподарського призначення. Унаслідок цього грошова оцінка земель набула статусу одного з ключових інструментів регулювання земельних відносин та ухвалення управлінських рішень у сільськогосподарському секторі.

Чинна офіційна методика оцінки земель сільськогосподарського призначення базується переважно на площі ділянок та системі коригувальних коефіцієнтів, що враховують їх географічне положення, приналежність до природно-сільськогосподарських зон, наближеність до населених пунктів, інфраструктури, зон з обмеженим режимом використання, а також показники родючості ґрунтів, зокрема бонітет. Водночас умови функціонування відкритого ринку землі формують додатковий рівень невизначеності, оскільки ринкова вартість ділянок з подібними формальними характеристиками може суттєво відрізнятися залежно від економічних очікувань покупців, конфігурації землекористування та можливостей подальшої консолідації угідь. Частина таких відмінностей зумовлена факторами, що мають чітко виражену просторову природу й можуть бути кількісно оцінені із застосуванням ГІС та матеріалів ДЗЗ.

У цьому контексті супутникові дані виступають одним із найбільш інформативних джерел просторової інформації для оцінки земель, оскільки дозволяють оперативно отримувати узгоджені показники стану рослинного покриву та продуктивності угідь на великих територіях [9].

Разом з тим, запровадження ринку земель сільськогосподарського призначення актуалізувало проблему відповідності чинних підходів до оцінювання реальним ринковим умовам. Нормативна грошова оцінка, яка використовується як базовий інструмент, не завжди відображає фактичний продуктивний потенціал земельних ділянок, оскільки ґрунтується переважно на узагальнених коефіцієнтах і не враховує просторову неоднорідність урожайності в межах конкретних полів.

У зв'язку з цим виникає потреба в доповненні традиційних методів оцінки інструментами, що дозволяють кількісно враховувати реальні показники використання земель. Саме в цьому контексті подальший аналіз зосереджується на конкретному об'єкті дослідження та характеристиці земельних ділянок, для яких здійснюється просторово обґрунтоване визначення продуктивності та економічної цінності.

Об'єктом дослідження є земельні ділянки сільськогосподарського призначення, розташовані в межах Михайло-Коцюбинської територіальної громади Чернігівського району Чернігівської області, просторове положення яких наведено на (рис. 4).

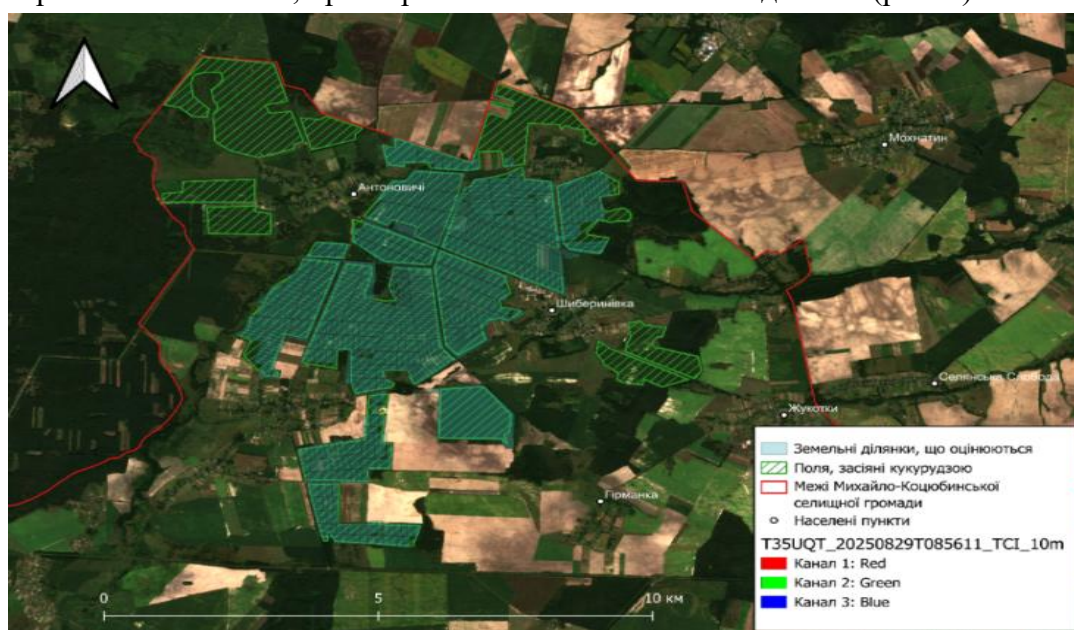


Рис. 4. Територія дослідження (власна розробка за даними [22])

Сільське господарство є одним із провідних напрямів господарської діяльності Михайло-Коцюбинської територіальної громади, що зумовлює доцільність вибору цієї території як об'єкта дослідження.

Типи ґрунтів на території громади: чорноземи, вилугувані та підзолисті лужні дернові, торф'яно-болотні. Тобто існують сприятливі умови для вирощування, крім зернових культур, що переважають на території громади, технічних культур (зокрема, буряку), а також придатні для садівництва та городини. За агроекологічною оцінкою ґрунти громади належать до умовно-задовільних та задовільних [15].

Рельєф Чернігівського району в основному рівнинний, місцями слабохвилястий. Не створює особливих перешкод для сільськогосподарського виробництва, за винятком фактора прорізання неглибокими долинами річок що може призвести до виникнення у весняний період неглибоких за площею вимочок, в яких можуть гинути посіви, та відповідно, призводить до зниження урожайності сільськогосподарських культур. Крутість схилів становить 0-3°, що не є впливом на водні ерозійні процеси. В окремі роки на території Чернігівського району в зимовий період за наявності низького снігового покриву, в подальшому весняно-літнього періоду, спостерігались пилові бурі, для боротьби з якими були в подальшому висаджені лісозахисні смуги [25].

Класифікація культур на території Михайло-Коцюбинської територіальної громади станом на 2019 рік та літо 2025 року представлені відповідно на (рис. 5 та 6).

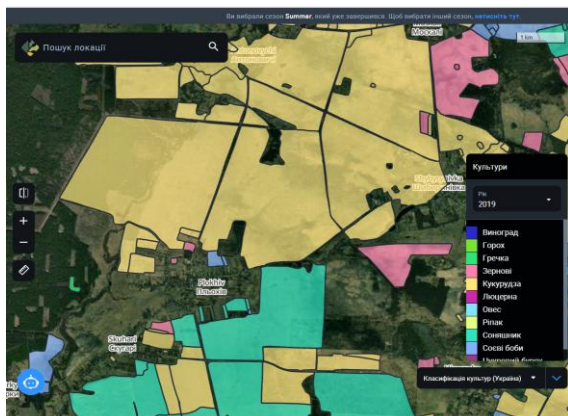


Рис. 5. Класифікація культур станом на 2019 рік [5]

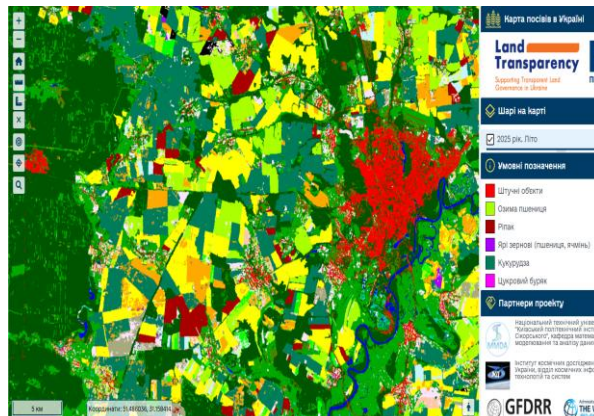


Рис. 6. Класифікація культур на території Михайло-Коцюбинської територіальної громади станом на літо 2025 року [10]

Просторову структуру посівів сільськогосподарських культур у межах громади за різні часові зрізи наведено на (рис. 5 та 6).

У межах дослідження визначено урожайність кукурудзи, яка є однією з культур з найбільшими посівними площами та стабільною товарною орієнтацією в Чернігівській області. Для визначення місця розташування полів з кукурудзою було використано карти посівів України від Land Transparency за 2022-2024 роки.

З урахуванням обраного дохідного підходу для експертної грошової оцінки земель сільськогосподарського призначення та можливостей просторового аналізу в середовищі ГІС, дослідження виконувалося як послідовність взаємопов'язаних аналітичних процедур, спрямованих на інтеграцію даних ДЗЗ, статистичної інформації та економічних розрахунків.

Для проведення експертної грошової оцінки окремих земельних ділянок, зареєстрованих у Державному земельному кадастрі, у межах дослідження було реалізовано комплекс аналітичних операцій, що включав ідентифікацію полів із посівами кукурудзи, розрахунок середніх значень вегетаційного індексу NDVI за супутниковими знімками 2017–2023 років, встановлення статистичної залежності між цими значеннями та офіційними показниками врожайності, побудову регресійної моделі та її інтеграцію в середовище ГІС для подальшого прогнозування врожайності й визначення капіталізованого рентного доходу.

Для ідентифікації культур використовувалися дані платформ Crop Monitoring (2017–2021 pp.) та Land Transparency (2022–2023 pp.). З урахуванням результатів попередніх досліджень, які вказують на максимальний рівень кореляції між значеннями NDVI та врожайністю кукурудзи у фазі молочно-воскової стиглості, для аналізу було відібрано супутникові знімки з мінімальним відсотком хмарності за першу та другу декади серпня 2017–2023 років. Для кожного знімка з використанням інструментів алгебри карт розраховано індекс NDVI, результати якого наведено на (рис. 7).

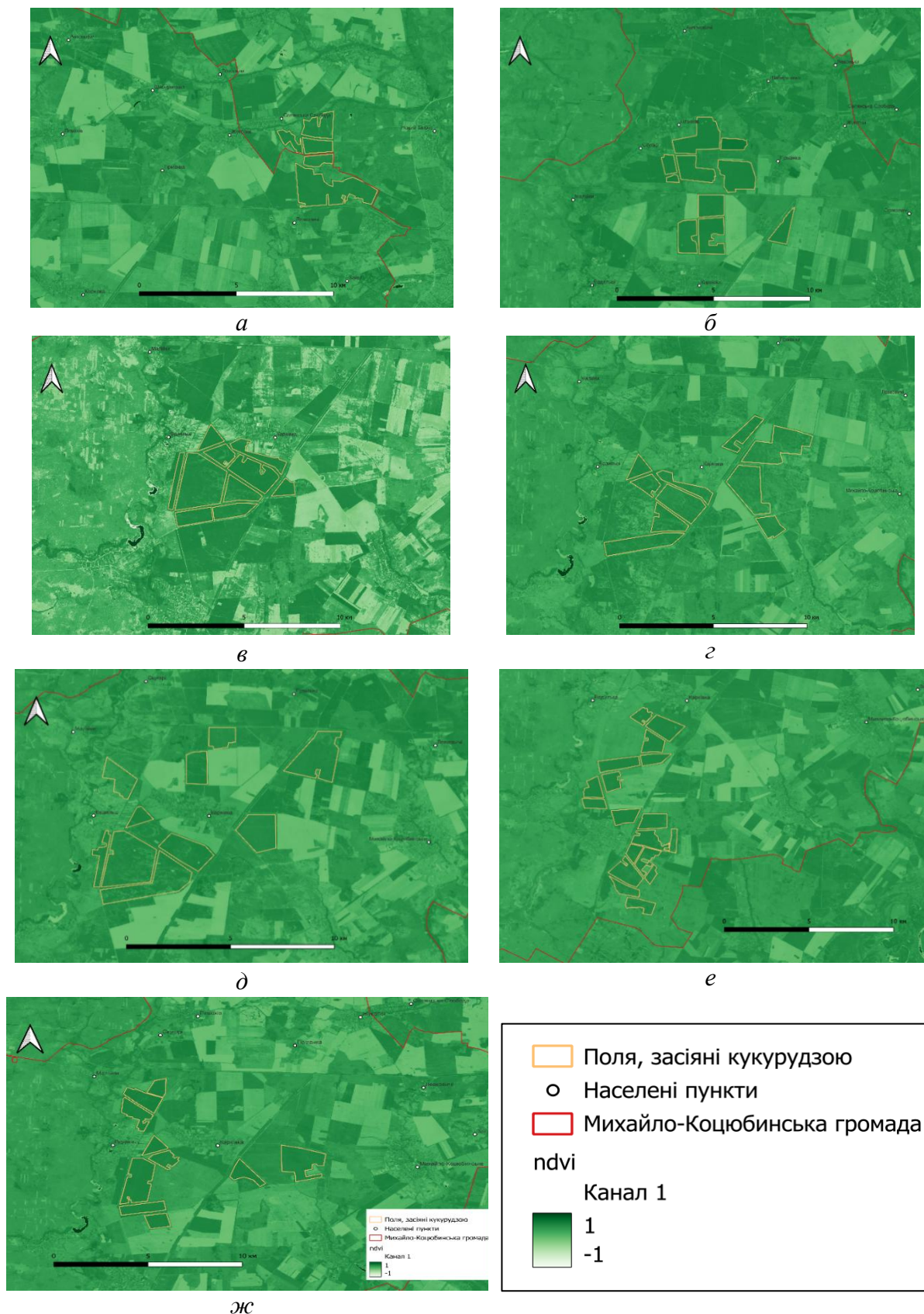


Рис. 7. Розрахований NDVI для знімків 2017-2023 років:
 а – 16.08.2017; б – 11.08.2018; в – 19.08.2019; г – 05.08.2020; д – 15.08.2021;
 е – 18.08.2022; ж – 05.08.2023 (власна розробка за даними [3])

На основі отриманих карт NDVI було виділено території полів із посівами кукурудзи (рис. 8) та виконано їх векторизацію (рис. 9) в ГІС. Аналогічні операції проведено для всіх років досліджуваного періоду.

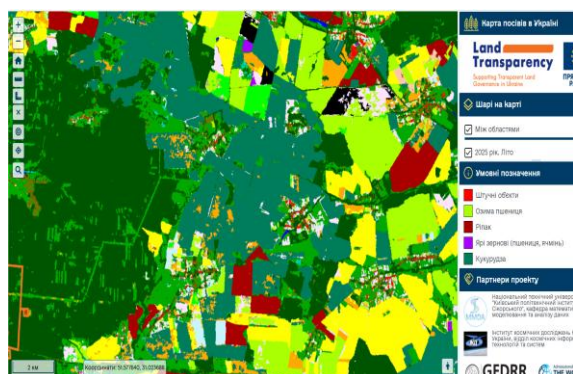


Рис. 8. Виділення території полів з посівами кукурудзи

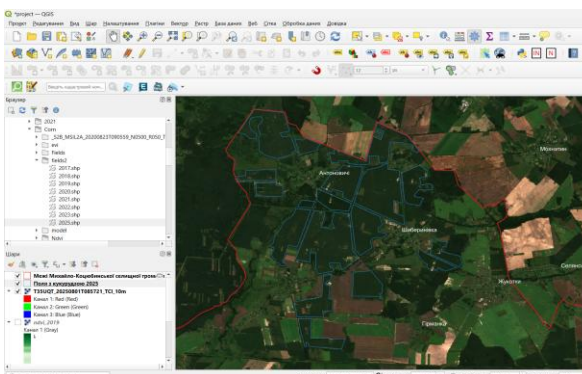


Рис. 9. Векторизація полів в ГІС, засіяних кукурудзою [10]

Для кожного векторизованого поля визначено середнє значення NDVI шляхом зональної статистичної обробки растрових даних із використанням інструмента Zonal Statistics as Table. У результаті сформовано узгоджену вибірку середніх значень NDVI та статистичних показників врожайності кукурудзи за 2017–2023 роки, наведених у (табл. 1).

Таблиця 1 – Обраховані значення NDVI та врожайність за 2017 – 2023 роки [власна розробка за даними 23]

Дата знімку	Середнє значення NDVI полів з кукурудзою	Врожайність (ц/га)
16.08.2017 року	0,575695	75,3
11.08.2018 року	0,605051	94,0
18.08.2019 року	0,56862	79,5
05.08.2020 року	0,550427	77,1
15.08.2021 року	0,561466	85,5
18.08.2022 року	0,561038	76,3
05.08.2023 року	0,604963	92,6

Отримані дані використано для проведення кореляційно-регресійного аналізу в програмному середовищі Statistica 12, де змінна X відповідала значенням NDVI, а змінна Y – показникам врожайності. Побудований графік залежності (рис. 10) засвідчив наявність суттєвого позитивного зв'язку між аналізованими параметрами: коефіцієнт кореляції становить 0,8213, рівень значущості $p < 0,05$, а коефіцієнт детермінації – близько 67 %.

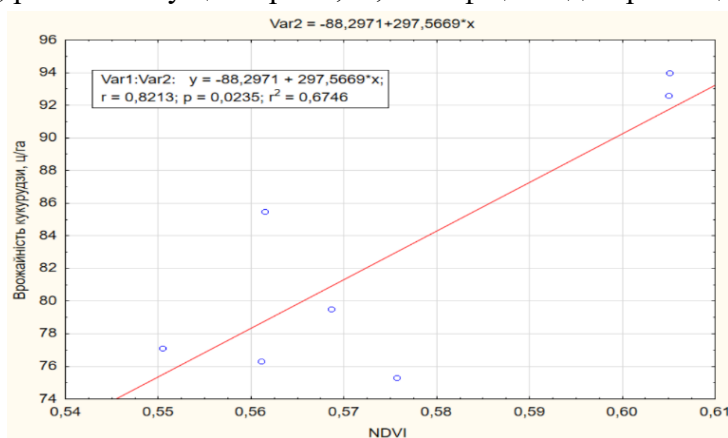


Рис. 10. Графік залежності між NDVI та врожайністю (власна розробка)

На основі отриманих результатів сформовано лінійну регресійну модель прогнозування врожайності кукурудзи, згідно (табл. 1), та є релевантною для умов Чернігівської області.

Побудовану модель застосовано до супутникового знімка за 29.08.2025 року з мінімальною хмарністю, у результаті чого отримано картографічну модель прогнозованої врожайності кукурудзи (рис. 11).

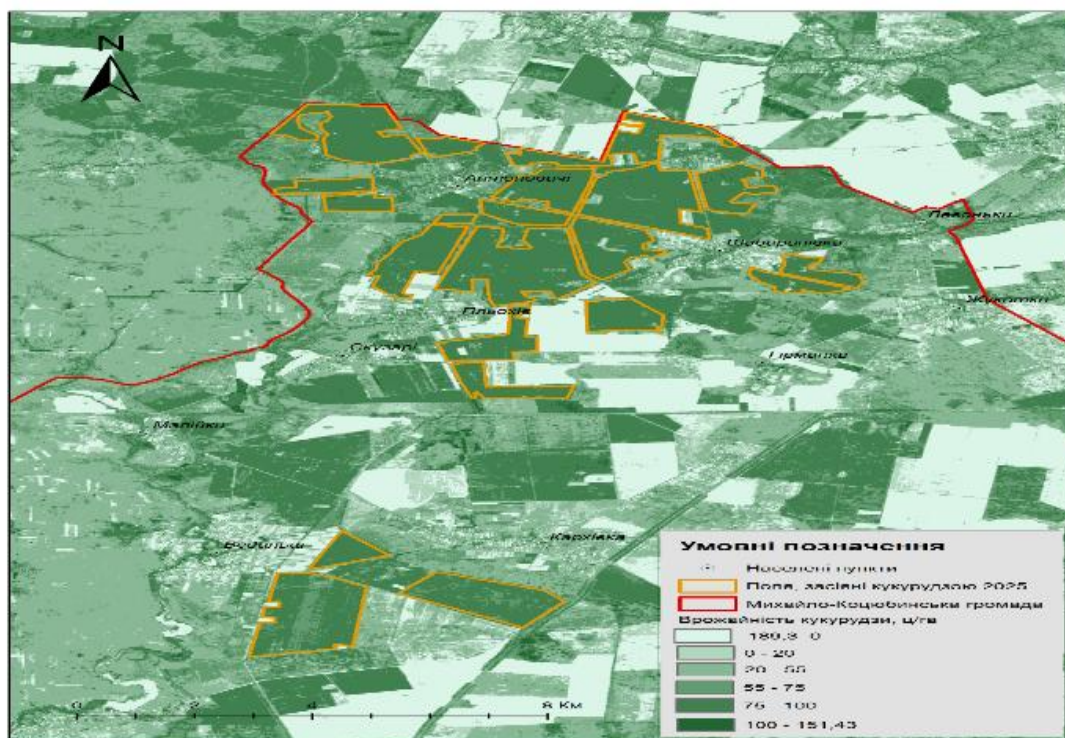


Рис. 11. Картографічна модель прогнозу врожайності кукурудзи за 2025 рік (власна розробка)

Таким чином, у межах дохідного підходу до експертної грошової оцінки земель сільськогосподарського призначення показник урожайності виступає одним із ключових параметрів, що визначає величину очікуваного доходу від використання земельної ділянки. З огляду на це, доцільним є пошук кількісної залежності між урожайністю сільськогосподарських культур та характеристиками стану рослинного покриву, які можуть бути отримані за матеріалами ДЗЗ.

Отже, застосування вегетаційного індексу NDVI у поєднанні зі статистичним аналізом дозволило побудувати математичну модель прогнозування врожайності кукурудзи. Розрахунок формула 6:

$$Y=297,57 \cdot X-88,297. \quad (6).$$

Слід зазначити, що отримана регресійна модель є емпіричною та відображає залежність, характерну для умов Чернігівської області у межах досліджуваного періоду. Її застосування до інших регіонів або культур потребує додаткового калібрування з урахуванням ґрунтово-кліматичних особливостей та агротехнологій.

Подальше використання інструментів просторового аналізу дозволило визначити середні значення врожайності в межах кожної з 650 оцінювальних земельних ділянок. Отримані значення було приєднано до атрибутивної таблиці шару земельних ділянок за ідентифікатором FID, фрагмент рис. 12.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

ГРП	Shape	Категорія	Кадастр. номер	Площа	Врожайність середня, ц/га	Фактична врожайність, ц/га	Чистий операційний дохід, грн	Ставка капіталізації	Ціна, грн	сумит
60	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.05.000.1003	2,98	36,907859	246	174414,6	0,07	2448789	Вадим Лідія Миколаївна
0	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.03.000.0031	0,16	41,654317	7	4635,092	0,07	68214	БЕІ ГАЛУНІ МІКОЛАЙВНІ
325	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.08.000.0316	3,42	44,054401	293	203559,2	0,07	2907860	Галуш Олександр Петрович
321	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.08.000.0017	3	47,645885	242	168490,8	0,07	2407012	
436	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.06.000.0170	3,66	49,303864	313	217808,7	0,07	3111551	Ломано Ніна Василівна
640	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.08.000.1311	0,88	52,356429	79	55074,41	0,07	788777	Пархоменко Григорій Митрофанович
664	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.08.000.4021	0,16	52,794878	15	10421,48	0,07	146876	Михайло-Коцюбинська селищна рада
510	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.06.000.0399	3,28	56,040088	303	210639	0,07	3011971	Котель Валентина Михайлівна
229	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.06.000.1304	0,62	58,104987	56	55692,33	0,07	552170	Пархоменко Григорій Митрофанович
647	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.08.000.1310	0,89	57,651471	79	56268,57	0,07	798400	Пархоменко Григорій Митрофанович
649	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.08.000.1313	0,87	57,651471	79	56268,57	0,07	798400	Морун Юрій Григорович
490	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.08.000.0268	3,78	60,361218	349	242436,7	0,07	348331	Марченко Віра Григорівна
443	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.06.000.0177	3,74	62,538733	314	218363,9	0,07	3118627	Борозда Олександр Сергійович
445	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.06.000.0179	3,79	63,262096	320	222005,6	0,07	3182930	Піщко Валентина Миколаївна
230	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.06.000.1305	0,54	66,688773	50	34577,03	0,07	493950	Алісєнко Володимир Вікторович
612	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.08.000.0223	4,12	66,85372	345	239888,5	0,07	3429987	Сора Надія Андрівна
289	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.07.000.0291	3,11	68,159601	271	168587,6	0,07	2693624	Лисенко Наталія Миколаївна
395	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.06.000.0083	3,39	68,23543	294	204415,3	0,07	2920219	Новосад Валентина Василівна
322	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.08.000.0064	2,97	68,461854	262	132154	0,07	2602200	
228	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.06.000.1303	0,63	68,930328	57	39917,96	0,07	570257	Ярошенко Зінаїда Григорівна
131	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.06.000.0104	3,31	69,076742	287	185388	0,07	264840	Ярош Любов Станіславівна
619	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.08.000.0232	3,56	69,132448	308	213668,8	0,07	3055260	Колішко Михайло Петрович
326	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.08.000.0330	3,03	69,697511	251	174563,7	0,07	2493767	Ятченко Юрій Миколайович
396	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.06.000.0084	3,47	69,98437	311	216291,2	0,07	3089874	Лобченко Ольга Анатолівна
620	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.08.000.0233	3,59	70,215522	301	209243,3	0,07	2989194	Серепо Микола Петрович
231	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.06.000.1311	0,63	70,362079	58	40345,4	0,07	576363	Назаренко Тамара Іванівна
444	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.06.000.0178	3,81	70,518989	321	223321	0,07	3190310	Піщко Валентина Миколаївна
315	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.07.000.2036	0,7	70,564528	49	33930,8	0,07	484728	МИХАЙЛО-КОЦЮБІНСЬКА СЕЛИЩНА
504	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.06.000.0292	3,77	70,764402	345	239615,1	0,07	3423074	Конюх Іван Миколайович
397	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.06.000.0085	3,48	71,258258	300	208750,2	0,07	2962146	Лобченко Ольга Анатолівна
232	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.06.000.1312	0,63	72,01047	58	40277,03	0,07	575306	Жигун Зінаїда Григорівна
306	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.07.000.0310	3,42	72,024384	284	197448,1	0,07	2820687	Назаренко Тамара Іванівна
53	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.05.000.0505	3,17	72,101736	229	158950	0,07	2270629	Стародуб Петро Михайлович
437	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.08.000.0171	3,99	72,331948	336	233519,4	0,07	3335991	Шеремет Катерина Станіславівна
52	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.05.000.0503	3,1	72,814141	226	158984,3	0,07	2262812	Рудченко Олексій Ісаківич
227	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.06.000.1271	0,51	72,996324	37	22541,34	0,07	364676	
368	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.05.000.1266	1,07	73,43277	98	68442,52	0,07	977759	Бакун Надія Володимирівна
51	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.05.000.0502	3,23	73,621604	238	165381,4	0,07	2362591	Малащенко Тамара Миколаївна

Рис. 12. Результат приєднання атрибутів з розрахованої таблиці із середніми значеннями пікселів до шару земельних ділянок (власна розробка)

На основі прогнозованої врожайності визначено обсяг валової продукції шляхом множення показників урожайності на площі земельних ділянок. Для розрахунку доходу використано середню ринкову ціну реалізації зерна кукурудзи, що становить 6954,7 грн/т [28]. Визначення експертної грошової оцінки здійснювалося методом капіталізації чистого операційного доходу із застосуванням ставки капіталізації 7 %, що відповідає чинним методичним рекомендаціям [14]. Усі розрахунки виконано в середовищі ГІС із використанням калькулятора полів, фрагмент (рис. 13).

ГРП	Shape	Категорія	Кадастровий номер	Площа	Врожайність середня, ц/га	Фактична врожайність, ц/га	Чистий операційний дохід, грн	Ставка капіталізації	Ціна, грн	сумит
60	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.05.000.1003	2,98	36,907859	246	174414,6	0,07	2448789	Вадим Лідія Миколаївна
0	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.03.000.0031	0,16	41,654317	7	4635,092	0,07	68214	БЕІ ГАЛУНІ МІКОЛАЙВНІ
325	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.08.000.0316	3,42	44,054401	293	203559,2	0,07	2907860	Галуш Олександр Петрович
321	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.08.000.0017	3	47,645885	242	168490,8	0,07	2407012	
436	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.06.000.0170	3,66	49,303864	313	217808,7	0,07	3111551	Ломано Ніна Василівна
640	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.08.000.1311	0,88	52,356429	79	55074,41	0,07	788777	Пархоменко Григорій Митрофанович
664	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.08.000.4021	0,16	52,794878	15	10421,48	0,07	146876	Михайло-Коцюбинська селищна рада
510	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.06.000.0399	3,28	56,040088	303	210639	0,07	3011971	Котель Валентина Михайлівна
229	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.06.000.1304	0,62	58,104987	56	55692,33	0,07	552170	Пархоменко Григорій Митрофанович
647	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.08.000.1310	0,89	57,651471	79	56268,57	0,07	798400	Пархоменко Григорій Митрофанович
649	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.08.000.1313	0,87	57,651471	79	56268,57	0,07	798400	Морун Юрій Григорович
490	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.08.000.0268	3,78	60,361218	349	242436,7	0,07	348331	Марченко Віра Григорівна
443	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.06.000.0177	3,74	62,538733	314	218363,9	0,07	3118627	Борозда Олександр Сергійович
445	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.06.000.0179	3,79	63,262096	320	222005,6	0,07	3182930	Піщко Валентина Миколаївна
230	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.06.000.1305	0,54	66,688773	50	34577,03	0,07	493950	Алісєнко Володимир Вікторович
612	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.08.000.0223	4,12	66,85372	345	239888,5	0,07	3429987	Сора Надія Андрівна
289	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.07.000.0291	3,11	68,159601	271	168587,6	0,07	2693624	Лисенко Наталія Миколаївна
395	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.06.000.0083	3,39	68,23543	294	204415,3	0,07	2920219	Новосад Валентина Василівна
322	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.08.000.0064	2,97	68,461854	262	132154	0,07	2602200	
228	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.06.000.1303	0,63	68,930328	57	39917,96	0,07	570257	Ярошенко Зінаїда Григорівна
131	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.06.000.0104	3,31	69,076742	287	185388	0,07	264840	Ярош Любов Станіславівна
619	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.08.000.0232	3,56	69,132448	308	213668,8	0,07	3055260	Колішко Михайло Петрович
326	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.08.000.0330	3,03	69,697511	251	174563,7	0,07	2493767	Ятченко Юрій Миколайович
396	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.06.000.0084	3,47	69,98437	311	216291,2	0,07	3089874	Лобченко Ольга Анатолівна
620	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.08.000.0233	3,59	70,215522	301	209243,3	0,07	2989194	Серепо Микола Петрович
231	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.06.000.1311	0,63	70,362079	58	40345,4	0,07	576363	Назаренко Тамара Іванівна
444	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.06.000.0178	3,81	70,518989	321	223321	0,07	3190310	Піщко Валентина Миколаївна
315	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.07.000.2036	0,7	70,564528	49	33930,8	0,07	484728	МИХАЙЛО-КОЦЮБІНСЬКА СЕЛИЩНА
504	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.06.000.0292	3,77	70,764402	345	239615,1	0,07	3423074	Конюх Іван Миколайович
397	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.06.000.0085	3,48	71,258258	300	208750,2	0,07	2962146	Лобченко Ольга Анатолівна
232	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.06.000.1312	0,63	72,01047	58	40277,03	0,07	575306	Жигун Зінаїда Григорівна
306	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.07.000.0310	3,42	72,024384	284	197448,1	0,07	2820687	Назаренко Тамара Іванівна
53	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.05.000.0505	3,17	72,101736	229	158950	0,07	2270629	Стародуб Петро Михайлович
437	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.08.000.0171	3,99	72,331948	336	233519,4	0,07	3335991	Шеремет Катерина Станіславівна
52	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.05.000.0503	3,1	72,814141	226	158984,3	0,07	2262812	Рудченко Олексій Ісаківич
227	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.06.000.1271	0,51	72,996324	37	22541,34	0,07	364676	
368	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425589900.05.000.1266	1,07	73,43277	98	68442,52	0,07	977759	Бакун Надія Володимирівна
51	Polygon ZM	Землі сільськогосподарського призначення	7425587200.05.000.0502	3,23	73,621604	238	165381,4	0,07	2362591	Малащенко Тамара Миколаївна

Рис. 13. Атрибути з розрахованими значеннями чистого операційного доходу та вартості земельних ділянок (власна розробка)

Підсумковим результатом дослідження є карта експертної грошової оцінки земельних ділянок, розташованих у межах Михайло-Коцюбинської територіальної громади (рис. 14).

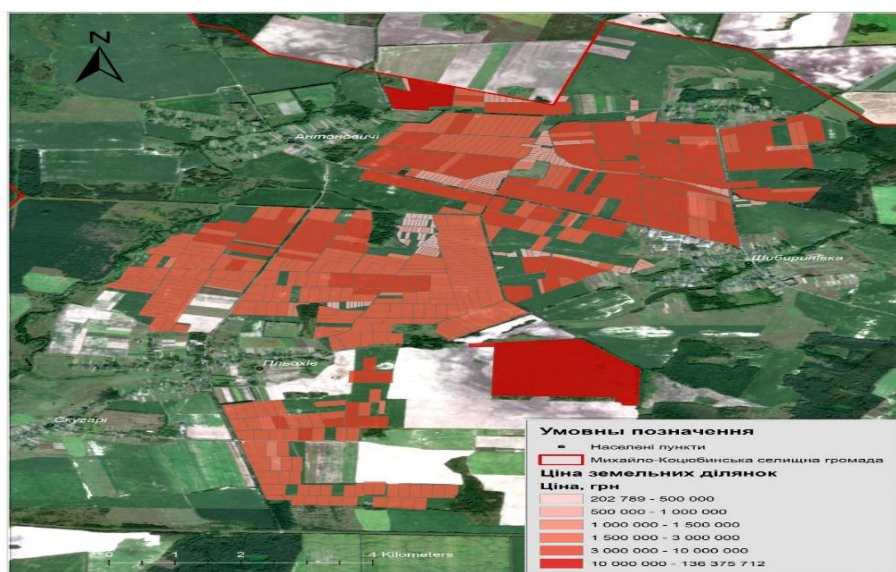


Рис. 14. Результати проведення експертної грошової оцінки (власна розробка)

Зазначені значення відображають капіталізований дохід для великих за площею земельних масивів і не є прямим аналогом ринкової ціни одиначної земельної ділянки.

Ціни земельних ділянок коливаються в межах від 202 тис. до 136 млн грн залежно від площі та обчисленої врожайності земельної ділянки. Отримані значення вартості мають значний діапазон і перевищують очікувані середні ринкові показники, що зумовлено методичними особливостями розрахунку. У межах цього дослідження дохід визначався на основі валової продукції без детального врахування виробничих витрат, пов'язаних із вирощуванням кукурудзи. Таким чином, отримані результати слід розглядати як порівняльну експертну оцінку, що відображає відносні відмінності продуктивності земельних ділянок, а не як остаточну ринкову вартість з урахуванням повного циклу витрат (значення варіюються в районі 75 ц/га – 90 ц/га), та офіційних ринкових цін на продукцію. Проте, слід зауважити, що це ціни без врахування виробничих витрат на виробництво зерна кукурудзи. Ці витрати можуть включати в себе обробіток ґрунту, закупівлю відповідних добрив та їх реалізацію внесення за допомогою агродронів, полив, паливно-мастильні матеріали тощо.

Визначені значення вартості коливаються в широкому діапазоні, що зумовлено відмінностями площ земельних ділянок та рівнем їх прогнозованої продуктивності. Просторовий аналіз результатів експертної грошової оцінки дозволив виявити закономірності розподілу вартості земельних ділянок залежно від їхньої площі та рівня продуктивності посівів. Найвищі показники характерні для великих за площею угідь із підвищеними значенням NDVI тоді як нижчі – для дрібних і просторово неоднорідних ділянок, які зокрема розташовані біля транспортної інфраструктури або на деградованих ґрунтах.

Висновки. Застосування технологій ГІС та ДЗЗ при здійсненні експертної грошової оцінки дає можливість визначення об'єктивної вартості земель сільськогосподарського призначення, а отже, і ухвалення ефективних управлінських рішень щодо управління земельними ресурсами та здійснення економічно ефективного їх використання.

Проведено аналіз нормативно-правових та методичних положень, що регламентують проведення експертної грошової оцінки земельних ділянок в Україні. Згідно з цими положеннями застосовуються три основні методичні підходи: зіставлення цін продажу аналогічних земельних ділянок, урахування витрат на земельні поліпшення та метод капіталізації чистого операційного (рентного) доходу. У роботі обґрунтовано доцільність використання саме методу капіталізації рентного доходу, який відображає економічний

потенціал сільськогосподарських угідь. Наукові дослідження закордонних та вітчизняних фахівців вказують на можливість визначення врожайності за даними ДЗЗ з високою точністю результатів.

Встановлено залежність між середніми значеннями вегетаційного індексу NDVI для полів з кукурудзою, отриманих із супутникових знімків Sentinel-2, та статистичними показниками врожайності кукурудзи по Чернігівській області за 2017–2023 роки. Проведений кореляційно-регресійний аналіз показав високий позитивний зв'язок між цими параметрами ($r = 0,8213$), що підтвердило можливість використання NDVI як надійного показника прогнозу врожайності.

На основі розрахованої моделі залежності «NDVI – статистична врожайність кукурудзи» було створено прогноз врожайності кукурудзи на 2025 рік. Отримана картографічна модель дозволила оцінити просторову мінливість продуктивності сільськогосподарських угідь у межах Михайло-Коцюбинської територіальної громади Чернігівського району.

Проведено розрахунок експертної грошової оцінки земельних ділянок шляхом визначення рентного доходу (добуток прогнозованої врожайності на ринкову ціну зерна — 6954,7 грн/т) і подальшої його ділення на запропоновану ставку капіталізації 7 % (0,07). Результати розрахунків показали значну варіацію вартості земель — від приблизно 202 тис. грн до понад 136 млн грн, що обумовлено відмінностями у площі ділянок, рівні прогнозованої врожайності та агроекологічних умовах.

Робота може бути вдосконалена шляхом використання даних щодо виробничих витрат на вирощування та збір кукурудзи та статистичних даних щодо врожайності культур в розрізі агропромислових груп ґрунтів. Також може бути запропоновано використання ряду інших вегетаційних індексів (EVI, LAI) в перспективі отримання більш точних даних врожайності.

Отримані результати підтверджують ефективність інтеграції методів з використанням ДЗЗ та геоінформаційного аналізу у процесі експертної грошової оцінки. Такий підхід дає змогу підвищити точність визначення рентного доходу, отримати науково обґрунтовані результати оцінки та створити основу для автоматизованого визначення вартості сільськогосподарських угідь.

Впровадження і адаптація запропонованих підходів може істотно підвищити точність, узгодженість і прозорість системи оцінки землі.

Список використаних джерел

1. Baret, F., & Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35, 161–173.
2. Бурачек, В. Г., Железняк, О. О., & Зацерковний, В. І. (2011). *Геоінформаційний аналіз просторових даних*. НДУ ім. М. Гоголя.
3. Copernicus. (2025). *Copernicus Browser*. <https://browser.dataspace.copernicus.eu>.
4. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., et al. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36.
5. EOS Data Analytics. (2025). *EOS Satellite Monitoring*. <https://crop-monitoring.eos.com/main-map/fields/all>.
6. European Space Agency (ESA). (2015). *Sentinel-2 user handbook*. ESA.
7. Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295–309.
8. Jensen, J. R. (2016). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective*. New York, NY: Pearson.
9. Kussul, N., Lavreniuk, M., Shelestov, A., Skakun, S., & Yailymov, B. (2017). *Agriculture land appraisal with use of remote sensing and infrastructure data*. <https://scispace.com/pdf/agriculture-land-appraisal-with-use-of-remote-sensing-and-3a87cm2m.pdf>.
10. Land Transparency. (2025). *Карта посівів в Україні*. <https://ukraine-cropmaps.com>.

11. Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. New York, NY: Wiley.
12. Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information systems and science*. Hoboken, NJ: Wiley.
13. Мартин, А. Г. (2011). *Економіка землекористування*. Аграрна наука.
14. Мельничук, В. О. (2025). Експертна грошова оцінка земельних ділянок сільськогосподарського призначення: нові підходи до визначення ставки капіталізації. *Облік і фінанси АПК: науково-освітній портал*. <https://magazine.faaf.org.ua/ekspertna-groshova-ocinka-zemelnih-dilyanok-silskogospodarskogo-priznachennya-novi-pidhodi-do-viznachennya-stavki-kapitalizacii.html>.
15. Михайло-Коцюбинська селищна територіальна громада. (2022). *Стратегія розвитку Михайло-Коцюбинської селищної територіальної громади*.
16. Верховна Рада України. (2011). Про Державний земельний кадастр, Закон України від 7 липня 2011 р. № 3613-VI (зі змінами). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3613-17>.
17. Верховна Рада України. (2003). Про землеустрій, Закон України від 22 травня 2003 р. № 858-IV (зі змінами). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15>.
18. Верховна Рада України. (2003). Про оцінку земель, Закон України від 11 грудня 2003 р. № 1378-IV (зі змінами). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1378-15>.
19. Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, 309–317.
20. Третяк, А. М. (2010). *Земельні ресурси України: оцінка, використання, охорона*. ДІА.
21. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127–150.
22. Державна служба статистики України. (2025). *Площі, валові збори та урожайність сільськогосподарських культур за їх видами та по регіонах*. https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2022/sg/pvzu/arch_pvhu_reg.htm.
23. Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру. (2025). *Електронні сервіси Державного земельного кадастру*. <https://e.land.gov.ua/services>.
24. ТОВ «МінфінМедіа». (2025). *Світові ціни на кукурудзу*. <https://index.minfin.com.ua/ua/markets/commodities/corn>.
25. Залозний, О. А. (2020). *Проект землеустрою, що забезпечує еколого-економічне обґрунтування сівозмін та впорядкування угідь земельної ділянки (кадастровий номер 7425588700:09:000:5491, площа 14,2274 га, у тому числі сіножаті 0,6450 га), що перебуває в користуванні на умовах оренди гр. Пугача В. І., Терехівська сільська рада, Чернігівський район, Чернігівська область*. Чернігів.
26. Зацерковний, В. І., & Тішаєв, І. В. (2014). *ГІС у землеустрої та кадастрі*. Логос.
27. Зацерковний, В. І., Тішаєв, І. В., & Віршило, І. В. (2016). *Геоінформаційні системи в науках про Землю*. НДУ ім. М. Гоголя.
28. Верховна Рада України. (2001). Земельний кодекс України, Закон України від 25 жовтня 2001 р. № 2768-III (зі змінами та доповненнями). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14>.
29. Кабінет Міністрів України. (2002). *Методика експертної грошової оцінки земельних ділянок: Затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 11 жовтня 2002 р. № 1531 (у чинній редакції)*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1531-2002>.

References

1. Baret, F., & Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35, 161–173.
2. Burachek, V. H., Zhelezniak, O. O., & Zatserkovnyi, V. I. (2011). *Heoinformatsiyni analiz prostorovykh danykh [Geoinformation analysis of spatial data]*. NDU im. M. Hoholia.
3. Copernicus. (2025). *Copernicus Browser*. <https://browser.dataspace.copernicus.eu>.
4. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., et al. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36.
5. EOS Data Analytics. (2025). *EOS satellite monitoring*. <https://crop-monitoring.eos.com/main-map/fields/all>.
6. European Space Agency (ESA). (2015). *Sentinel-2 user handbook*. ESA.

7. Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295–309.
8. Jensen, J. R. (2016). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (4th ed.). New York: Pearson.
9. Kussul, N., Lavreniuk, M., Shelestov, A., Skakun, S., & Yailymov, B. (2017). *Agriculture land appraisal with use of remote sensing and infrastructure data*. <https://scispace.com/pdf/agriculture-land-appraisal-with-use-of-remote-sensing-and-3a87cm2m.pdf>.
10. Land Transparency. (2025). *Crop map of Ukraine*. <https://ukraine-cropmaps.com>.
11. Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). New York: Wiley.
12. Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information systems and science* (4th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
13. Martyn, A. H. (2011). *Ekonomika zemlekorystuvannia [Economics of Land Use]*. Ahrarna nauka.
14. Melnychuk, V. O. (2025). Ekspertna hroshova otsinka zemelnykh dilianok silskohospodarskoho pryznachennia: novi pidkhody do vyznachennia stavky kapitalizatsii [Expert monetary valuation of agricultural land plots: new approaches to determining the capitalisation rate]. *Oblik i finansy APK: naukovo-osvitnii portal – Accounting and finance in agriculture: scientific and educational portal*. <https://magazine.faaf.org.ua/ekspertna-groshova-ocinka-zemelnih-dilyanok-silskogospodarskogo-pryznachennia-novi-pidhodi-do-viznachennia-stavki-kapitalizatsii.html>.
15. Mykhailo-Kotsiubynska selyshchna terytorialna hromada [Mykhailo-Kotsiubynska settlement territorial community]. (2022). *Stratehiia rozvytku Mykhailo-Kotsiubynskoi selyshchnoi terytorialnoi hromady – Development strategy for the Mykhailo-Kotsiubynskiy settlement territorial community*.
16. Verkhovna Rada Ukrainy [Verkhovna Rada of Ukraine]. (2011). *Pro Derzhavnyi zemelnyi kadastr [On the State Land Cadastre], Law of Ukraine No. 3613-VI dated 7 July 2011 (as amended)*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3613-17>.
17. Verkhovna Rada Ukrainy [Verkhovna Rada of Ukraine]. (2003). *Pro zemleustrii [On Land Management], On Land Management, Law of Ukraine dated No. 858-IV (as amended)*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15>.
18. Verkhovna Rada Ukrainy [Verkhovna Rada of Ukraine]. (2003). *Pro otsinku zemel [On Land Valuation], Law of Ukraine No. 1378-IV (as amended)*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1378-15>.
19. Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium* (pp. 309–317).
20. Tretiak, A. M. (2010). *Zemelni resursy Ukrainy: otsinka, vykorystannia, okhorona [Land resources of Ukraine: assessment, use, protection]*. DIA.
21. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127–150.
22. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy [State Statistics Service of Ukraine]. (2025). *Ploshchi, valovi zbory ta urozhainist silskohospodarskykh kultur za yikh vydamy ta po rehionakh [Areas, gross harvests and yields of agricultural crops by type and region]*. https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2022/sg/pvzu/arch_pvxu_reg.htm.
23. Derzhavna sluzhba Ukrainy z pytan heodezii, kartohrafii ta kadastru [State Service of Ukraine for Geodesy, Cartography and Cadastre]. (2025). *Elektronni servisy Derzhavnoho zemelnogo kadastru. – Electronic services of the State Land Cadastre*. <https://e.land.gov.ua/services>.
24. MinfinMedia LLC. (2025). *Svitovi tsiny na kukurudzu [World corn prices]*.
25. Zaloznyi, O. A. (2020). Proiekt zemleustroi, shcho zabezpechuie ekoloho-ekonomichne obgruntuvannia sivozmin ta vporiadkuvannia uhid zemelnoi dilianky (kadaastrovyi nomer 7425588700:09:000:5491, ploshcha 14,2274 ha, u tomu chysli sinozhati 0,6450 ha), shcho perebuvaie v korystuvanni na umovakh orendy hr. Puhacha V. I., Terekhivska silska rada, Chernihivskiy raion, Chernihivska oblast [Land management project providing ecological and economic justification for crop rotation and land improvement of a land plot (cadastral number 7425588700:09:000:5491, area 14.2274 ha, including hayfields 0.6450 ha), which is used on lease terms by Mr. V. I. Pugach, Terekhivska Village Council, Chernihiv District, Chernihiv Region].

26. Zatserkovnyi, V. I., & Tishaiev, I. V. (2014). *HIS u zemleustroi ta kadastri [GIS in land management and cadastre]*. Logos.
27. Zatserkovnyi, V. I., Tishaiev, I. V., & Virshylo, I. V. (2016). *Heoinformatsiini systemy v naukakh pro Zemliu [Geographic Information Systems in Earth Sciences]*. NDU im. M. Hoholia.
28. Verkhovna Rada Ukrainy [Verkhovna Rada of Ukraine]. (2001). *Zemelnyi kodeks Ukrainy [Land Code of Ukraine]*, Law of Ukraine No. 2768-III (as amended and supplemented). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14>.
29. Kabinet Ministriv Ukrainy [Cabinet of Ministers of Ukraine]. (2002). *Metodyka ekspertnoi hroshovoi otsinky zemelnykh dilianok: Zatverdzhena postanovoiu Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 11 zhovtnia 2002 r. № 1531 [Methodology for expert monetary valuation of land plots: Approved by Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1531 dated 11 October 2002]* (as amended). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1531-2002>.

Дата першого надходження статті до видання: 24.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.12.2025

UDC 528.94:332.3

Vitaliy Zatserkovny¹, Victor Vorokh², Volodymyr Ivshyn³, Oleksandr Derkach⁴

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Geoinformatics
Taras Shevchenko National University (Kyiv, Ukraine)

E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5187-6125>. Scopus ID: 57200165109

²Graduate Student of the Department of Geoinformatics
Taras Shevchenko National University (Kyiv, Ukraine)

E-mail: fainkucha@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0112-8422>

³Bachelor's student of the Department of Geoinformatics
Taras Shevchenko National University (Kyiv, Ukraine)

E-mail: vovaiysin6@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0858-7655>

⁴Master's Student of the Department of Geoinformatics
Taras Shevchenko National University (Kyiv, Ukraine)

E-mail: d.derkach2014@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2534-6446>

USE OF REMOTE SENSING AND GIS IN EXPERT MONETARY VALUATION OF AGRICULTURAL LANDS: A CASE STUDY OF CHERNIHIV REGION

The article examines the possibilities of applying geographic information systems (GIS) and Earth remote sensing data in expert monetary valuation of agricultural land. The relevance of the study is determined by the introduction of the agricultural land market in Ukraine, which requires more substantiated and transparent approaches to land value assessment. The use of only regulatory indicators or averaged statistical data does not allow for adequate consideration of spatial variability in land productivity.

The object of the study is agricultural land parcels located within the Mykhailo-Kotsiubynske territorial community of Chernihiv district, selected agricultural fields cultivated with maize. To assess land productivity, Sentinel-2 satellite imagery for the period 2017–2023 and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) were used. Based on average NDVI values and official statistical data on maize yields, a correlation and regression analysis was carried out, which revealed a stable relationship between the spectral characteristics of crops and actual yield values.

The obtained relationship was applied for spatial forecasting of maize yield within individual land parcels using GIS tools. Further calculations were performed in accordance with the income approach by determining rental income and its capitalization. As a result, cartographic materials of expert monetary valuation were developed, reflecting spatial differences in land value. The results confirm the feasibility of integrating GIS and remote sensing data to improve the reliability and objectivity of expert monetary valuation of agricultural land.

Keywords: expert monetary valuation; agricultural land; geographic information systems (GIS); Earth remote sensing (RS); Normalized Difference Vegetation Index (NDVI); maize yield; rental income; income approach.

Fig.: 14. Table.: 1. References: 29.

Володимир Андрійович Іванишин¹, Микола Миколайович Корзаченко²,

Єгор Іванович Чорний

¹доктор геологічних наук, професор кафедри геодезії, картографії та землеустрою

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: gkz.kaf@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2394-1837>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: korzachenko_87@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5674-8662>. ResearcherID: F-5177-2016

SCOPUS Author ID: 57330883100

³виконувач обов'язків директора ДП «ВОДЗЕМПРОЄКТ»

ПРАТ «ЧЕРНІГІВВОДЗЕМПРОЄКТ»

Загинув 20 лютого 2023 року під час виконання бойового завдання

РЕЗУЛЬТАТИ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПІД БУДІВНИЦТВО ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНОГО ЦЕНТРУ НА ВУЛ. КІЛЬЦЕВІЙ М. ЧЕРНІГОВА

За результатами польових і лабораторних робіт на досліджуваній ділянці до глибини 11,8 м встановлені сучасні техногенні, елювіальні, еолово-делювіальні, озерно-льодовикові та льодовикові відкладення верхньо- і середньочетвертинного віку. У них виділено 11 інженерно-геологічних елементів (ІГЕ) на підставі неоднорідності відкладень, просторових змін природної вологості, пластичності, результатів статичного зондування ґрунтів. На ділянці залягають ґрунти з особливими властивостями. Рівень ґрунтових вод встановлений на глибині 3,3-3,8 м ділянка належить до підтоплюваних. Освоєння ділянки призведе до змін геологічних умов через збільшення техногенного навантаження на природне середовище.

Ключові слова: відкладення, ґрунти, горизонт, інженерно-геологічні елементи, свердловина, статичне зондування.

Рис.: 4. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Інженерно-геологічні дослідження перед початком будівництва будь-яких об'єктів мають ключове значення для забезпечення безпеки споруд і мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище. Зважаючи на складну будову четвертинних відкладень та мінливість гідрогеологічних умов, такі дослідження є обов'язковими та постійно актуальними, особливо для об'єктів, де техногенне навантаження може суттєво змінювати природне середовище.

Постановка проблеми. Значну частину території України загалом і Чернігівської області зокрема покривають четвертинні відкладення, які поширені нерівномірно, мають різну товщину, літологію, фізико-механічні властивості, вологість. Відсутність детальних інженерно-геологічних даних для окремих ділянок ускладнює прогнозування поведінки ґрунтів під навантаженням і визначення рівня ґрунтових вод, що є критично важливим для безпечного зведення будівель та споруд.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На розглянутій ділянці інженерно-геологічні та гідрогеологічні дослідження раніше не проводилися, тому наукових публікацій, що безпосередньо стосуються цієї території, немає. Проте методологічні підходи до визначення структурних і фізико-механічних характеристик ґрунтів, а також проведення інженерно-геологічних вишукувань описані у роботах [1–3], що дозволяє застосувати їх для розробки плану польових і лабораторних досліджень.

Виділення недослідженої раніше частини загальної проблеми. Недостатньо вивченою залишається деталізація четвертинних відкладень на окремих ділянках Чернігівської області з погляду їх просторової неоднорідності, інженерно-геологічних елементів (ІГЕ) та гідрогеологічних характеристик. Особливо відсутні дані щодо впливу техногенного навантаження на підтоплювані території та ґрунти зі специфічними властивостями.

Метою статті є представлення результатів комплексних інженерно-геологічних та гідрогеологічних досліджень ділянки під будівництво транспортно-логістичного центру

на вул. Кільцевій за межами населеного пункту на території Вознесенської сільської ради Чернігівського району. Робота дозволяє визначити склад і властивості ґрунтів до глибини 11,8 м, виділити 11 інженерно-геологічних елементів, встановити рівень ґрунтових вод та оцінити потенційні зміни геологічних умов у процесі освоєння ділянки.

Виклад основного матеріалу. Інженерно-геологічні вишукування під будівництво транспортно-логістичного центру на вулиці кільцевій за межами населеного пункту в адміністративних границях Вознесенської сільської ради Чернігівського району виконані відділом геології ДП «Водземпроект» ПрАТ «Чернігівводпроект» та ТОВ «Чернігівбудрозвідування» ТОВ «Полісся Інвест» (рис. 1) згідно з державними стандартами та державними нормами (1-11) за участі автора дослідження.

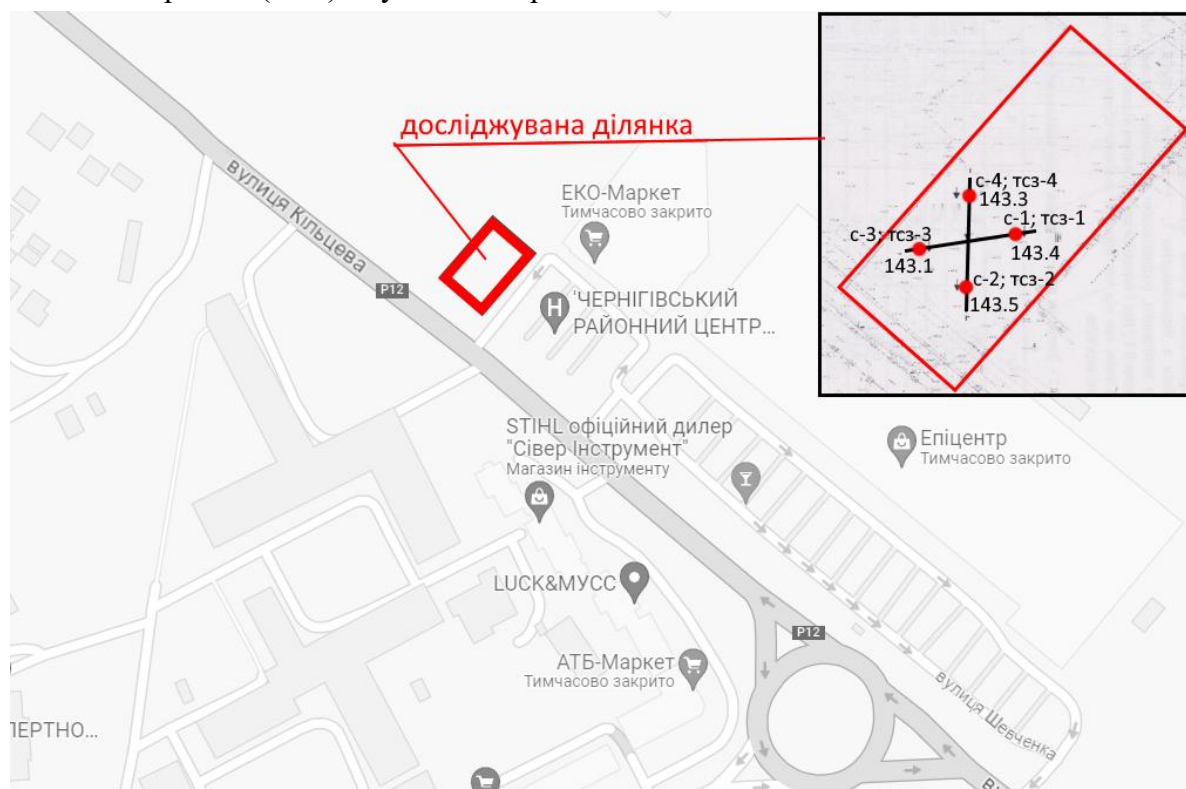


Рис. 1. Схема розташування досліджуваної ділянки по вул. Кільцева в Чернігові з фрагментом розміщення свердловин

Джерело: розроблено авторами.

У подібних інженерно-геологічних умовах поблизу дослідженої ділянки зведені будівлі на палях, приватні будинки на стрічкових, торговельні центри на стовпчастих фундаментах. При їх обстеженні деформацій надфундаментних конструкцій не виявлено.

За геоморфологічними ознаками ділянка знаходиться на Чернігівсько-Городнянській морено-зандровій рівнині, рельєф якої формувався під дією четвертинного зледеніння і людини. Зараз абсолютні відмітки поверхні землі змінюються від 143,1 до 143,7 м.

Види, обсяги і методика виконаних робіт наводяться в табл. 1.

Кліматичні умови району виконання робіт характеризуються помірно-континентальним кліматом. Від'ємні температури повітря спостерігаються в середньому протягом близько чотирьох місяців на рік, що визначає сезонний характер промерзання ґрунтів. Глибина промерзання зазвичай не перевищує 1,0...1,2 м, що необхідно враховувати при оцінюванні стану основ і фундаментів.

Температурний режим характеризується середньорічною температурою повітря близько $+6,5^{\circ}\text{C}$, при можливих значних сезонних коливаннях. Середньорічна кількість атмосферних опадів становить близько 620 мм, що сприяє періодичному зволоженню ґрунтового масиву та може впливати на зміну його фізико-механічних властивостей.

Нормативні значення кліматичних навантажень (вітрове, снігове, а також параметри ожеледиці) прийняті відповідно до вимог ДБН В.1.2:2006 (додаток Е) [9] та використані при подальших інженерних і конструктивних оцінках.

Таблиця 1 – Види, обсяги і методика виконаних робіт

№ з/п	Назва робіт	Методики виконаних робіт	Одиниці виміру	Кількість
Польові роботи				
1.	Буріння свердловин	Механічний спосіб $d=180$ мм	шт./м	4/43,2
2.	Статичне зондування	ДСТУ Б В.2.1-9-2002 [4]	точка	5
3.	Відбір проб ґрунту порушеної структури	ДСТУ Б В.2.1-8-2001 [5]	проба	32
4.	Відбір проб ґрунту непорушеної структури	ДСТУ Б В.2.1-8-2001 [5]	проба	54
Лабораторні роботи				
1.	Консистенція	ДСТУ Б В.2.1-17-2009 [6]	визн.	30
2.	Повний комплекс фізичних властивостей	ДСТУ Б В.2.1-17-2009 [6]	визн.	54
3.	Втрати при прожарюванні	ДСТУ Б В.2.1-16:2009 [7]	визн.	2
4.	Гранулометричний склад	ДСТУ Б В.2.1-19-2009 [8]	визн.	6

Джерело: розроблено авторами.

За результатами вивчення розрізів розкритих свердловинами та статичним зондуванням до глибини 11,8 м (рис. 2) виділені сучасні техногенні відкладення (t IV) представлені насипним ґрунтом товщиною 0,2...0,4 м, сучасними елювіальними ґрунтово-рослинними відкладеннями (e IV) товщиною 0,4...1,0 м, верхньочетвертинними еолово-делювіальними лесоподібними пісками й супісками причорноморського горизонту (vd III pc) товщиною 1,8...3,0 м; верхньо-середньочетвертинними еолово-делювіальними (vd II-III) лесоподібними суглинками товщиною 3,2...4,0 м; середньочетвертинним озерно-льодовиковим суглинком (lg II) товщиною 0,4...0,6 м; середньочетвертинним льодовиковим (g II) супіском та суглинком з домішкою жорстви та щебеню кристалічних порід. Розкрита товщина відкладень цього стратиграфічного підрозділу становить 2,8...4,8 м.

Статичне зондування – це метод інженерно-геологічного дослідження, який дозволяє безпосередньо визначити механічні властивості ґрунтів, їх щільність, несучу здатність та глибину залягання різних інженерно-геологічних елементів. На відміну від звичайних свердловин, зондування дає безперервний профіль ґрунтів, дозволяючи зафіксувати зміни природної вологості, пластичності та щільності на кожному рівні.

Важливість зондування полягає у наступному: оцінка несучої здатності ґрунтів для проєктування фундаментів та інших конструкцій; виявлення слабких та проблемних ґрунтових шарів, які можуть впливати на стійкість споруд; прогнозування деформацій ґрунту під техногенним навантаженням; детальне картування інженерно-геологічних елементів (ІГЕ), що забезпечує точніші дані для проєктування та зменшує ризик помилок під час будівництва. Таким чином, комбінація свердловин і статичного зондування дозволяє отримати максимально достовірну характеристику ґрунтового розрізу та глибини залягання водоносних горизонтів, що є критично важливим для безпечного освоєння ділянки.

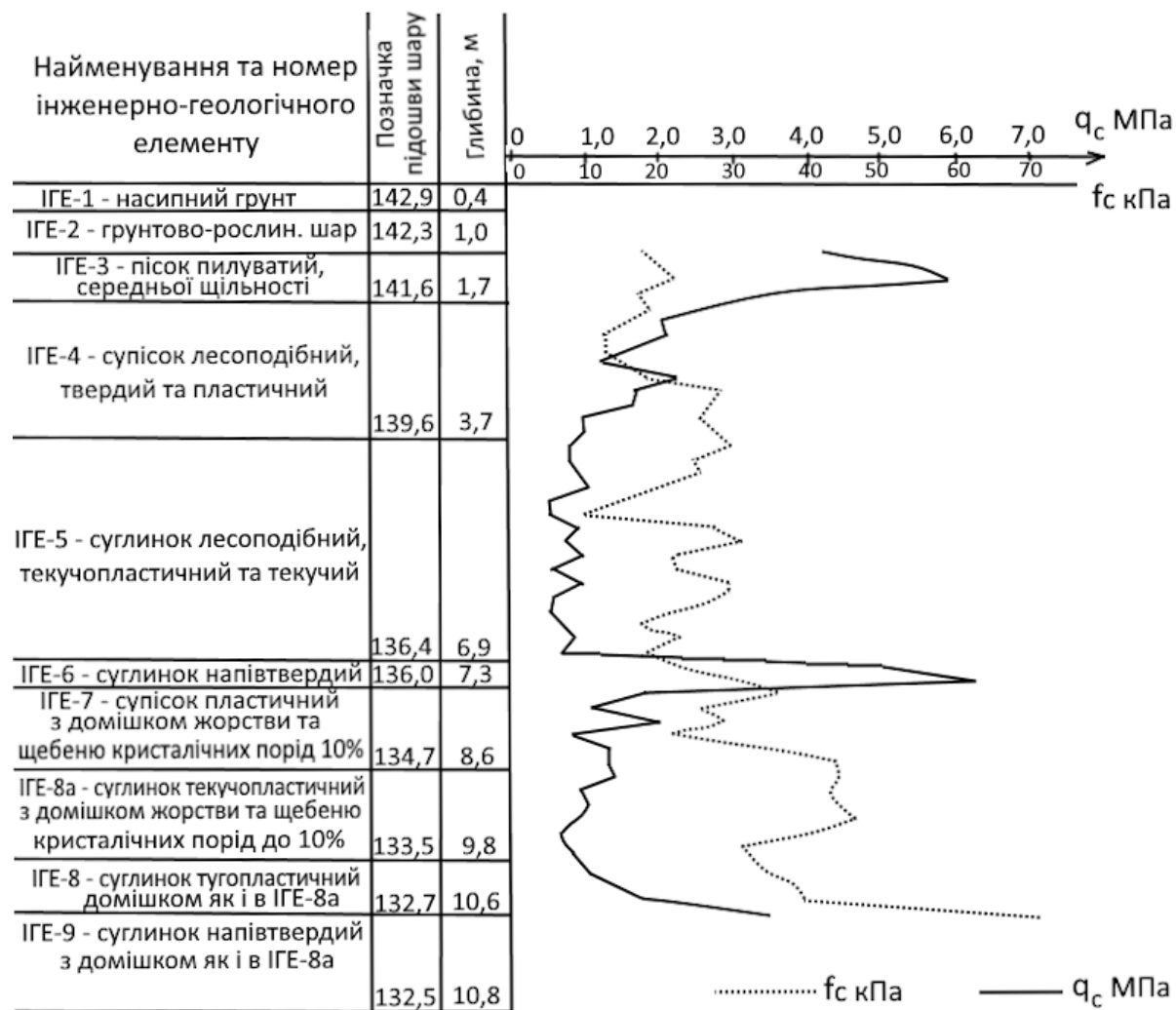


Рис. 2. Діаграма статичного зондування точки 4

Джерело: проектні матеріали ДП «Водземпроект» ПрАТ «Чернігівводпроект» за участі автора дослідження Чорного Є. І.

Інженерно-геологічна модель ділянки відображена на геологічних розрізах І-І' і ІІ-ІІ' (рис. 3).

В розкритому геологічному розрізі за умовами залягання і фізико-механічними властивостями ґрунтів виділено 11 інженерно-геологічних елементів (ІГЕ), які представлені такими відкладеннями:

ІГЕ1 – насипний ґрунт – гумусований темно-сірий із включеннями будівельного сміття;

ІГЕ2 – ґрунтово-рослинний матеріал;

ІГЕ3 – пісок пилюватий, середньої щільності, низьким водонасиченням;

ІГЕ4 – супісок лесоподібний, твердий, пластичний, просідний;

ІГЕ5 – суглинок лесоподібний, текучопластичний та текучий;

ІГЕ5а – суглинок лесоподібний, тугопластичний з прошарками м'якопластичного;

ІГЕ6 – суглинок напівтвердий, з прошарками тугопластичного з конкреціями заліза;

ІГЕ7 – супісок пластичний з домішкою (до 10%) жорсткості та щебеню кристалічних порід;

ІГЕ8 – суглинок тугопластичний, бурий, з домішкою (до 10 %) жорсткості та щебеню кристалічних порід;

ПЕ8а – суглинок текучопластичний, з домішкою (до 10%) жорсткості та щебеню кристалічних порід, виділений за результатами статичного зондування;

ПЕ9 – суглинок напівтвердий, з домішкою (до 10 %) жорсткості та щебеню кристалічних порід.

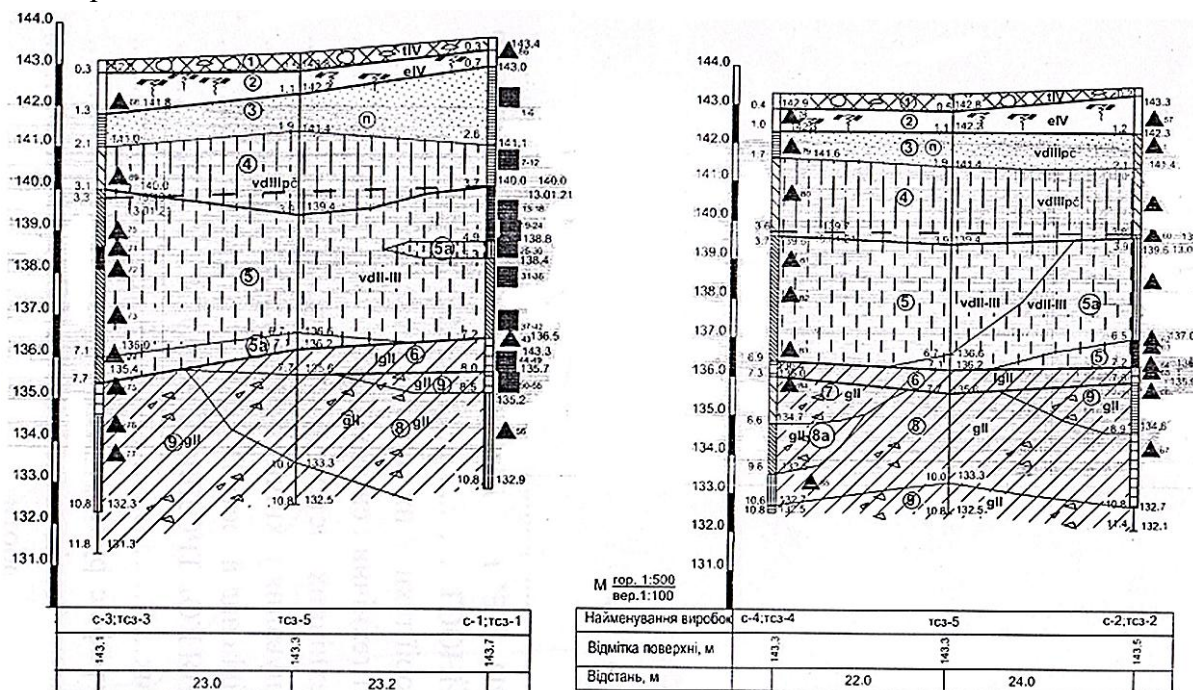


Рис. 3. Геологічний розріз I-I' та II-II'

Джерело: проєктні матеріали ДП «Водземпроект» ПрАТ «Чернігівводпроект» за участі автора дослідження Чорного Є. І.

Інженерно-геологічні елементи виділені відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.1-5-96 [10]. Характеристика міцності та деформації ґрунтів прийнята за відповідними таблицями ДСТУ з врахуванням визначень фізичних властивостей ґрунтів і результатів статичного зондування.

На досліджуваній ділянці до ґрунтів з особливими властивостями віднесені ґрунти ПЕ1 (насипний ґрунт неоднорідний, нерівномірно ущільнений), ПЕ4 (лесоподібні супіски, які при замочуванні будуть просідати), ПЕ5 та 8а (текучі та текучопластичні ґрунти з низькою міцністю).

Загалом ділянка відноситься до I типу ґрунтових умов за просіданням. Для уточнення інженерно-геологічних характеристик на ділянці були проведені компресійні випробування ґрунтів, результати яких наведені у Таблиці «Результати компресійних випробувань» (табл. 2, рис. 4) [11]. Ці випробування дозволяють визначити величину осідання та деформаційні характеристики ґрунту під статичним навантаженням, а також встановити його пружні та пластичні властивості.

Випробування на просідання є одним з ключових етапів інженерно-геологічних робіт перед будівництвом, оскільки вони дозволяють: оцінити ризики нерівномірного осідання фундаментів під різними конструкціями будівель та споруд; визначити допустимі навантаження на ґрунт, що необхідно для проєктування безпечних фундаментів і запобігання тріщинам та деформаціям; розробити оптимальні інженерні рішення щодо підготовки ґрунту або використання спеціальних конструкційних методів (наприклад, ущільнення, армування, заміна слабких ґрунтів); прогнозувати поведінку ґрунтів під час експлуатації об'єкта, що є критично важливим для довгострокової надійності споруд та інфраструктури.

Результати компресійних випробувань у поєднанні з даними зондування та аналізу ґрунтового розрізу дозволяють отримати комплексну характеристику інженерно-геологічних умов ділянки, оцінити її стійкість і ухвалити обґрунтовані рішення щодо проєктування фундаментів і загальної забудови. Висока точність таких робіт є гарантією безпеки будівництва та мінімізації негативного впливу на природне середовище.

Таблиця 2 – Результати компресійних випробувань ІГЕ-4 – сугісок лесоподібний, твердий та пластичний, просідний

Схема досліджу	Кількість	Тиск Р, МПа	Деформація зразку $\Delta h/h$	Коефіцієнт пористості e	Коефіцієнт стисливості m_o , МПа ⁻¹	Модуль деформації Е, МПа
Природна вологість	3	0,0	0,0	0,758	-	-
		0,05	0,014	0,733	0,492	2,6
		0,10	0,03	0,705	0,563	2,3
		0,15	0,043	0,682	0,457	2,8
		0,20	0,055	0,661	0,422	3,1
		0,25	0,071	0,633	0,563	2,3
		0,30	0,086	0,607	0,527	2,5
Насичений водою	3	0,0	0,0	0,758	-	-
		0,05	0,023	0,718	0,809	1,6
		0,10	0,043	0,682	0,703	1,9
		0,15	0,06	0,653	0,598	2,2
		0,20	0,078	0,621	0,633	2,1
		0,25	0,092	0,596	0,492	2,6
		0,30	0,106	0,572	0,492	2,6

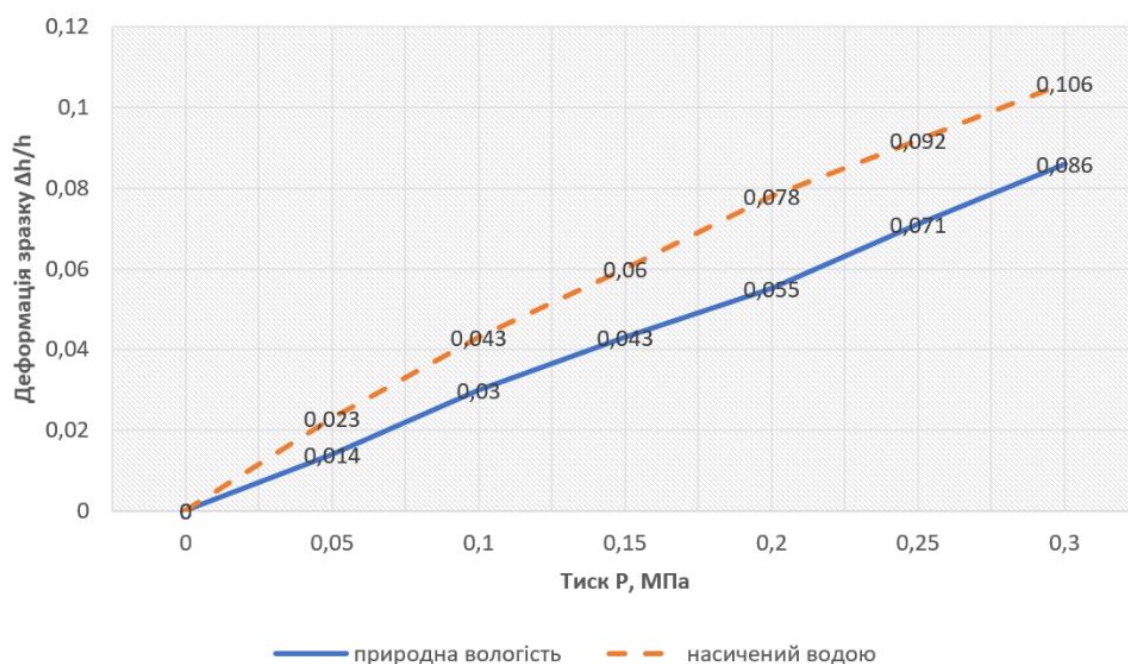


Рис. 4. Результати випробувань на просідність ґрунту

Джерело: розроблено авторами.

Під час вишукувань (січень 2021 р.) рівень ґрунтових вод був встановлений на глибині 3,3...3,8 м (абсолютні відмітки 139,7-140,0 м). Горизонт ґрунтових вод живиться переважно інфільтраційними водами (атмосферні опади) і притоками з суміжних територій, тому рівень цих вод має значні сезонні коливання. Під час весняного сніготанення і сезону дощів він може підніматися, у межінь – знижуватися.

За ступенем підтоплення ділянка відноситься до підтоплюваних, тобто її ґрунтові горизонти періодично або постійно зволожені через близьке залягання рівня ґрунтових вод (3,3...3,8 м). Такі умови створюють низку потенційних ризиків для будівництва та експлуатації споруд. Можливе зниження несучої здатності ґрунтів – вологі або водонасичені шари мають меншу стійкість і можуть деформуватися під навантаженням фундаментів, що призводить до просідань або тріщин у спорудах. Можливий ризик підтоплення підвалів і технічних приміщень та активізація капілярного підйому води. Такі території ускладнюють проведення будівельних робіт – робота на підтоплюваних ґрунтах потребує додаткових заходів дренажу, зміцнення ґрунтів або використання спеціальних технологій фундаментів, що збільшує вартість і тривалість будівництва.

Тому для підтоплюваних ділянок особливо важливі гідрогеологічні дослідження та моделювання рівня ґрунтових вод, а також проектування ефективних дренажних систем і водозахисних заходів, що забезпечують надійність і довговічність споруд.

До сучасних, дещо негативних, інженерно-геологічних і гідрогеологічних факторів, явищ на ділянці вишукувань можна віднести неглибоке залягання ґрунтових вод, наявність лесоподібних та текучих ґрунтів, які мають невисоку міцність та підтоплюваність її.

Освоєння ділянки призведе до змін геологічних умов через зростання техногенного навантаження на природне середовище, ущільнення і переміщення ґрунту в активній зоні будівництва, динамічні навантаження при будівництві, зміну гідрогеологічних умов. Також можливе порушення ґрунтів при виконанні земляних робіт з улаштуванням котловану і довготривалому відкритому його перебуванні, можливе зниження якості ґрунтів із-за їх перезволоження або промерзання.

Під час забудови асфальтування площадки істотно зменшить природне випаровування через що виникне надлишок води і станеться підвищення рівня ґрунтових вод. Для запобігання таких негативних явищ потрібно облаштовувати водовідведення та гідроізоляцію фундаментів та підвалів [12-13].

Висновки. У статті наведено результати деталізованого інженерно-геологічного та гідрогеологічного дослідження ділянки, запроектованої під будівництво транспортно-логістичного центру, виконаного з використанням комплексу польових і лабораторних методів. Отримані дані дозволили сформулювати уточнену інженерно-геологічну модель території з урахуванням неоднорідності четвертинних відкладень.

У межах досліджуваної товщі до глибини 11,8 м виділено 11 інженерно-геологічних елементів, серед яких встановлено наявність насипних, лесоподібних та текучопластичних ґрунтів, що мають особливі інженерні властивості. Результати статичного зондування доповнили дані буріння та дозволили уточнити межі окремих слабких шарів.

Наукова новизна роботи полягає в уточненні інженерно-геологічної будови локальної ділянки Чернігівського району, обґрунтуванні ефективності поєднання буріння та статичного зондування для ідентифікації проблемних ґрунтів, а також у встановленні впливу підтоплення на деформаційні характеристики лесоподібних відкладів. Отримані експериментальні результати компресійних випробувань дозволяють уточнити розрахункові параметри ґрунтів у природному та водонасиченому станах.

Практичне значення дослідження полягає у можливості використання отриманих результатів при проектуванні фундаментів і інженерних захисних заходів на підтоплюваних ділянках із поширенням лесоподібних ґрунтів. За умови врахування особливостей інженерно-геологічної будови й гідрогеологічного режиму ділянка може бути використана для забудови за умови застосування відповідних конструктивних і водозахисних рішень.

За геоморфологічним районуванням досліджена ділянка знаходиться на Чернігівсько-Городнянській морено-зандровій рівнині. Згідно ДБН В.1.1-12-2014 [14] вона розташована в зоні 5-ти бальної сейсмічної активності.

Горизонт ґрунтових вод знаходиться на глибині 3,3...3,8 м. Він живиться переважно інфільтраційними водами, тому зміна рівня ґрунтових вод є сезонною. Ділянка підтоплювана. При проектуванні, враховуюче можливе сезонне підтоплення ділянки необхідно передбачати дренаж, регулювання поверхневого стоку, гідроізоляцію глибоких частин будівлі, облаштування таких водонесучих комунікацій через які не буде втрачатися вода.

Список використаних джерел

1. Борзяк, О. С., Лютий, В. А., Романенко, О. В. & Подтележнікова І. В. (2022). Інженерно-геологічні дослідження для будівництва.
2. УкрНДІПНТВ. (2008). Вишукування, проектування і територіальна діяльність. Вишукування. Інженерні вишукування для будівництва (ДБН А.2.1-1-2008). Мінрегіонбуд України.
3. Wichtmann T., Tafili M., Staubach P., Machacek J., Schmüdderich C., Lieske W. (2023). Perspectives, demands and challenges of future research in Soil Mechanics and Soil Dynamics. *Herausforderungen in der Geotechnik - 25 Jahre Institut für Geotechnik und Baubetrieb* Nr. 58. 2023 https://www.researchgate.net/publication/374087653_Perspectives_demands_and_challenges_of_future_research_in_Soil_Mechanics_and_Soil_Dynamics.
4. НІИОСП ім. Герсєванова. (2002). Ґрунти. Методи польових випробувань статичним і динамічним зондуванням (ДСТУ Б В.2-1-9-2002). Держбуд.
5. ПНІИИС. (2002). Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Відбирання, упакування, транспортування і зберігання зразків (ДСТУ Б В.2.1-8-2001) Держбуд.
6. УкрНДІПНТВ. (2009). Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей (ДСТУ Б В.2.1-17:2009). Мінрегіонбуд.
7. УкрНДІПНТВ. (2009). Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення вмісту органічних речовин (ДСТУ Б В.2.1-16:2009). Мінрегіонбуд.
8. УкрНДІПНТВ. (2009). Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення гранулометричного (зернового) та мікро агрегатного складу (ДСТУ Б В.2.1-19:2009). Мінрегіонбуд.
9. ВАТ Укрніпроектстальконструкція ім. В. М. Шимановського. (2006). Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування (ДБН В.1.2-2:2006). Мінбуд України.
10. НІИОСП. (1996). Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи статистичної обробки результатів випробувань (ДСТУ Б В.2.1-5-96). Держкоммістобудування.
11. НІИОСП. (1996). Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформованості (ДСТУ Б В.2.1-4-96). Держкоммістобудування.
12. Asphaug, S. K., Kvande, T., Time, B., Peuhkuri, R. H., Kalamees, T., Johansson, P., Berardi, U., Lohne, J. (2020) Moisture control strategies of habitable basements in cold climates. *Building & Environment*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106572>.
13. Monachese A. P., Gómez-Villarino M. T., López-Santiago J., Sanz E., Almeida-Ñauñay A. F., Zubelzu S. (2025) Challenges and Innovations in Urban Drainage Systems: Sustainable Drainage Systems Focus. *Water*, 17(1), 76. 2025. <https://doi.org/10.3390/w17010076>.
14. ДП НДІБК. (2014). Будівництво в сейсмічних районах України (ДБН В.1.1-12:2014). Мінрегіон України.

References

1. Borziak, O. S., Liutyi, V. A., Romanenko, O. V., & Podtelezhnikova, I. V. (2022). *Inzhenerno-geologichni doslidzhennia dlia budivnytstva [Engineering and geological investigations for construction]*.

2. UkrNDIINTV. (2008). Vyshukuvannia, proektuvannia i terytorialna diialnist. Vyshukuvannia. Inzhenerni vyshukuvannia dlia budivnytstva (DBN A.2.1-1-2008). [Surveying, design and territorial activity. Engineering surveys for construction (DBN A.2.1-1-2008).] *Minrehionbud Ukrainy - Ministry of Regional Development of Ukraine*.
3. Wichtmann T., Tafili M., Staubach P., Machacek J., Schmüdderich C., Lieske W. (2023) Perspectives, demands and challenges of future research in Soil Mechanics and Soil Dynamics. *Herausforderungen in der Geotechnik - 25 Jahre Institut für Geotechnik und Baubetrieb* Nr. 58. 2023. https://www.researchgate.net/publication/374087653_Perspectives_demands_and_challenges_of_future_research_in_Soil_Mechanics_and_Soil_Dynamics.
4. NYYOSP ym. Hersevanova. (2002). Grunty. Metody polovykh vyprobuvan statychnym i dynamychnym zonduvanniam (DSTU B V.2-1-9-2002). [NIOSP named after Gersevanov. (2002). Soils. Methods of field testing by static and dynamic sounding (DSTU B V.2-1-9-2002).] *Derzhbud - State Committee for Construction*.
5. PNYYS. (2002). Osnovy ta pidvalyny budynkiv i sporud. Grunty. Vidbyrannia, upakuvannia, transportuvannia i zberihannia zrazkiv (DSTU B V.2.1-8-2001) [PNIIS. (2002). Foundations and substructures of buildings and structures. Soils. Sampling, packing, transportation and storage of specimens (DSTU B V.2.1-8-2001).] *Derzhbud - State Committee for Construction*.
6. UkrNDIINTV. (2009). Foundations of buildings and structures. Soils. Laboratory methods for determining physical properties (DSTU B V.2.1-17:2009). Ministry of Regional Development.
7. UkrNDIINTV. (2009). Osnovy ta pidvalyny budynkiv i sporud. Grunty. Metody laboratornoho vyznachennia vmistu orhanichnykh rehovyn (DSTU B V.2.1-16:2009). [UkrNDIINTV. (2009). Foundations of buildings and structures. Soils. Laboratory methods for determining organic matter content (DSTU B V.2.1-16:2009).] *Minrehionbud - Ministry of Regional Development*.
8. UkrNDIINTV. (2009). Osnovy ta pidvalyny budynkiv i sporud. Hrunt. Metody laboratornoho vyznachennia hranulometrychnoho (zernovoho) ta mikro ahrehatnoho skladu (DSTU B V.2.1-19:2009). [UkrNDIINTV. (2009). Foundations of buildings and structures. Soils. Laboratory methods for determining grain-size and microaggregate composition (DSTU B V.2.1-19:2009).] *Minrehionbud - Ministry of Regional Development*.
9. VAT Ukrndiproektstalkonstrukttsiia im. V. M. Shymanovskoho. (2006). Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob'ektiv. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia (DBN V.1.2-2:2006). [UkrNDIproektstalkonstrukttsiia named after V. M. Shymanovskiy. (2006). Reliability and safety assurance system for construction objects. Loads and impacts. Design standards (DBN V.1.2-2:2006).] *Minbud Ukrainy - Ministry of Construction of Ukraine*.
10. NYYOSP. (1996). Osnovy ta pidvalyny budynkiv i sporud. Grunty. Metody statystychnoi obrobky rezultativ vyprobuvan (DSTU B V.2.1-5-96). [NIOSP. (1996). Foundations and substructures of buildings and structures. Soils. Methods for statistical processing of test results (DSTU B V.2.1-5-96).] *Derzhkommistobuduvannia - State Committee for Urban Development*.
11. NYYOSP. (1996). Osnovy ta pidvalyny budynkiv i sporud. Grunty. Metody laboratornoho vyznachennia kharakterystyk mitsnosti i deformovanosti (DSTU B V.2.1-4-96). [NIOSP. (1996). Foundations and substructures of buildings and structures. Soils. Laboratory methods for determining strength and deformability characteristics (DSTU B V.2.1-4-96).] *Derzhkommistobuduvannia - State Committee for Urban Development*.
12. Asphaug, S.K., Kvande, T., Time, B., Peuhkuri, R.H., Kalamees, T., Johansson, P., Berardi, U., Lohne, J. (2020) Moisture control strategies of habitable basements in cold climates. *Building & Environment*, Vol. 169. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106572>.
13. Monachese A.P., Gómez-Villarino M.T., López-Santiago J., Sanz E., Almeida-Ñauñay A.F., Zubelzu S. (2025) Challenges and Innovations in Urban Drainage Systems: Sustainable Drainage Systems Focus. *Water*, 17(1), 76. 2025. <https://doi.org/10.3390/w17010076>.
14. DP NDIBK. (2014). Budivnytstvo v seismichnykh raionakh Ukrainy (DBN V.1.1-12:2014) [DP NDIBK. (2014). Construction in seismic regions of Ukraine (DBN V.1.1-12:2014).] *Ministerium für Regionalentwicklung der Ukraine - Ministry of Regional Development of Ukraine*.

Дата першого надходження статті до видання: 25.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.12.2025

Volodymyr Ivanyshyn¹, Mykola Korzachenko², Yehor Chornyi³

¹Doctor of Geological Sciences, Professor, Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management, Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: gkz.kaf@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2394-1837>

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding and Construction Technologies, Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: korzachenko_87@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5674-8662>. ResearcherID: F-5177-2016

SCOPUS Author ID: 57330883100

³Acting Director of the State Enterprise "VODZEMPROEKT" of PJSC "CHERNIHIVVODZEMPROEKT"

He was killed on February 20, 2023, while performing a combat mission.

RESULTS OF ENGINEERING-GEOLOGICAL INVESTIGATIONS FOR THE CONSTRUCTION OF A TRANSPORT AND LOGISTICS CENTER ON KIL'TSEVA STREET IN CHERNIHIV

The article presents the results of comprehensive engineering-geological investigations carried out within the studied site using field, laboratory, and analytical methods. Based on drilling operations, sampling of undisturbed soil specimens, laboratory determination of physical and mechanical properties, and static cone penetration testing, the geological structure of the soil mass down to a depth of 11.8 m has been established. The spatial heterogeneity of the Quaternary deposits forming the engineering-geological profile of the area has also been characterized.

Several genetic types of soils were identified within the site, reflecting the complex history of natural and technogenic processes. These include modern technogenic, eluvial, aeolian-deluvial, lacustrine-glacial, and glacial deposits of Upper and Middle Quaternary age. Their coexistence within a single geological profile indicates a long and multi-stage evolution of the relief and geological environment, which significantly affects the engineering behavior of the soils under load.

Based on grain-size composition, natural moisture content, Atterberg limits, consistency indices, and cone penetration resistance, 11 engineering-geological elements (EGEs) were identified. Each element is characterized by its own physical and mechanical parameters, degree of heterogeneity, and formation conditions. The substantial vertical and lateral variability of the EGEs creates complex conditions for foundation design and for predicting the deformation behavior of the soil base.

Special attention was given to soils with specific or unfavorable engineering properties detected within the section. Laboratory data show that these soils are sensitive to moisture variations, stress-strain changes, and seasonal groundwater fluctuations. Certain layers exhibit increased natural moisture content and elevated compressibility, making them prone to reduced bearing capacity, differential settlements, and deformation processes under external loading.

Hydrogeological investigations determined the groundwater level at a depth of 3.3-3.8 m at the time of research. According to classification criteria, the territory is considered prone to periodic flooding. The combination of shallow groundwater and heterogeneous soil conditions significantly complicates engineering design and requires careful consideration of potential seasonal fluctuations in the groundwater regime.

The study provides a forecast of potential changes in engineering-geological conditions due to future land development. It is shown that an increase in technogenic loading-through construction activities, changes in relief, soil compaction, or alteration of drainage conditions-will inevitably lead to additional stress redistribution within the soil mass, modification of the groundwater regime, and changes in soil properties. These factors may trigger differential settlements, localized decreases in bearing capacity, and activation of adverse geological processes such as suffosion, filtration deformation, and intensification of flooding.

Given the identified features of the geological structure and hydrogeological conditions, a set of engineering measures is recommended to ensure safe and efficient land use. These include the installation of surface and subsurface drainage systems, the application of reinforced or deep foundations in weak or water-saturated soils, the use of pile or combined foundation systems in zones of increased heterogeneity, and the implementation of monitoring programs for groundwater levels and soil behavior during construction.

The results of the research provide a reliable basis for engineering design, risk assessment, and urban development planning in areas with complex geological conditions. The presented engineering-geological analysis enables a comprehensive understanding of the soil environment, prediction of its behavior under technogenic influence, and formulation of scientifically grounded recommendations for further development of the site.

Keywords: deposits; soils; horizon; engineering-geological elements; borehole; static cone penetration test.

Fig.: 4. References 12.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-485-500](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-485-500)

УДК 691.55:519.233

Андрій Валерійович Колесников¹, Дмитро Валерійович Левицький²¹доктор технічних наук, доцент кафедри хімії та екології

Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)

E-mail: kolesnikov_himek@odaba.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8737-0933>

ResearcherID: IRZ-3809-2023

²аспірант кафедри хімії та екології

Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)

E-mail: 924ldv@odaba.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5350-522X>

ДОСЛІДЖЕННЯ І ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДІВ РЕСТАВРАЦІЙНИХ КОМПОЗИТІВ ДЛЯ БУДІВЕЛЬ ІЗ ВАПНЯКУ-ЧЕРЕПАШНИКУ

У статті наведено результати комплексного дослідження та оптимізації складів штукатурно-реставраційних композитів, призначених для ремонту та збереження будівель і споруд з вапняку-черепашнику. Досліджено композиційні матеріали на основі повітряного вапна з додаванням портландцементу, глини та комбінованого наповнювача з кварцового піску й подрібненого черепашнику. Отримано експериментально-статистичні моделі адгезійної міцності до пористої та гладкої основи, паропроникності, водопоглинання та міцності на стиск. Показано, що структурна сумісність реставраційного матеріалу та основи досягається лише за збалансованого співвідношення ущільнення мінеральної матриці та розвитку відкритої порової мережі. На основі методу функції бажаності виконано багатокритеріальну оптимізацію рецептури композиту для різних умов експлуатації, що дозволило визначити компромісні склади, які придатні для реставрації історичних будівель з черепашнику.

Ключові слова: вапняк-черепашник; реставраційні композити; адгезія; паропроникність; водонасичення; експериментально-статистичне моделювання; багатокритеріальна оптимізація.

Рис.: 7. Табл.: 7. Бібл.: 17.

Актуальність теми дослідження. Історичні будівлі, зведені з вапняку-черепашнику, складають значну частину архітектурної спадщини півдня України, насамперед Одеси, де цей природний камінь використовувався при будівництві житлових будинків, громадських споруд, особняків і пам'яток архітектури XIX – початку XX століття. Вапняк-черепашник являє собою осадову карбонатну породу, що відрізняється малою щільністю, складною багатомасштабною пористою структурою – від макропор розміром близько міліметрів до мікрокапілярів і нанопор, де розвиваються тонкі механізми накопичення вологи та перенесення розчинених солей, і як наслідок, високим водопоглинанням і здатністю до природної регуляції вологообміну. Такі властивості визначають його довговічність в умовах сухого та помірно вологого клімату, але водночас роблять цей природний камінь чутливим до циклів зволоження та висихання, біокорозії і локальних змін мікроклімату. З часом історичні будівлі з черепашнику потребують реставрації, відновлення та збереження, при цьому одним з основних етапів є вибір реставраційних композиційних матеріалів з урахуванням не тільки механічних вимог, але і сумісності з природною капілярною системою каменю основи. Таким чином, дослідження та підбір оптимального складу будівельних розчинів для реставрації будівель та споруд з вапняку-черепашнику для забезпечення структурної сумісності, рівноважного вологообміну й адекватних механічних характеристик при мінімальному ризику деградації контактної зони є актуальним завданням.

Постановка проблеми. Сучасна реставраційна практика показує, що універсальні цементні або полімерні склади часто виявляються несумісними з пористими карбонатними породами: підвищена щільність, низьке водопоглинання, низька паропроникність і високий модуль пружності призводять до формування градієнтів вологості, концентрації напружень у зоні контакту і подальшого відшарування або руйнування прилеглого шару каменю. Тому дедалі більшого поширення набуває використання вапняних і змішаних вапняно-мінеральних композитів, які традиційно застосовувалися для захисту та оздоблення будівель з черепашнику. Такі матеріали мають характеристики, близькі до природ-

ного пористого каменю: високу паропроникність, помірну міцність, а також пластичність, що дозволяє формувати стійку контактну зону без надмірних напружень. На наш погляд, використання композитів на основі вапна (з додаванням до в'язучого компоненту цементу і глини) та комплексного наповнювача (суміші кварцового піску та меленого черепашнику) як штукатурних розчинів є доцільним для забезпечення високого рівня сумісності з каменем-основою.

Формування структури вапняно-цементно-глинистих композитів і багатофазної системи «реставраційний композит – межа розділу – вапняк-черепашник» є складним фізико-хімічним процесом, що включає гідратацію цементних фаз, карбонізацію вапна, поведінку глинистої складової, перерозподіл вологи та поступове ущільнення порового простору. Структура, що формується на ранніх стадіях, визначає мікромеханічні параметри матеріалів у системі «камінь – розчин», включаючи адгезію, здатність контактного шару проникати в пори основи, стійкість до вологообміну та довговічність. Тому підбір складу реставраційних композитів треба проводити відповідно до зазначених умов структуроутворення із застосуванням комплексного експериментального та аналітичного підходу, який включає аналіз структури вихідного каменю, дослідження параметрів водопоглинання та паропроникності, визначення адгезійної міцності й побудову регресійних моделей для їх подальшої оптимізації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасні дослідження в області реставрації будівель, особливо об'єктів культурної спадщини, з пористих карбонатних порід підкреслюють необхідність суворої матеріалосумісності між вихідним каменем і ремонтним складом [1]. Під матеріалосумісністю розуміють узгодження фізичних, гігроскопічних, механічних і структурних характеристик матеріалів, включаючи розподіл пор, водопоглинання, капілярний перенос, паропроникність і деформаційні властивості. Аналіз публікацій показує, що саме неузгодженість за цими ознаками стає причиною накопичення вологи, утворення зон кристалізації солей, виникнення локальних напружень і подальшого руйнування реставраційного шару або контактної зони [1–3].

Реставраційні розчини на основі вапна при виконанні робіт з відновлення будівель та споруд з вапняку-черепашнику мають високий ступінь сумісності та необхідні експлуатаційні властивості [2]. В оглядових дослідженнях RILEM зазначається, що вапняні композити мають унікальну здатність до «дихання» та природної регуляції вологи, і тому історично були основними ремонтними розчинами для пористих карбонатних каменів [3]. Найважливіша особливість таких систем – багатостадійний процес структуроутворення, що включає гідратацію мінеральних фаз, карбонізацію, сорбційні процеси та поступове ущільнення порового простору. Однак чисте повітряне вапно характеризується обмеженою ранньою міцністю, що стимулює застосування комбінованих вапняно-пуццеланових систем [4; 5].

Досвід застосування різних видів в'язучих та домішок показує, що якісний та кількісний склад реставраційного матеріалу істотно впливає на капілярну структуру, міцність і довговічність як вихідного композиту, так і системи «розчин – основа» загалом [2; 1; 6]. Використання різноманітних домішок, наприклад, тонкої пемзи, вулканічної золи, метакаоліну, здатне покращувати структуру композиційної матриці та контролювати динаміку карбонізації, водночас забезпечуючи збереження високої паропроникності, щоб не порушити природний вологообмін каменю [4–7].

Експериментальні дослідження з водопоглинання та висихання показують, що структура пор розчину принципово визначає напрямок і швидкість вологообміну [9; 10].

Критично важливим параметром сумісності є поведінка системи в умовах змінного зволоження. Роботи з вимірювання капілярного водопоглинання у відомих розрізах природних каменів виявляють значну варіативність у швидкості насичення, що вимагає адаптації рецептури розчину під конкретний камінь [11].

Не менш важливим аспектом є поведінка матеріалу в контактних зонах, наприклад для мурувальних швів. Дослідження таких контактних зон підтверджують, що правильний підбір складу вапняного шва впливає на швидкість висихання всієї кладки, запобігає накопиченню вологи та знижує деградаційні процеси [10]. Аналогічні результати отримані в роботах, присвячених аналізу властивостей різних вапняних розчинів, де підкреслюється необхідність тонкого підбору рецептури для досягнення довготривалої стійкості [8; 13].

Аналіз сучасних публікацій також показує зростання інтересу до використання глинистих і керамічних домішок у вапняно-цементних і вапняних системах. Вони позитивно впливають на розподіл вологи, формування мікроструктури й довговічність, що особливо важливо при реставрації сильно пористих порід [12]. При цьому вплив таких домішок на паропроникність і капілярний перенос повинен ретельно контролюватися, щоб уникнути блокування вологи в пористій основі [4–7].

Важливу роль у виборі складу відіграють також методи математичного моделювання властивостей. Їх застосування дозволяє системно враховувати нелінійні ефекти компонентів складу та підбирати багатокритеріальні оптимальні рецептури за міцністю, паропроникністю, капілярною активністю і довговічністю [13; 14; 15].

Таким чином, успішне застосування реставраційних композитів для пористих карбонатних порід вимагає комплексного врахування механізмів вологообміну, порової архітектури, динаміки карбонізації та адгезії. Найбільш перспективними є вапняні та вапняно-пуцоланові розчини з легким наповнювачем або домішками, які забезпечують структурну сумісність з каменем і високу паропроникність.

Метою дослідження є розробка науково обґрунтованого оптимального складу реставраційного композиту для ремонту та відновлення будівель та споруд з вапняку-черепашнику. Для досягнення цієї мети були проведені: попередні дослідження співвідношень «склад – структура – властивості» штукатурно-реставраційних композитів на основі вапна, цементу, глини та комбінованого наповнювача; планування експерименту та його реалізація (отримання результатів вимірювання експлуатаційних властивостей складів, таких як адгезійна міцність, паропроникність, міцність на стиск, водопоглинання); побудова математичних моделей типу «склад – властивість» та аналіз впливу компонентів на експлуатаційні параметри композиту; проведення оптимізації складів з використанням методів експериментально-статистичного моделювання.

Як **об'єкт дослідження** використано зразки природного вапняку-черепашнику з типовою пористою структурою, а також реставраційний композиційний матеріал, що містить повітряне вапно, портландцемент, глинисту домішку (каолінова глина), кварцовий пісок і подрібнений черепашник як структурно сумісний наповнювач. Такий вибір компонентів дозволяє моделювати властивості композитів, близьких за капілярною активністю, паропроникністю і гігроскопічністю до вихідного каменю.

15-точковий центральнокпозиційний план експерименту скороченого типу розроблений із застосуванням методів планування експерименту другого порядку, що дозволяють описати нелінійні зв'язки між варіювальними компонентами. Як фактор обрано масові частки основних складових реставраційного композиту, які наведені в табл. 1.

Для різних складів згідно з планом експерименту визначалися адгезія до черепашнику як основного пористого субстрату, адгезія до гладкої кераміки для контролю змін зчеплення за умови домінування фізико-хімічних механізмів, водопоглинання в капілярному режимі, паропроникність композиту, основи і двошарової системи «черепашник – реставраційний склад», міцність на стиск.

Таблиця 1 – Фактори планованого експерименту та рівні їхнього варіювання

№	Фактори	Значення, %		Кодовані значення	
		Min	Max	Min	Max
1	2	3	4	5	6
X ₁	Частина цементу в загальній суміші в'язучих	5 %	15 %	-1	1
X ₂	Частина глини в загальній суміші в'язучих	5 %	10 %	-1	1
X ₃	Вміст черепашнику в комбінованому наповнювачі	0 %	75 %	-1	1

Джерело: розроблено авторами.

Вибір методів дослідження обумовлений необхідністю комплексного порівняння гігроскопічних властивостей матеріалів, перевірки структурної сумісності як за ключовими показниками вологообміну, так і структурно-механічними показниками.

Обробка даних виконувалася методами математичної статистики, прийнятими в задачах оптимізації складів будівельних матеріалів [14–16]. На основі отриманих регресійних експериментально-статистичних моделей формувалися поверхні та ізоповерхні відгуку для кожної властивості, що дозволило виділити області оптимальних поєднань факторів та оцінити вплив компонентів на ключові експлуатаційні параметри.

Виклад основного матеріалу. Результати досліджень являють собою комплекс модельних уявлень про структуру складної системи «черепашникова основа – межа розділу – реставраційно-штукатурний склад» і її трансформацію протягом всього життєвого циклу від формування через взаємоадаптацію в експлуатаційний період до руйнування.

Структура і властивості межі розділу «черепашник – реставраційний склад» у системах ремонту історичних кладок мають ключовий, найважливіший характер: саме у вузькій зоні контакту реалізується перехід від відкритої пористості природного карбонату до структури штучного композиту, і від характеру цього переходу істотно залежить довговічність ремонту. Для черепашнику, що має виражену багатомасштабну пористість (макропори порядку 0,1...1 мм, мезо- і мікрокапіляри порядку 1...1000 нм), межа повинна бути організована таким чином, щоб не створювати різкої відмінності за пористою архітектурою та проникністю пари й вологи. Ідеальна контактна зона частково «проростає» одна в одну: частинки наповнювача реставраційного складу (зокрема, подрібнений черепашник) проникають в поверхневі пори каменю, а дрібнодисперсна фракція матриці (цементно-вапняна і глиниста фази) заповнює капіляри, утворюючи градієнт пористості, який не створює різких бар'єрів вологообміну. У практичному сенсі це означає, що реставраційний склад повинен поєднувати три групи властивостей: здатність до механічного зчеплення з пористою основою (зернистість і шорсткість заповнювача), достатню рухливість і змочування (реологічні властивості, що забезпечуються домішкою глини), і збереження дифузної паропро проникності (за рахунок використання вапна та подрібненого черепашнику).

У нашій роботі вибір компонентів ґрунтувався на наступних структурних принципах:

- вапно забезпечує високу паропро проникність і тривалу карбонізаційну міцність, «дишаючі» властивості, а також є історично традиційним матеріалом для оздоблення будівель з вапняку-черепашнику;
- цемент (у помірних частках 5...15 %) є доцільним для забезпечення базової зв'язності та ранньої міцності, необхідної на практиці, але його вміст не повинен бути настільки високим, щоб перетворити контакт на жорстку «плашку», яка блокує пористу мережу;
- глина (5...10 %) виконує роль реологічного і капілярного регулятора: вона підвищує водоутримання, покращує пенетрацію матриці в мікропори;
- подрібнений черепашник у складі комбінованого наповнювача, що забезпечує мінералогічну та механічну сумісність, грубе механічне зчеплення та зменшення контрасту за модулем пружності і пористістю між шаром і основою.

На наш погляд, розчин вищезазначеного складу формує градієнт від частково грубої, механічно міцної «каркасоутворюючої» зони до більш пористої і паропроникної матриці, що необхідно забезпечити для довговічності реставрації.

Враховуючи вищенаведені теоретичні прогнози впливу окремих факторів, був здійснений перехід від концептуальних до експериментально-статистичних моделей властивостей за факторами (X_1 , X_2 , X_3).

Адгезія до черепашника – параметр, який визначає безпосередній механічний і довготривалий зв'язок реставраційного шару з пористою основою. З теоретичного погляду адгезія складається з механічного компонента (проникнення частинок у поверхневі пори, механічне заклинювання), капілярно-реологічного компонента (здатність матриці проникати і затікати в пори при нанесенні) і фізико-хімічного компонента (змочування, утворення гідратних і карбонатних фаз, іонні взаємодії).

Модель адгезії до черепашнику та її графічне відображення представлено на рис. 1.

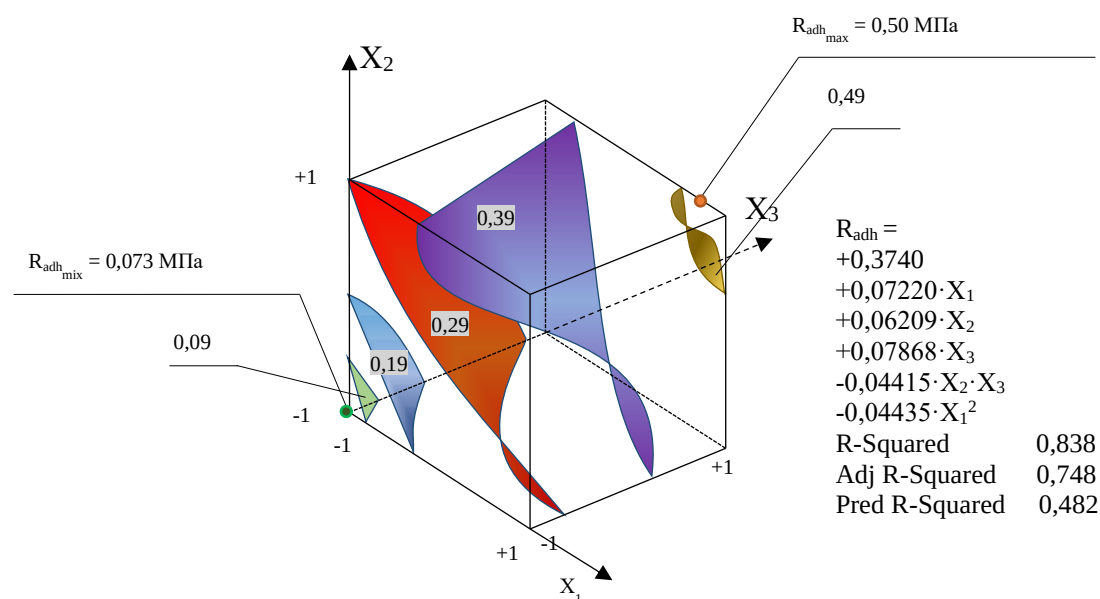


Рис. 1. Модель адгезії до черепашнику та її графічне відображення
Джерело: розроблено авторами.

Аналіз моделі адгезії реставраційного композиту до пористого черепашника показує, що ефективне зчеплення формується внаслідок поєднання механізмів структурної адаптації та фізико-хімічної взаємодії в контактній зоні. Підвищення адгезійної міцності пов'язане з розвитком проникнення матеріалу у відкриту порову систему основи та збільшенням площі реального контакту, що досягається за рахунок пористого карбонатного заповнювача й достатньої пластичності матриці. Водночас встановлено, що надмірне ущільнення структури або зростання жорсткості мінеральної фази знижує здатність композиції адаптуватися до мікрорельєфу черепашника, що проявляється у зменшенні адгезії. Таким чином, адгезія до пористої основи має виражений оптимальний характер і визначається балансом між проникністю, реологічною рухливістю та структурною жорсткістю контактної зони.

Модель для адгезії до плитки та її графічне відображення представлено на рис. 2.

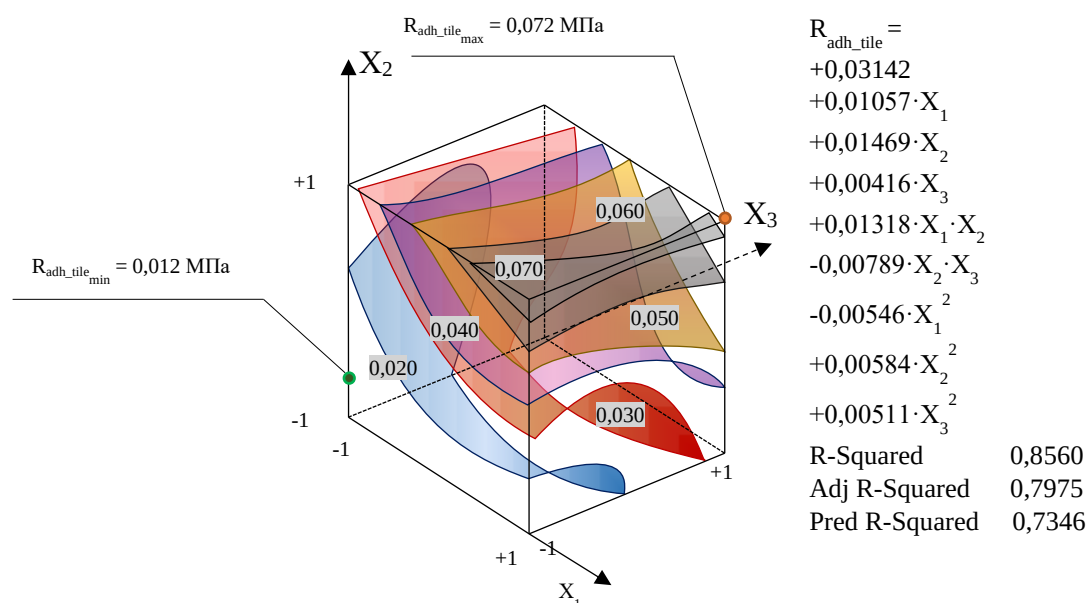


Рис.2. Модель адгезії до плитки та її графічне відображення

Джерело: розроблено авторами.

Модель адгезії до гладкої керамічної плитки демонструє принципово інший характер формування зчеплення, що підтверджує домінування фізико-хімічних механізмів взаємодії за відсутності механічного зачеплення. Зміни адгезійної міцності в цьому випадку пов'язані насамперед із хімічною активністю матриці, здатністю до змочування та формування стабільного міжфазного шару. Виявлена нелінійність свідчить про існування оптимального стану поверхневої активності та структурної щільності, за межами якого як надмірна пористість, так і надмірне ущільнення негативно впливають на адгезію. Порівняння двох моделей дозволяє розглядати адгезію до плитки як індикатор фізико-хімічної складової адгезії, а додатковий приріст адгезії до черепашника – як результат структурної адаптації до пористої основи.

Паропроникність – ключова характеристика, що визначає здатність шару «дихати». Теорія переносу вологи показує, що паропроникність залежить головним чином від обсягу відкритої пористості та зв'язності капілярної мережі. В наших дослідженнях визначення паропроникності проводилось на зразках, де на матеріал основу (зразки черепашника) наносили тонкий шар (5 мм) реставраційного розчину. Дослідження паропроникності саме такої системи дозволяє на наш погляд моделювати умови переносу пару на реальних об'єктах реставрації.

Модель паропроникності (рис. 3) показує, що дифузійні властивості композиту визначаються балансом між ущільненням матриці та розвитком відкритої порової мережі.

Підвищення паропроникності пов'язане з формуванням зв'язної системи відкритих капілярів, що забезпечується пористими карбонатними компонентами й обмеженою щільністю матриці. Водночас надмірне ущільнення структури, зокрема за рахунок зростання частки жорстких в'язучих, призводить до блокування дифузійних шляхів і зниження паропроникності. Таким чином, паропроникність проявляє оптимальний характер і виступає структурним обмеженням, що визначає верхню межу допустимого ущільнення композиту.

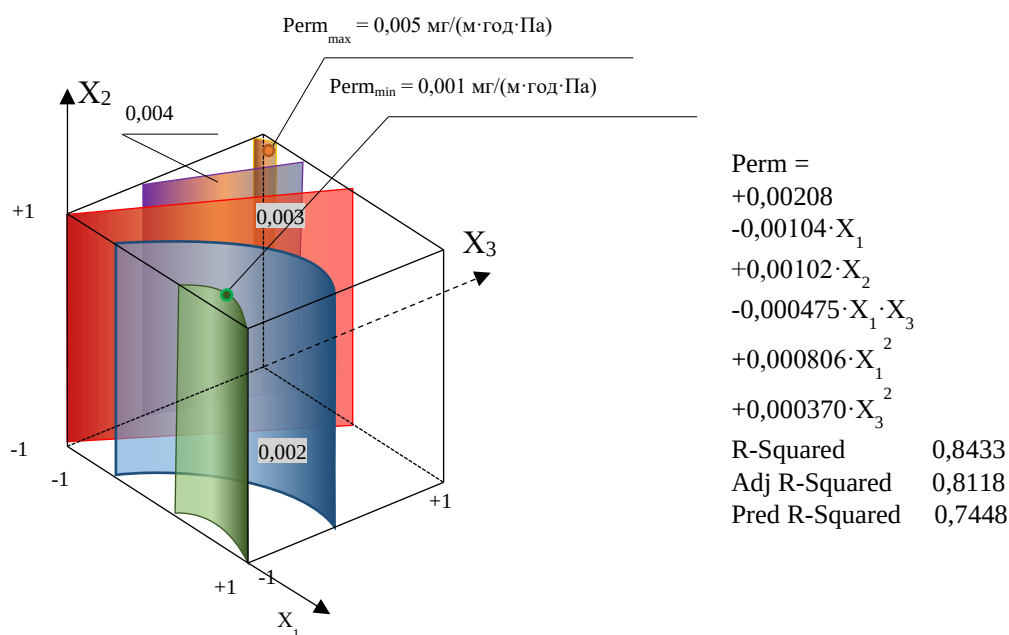


Рис. 3. Модель паропро проникності та її графічне відображення

Джерело: розроблено авторами.

Рівень водонасичення визначає схильність системи до накопичення вологи та солей. Рівень водонасиченості досліджуваних зразків системи «композит – основа» визначали, моделюючи капілярне водопоглинання. Капілярне водопоглинання штукатурних розчинів – це процес всмоктування та переміщення води в пористій структурі затверділого розчину за рахунок капілярних сил, які виникають у порах малого діаметра. Цей показник характеризує здатність реставраційного штукатурного матеріалу втягувати вологу з навколишнього середовища (дощ, конденсат, ґрунтову або експлуатаційну вологу) та транспортувати її вглиб структури.

Модель водонасичення та її графічне відображення представлено на рис. 4.

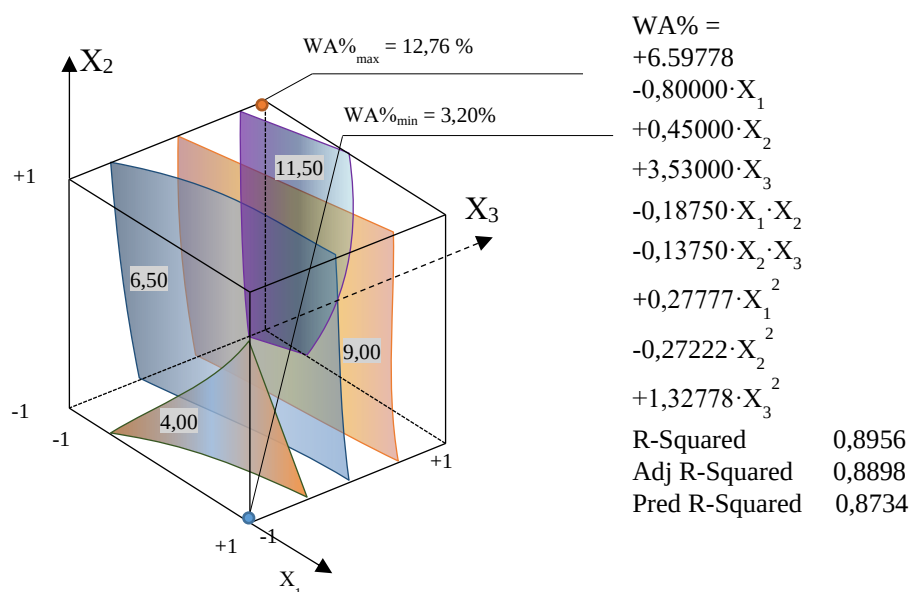


Рис. 4. Модель водонасичення та її графічне відображення

Джерело: розроблено авторами.

Модель водонасичення демонструє високу чутливість системи до розвитку капілярної пористості та наявності гідрофільних фаз. Зростання водопоглинання корелює з підвищенням частки відкритої порової структури та компонентів, здатних активно утримувати воду, що є типовим для систем з розвинуеною багатомасштабною пористістю. Водночас встановлено, що певне ущільнення матриці дозволяє обмежити надмірне капілярне водопоглинання без повної втрати дифузійної здатності. Отже, водонасичення є показником структурної “ціни” за підвищену паропроникність та адгезійну адаптивність матеріалу.

Міцність на стиск – важливий експлуатаційний показник, що визначає граничні навантаження та стійкість до механічних впливів.

Модель міцності на стиск та її графічне відображення представлено на рис. 5.

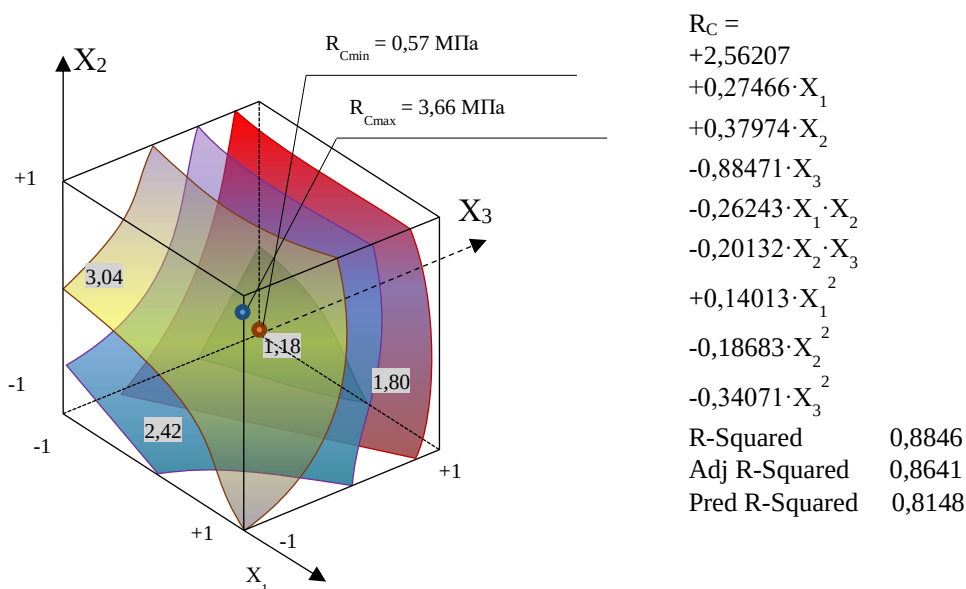


Рис. 5. Модель міцності на стиск та її графічне відображення

Джерело: розроблено авторами.

Модель міцності на стиск свідчить, що механічна працездатність композиту визначається ступенем формування зв'язної мінеральної матриці та ефективністю передачі навантажень між фазами. Підвищення міцності пов'язане з ущільненням структури та зростанням частки жорстких компонентів, однак встановлено, що надмірна жорсткість супроводжується зростанням структурної крихкості та втратою адаптивності до деформацій основи. Наявність нелінійних ефектів і антагонізму між окремими складовими свідчить про те, що максимальна міцність не є цільовою характеристикою для реставраційних матеріалів, сумісних з пористими карбонатними породами.

Порівняльний аналіз усіх моделей показує, що між адгезійними, дифузійними, гідрологічними та механічними властивостями існує певна неузгодженість. Компоненти та структурні рішення, що сприяють підвищенню адгезії і паропроникності, одночасно підвищують водонасичення і знижують міцність на стиск, тоді як засоби підвищення міцності обмежують дифузійні властивості та адаптивність контактної зони. Тому властивості композитів оптимальних складів не відповідають екстремальним значенням окремих показників, а формуються в області компромісу між взаємно конкуруючими вимогами. Побудовані регресійні моделі дозволяють кількісно описати цей компроміс і розглянути реставраційний композит як адаптивну матеріальну систему, властивості якої мають бути узгоджені насамперед зі структурними характеристиками основи.

Оптимізація рецептури реставраційних композитів для пористого черепашнику вимагає об'єднання якісних і кількісних підходів, що дозволяють як візуально виявити допустимі діапазони факторів, так і формально визначити компромісні рішення щодо кількох цільових властивостей. Первинним етапом служить побудова оверлейних карт, створених накладанням кількох областей прийнятності у факторному просторі. Для кожного відгуку моделі визначають область, в якій значення є допустимими відповідно до встановлених вимог, наприклад, мінімального рівня адгезії, обмеження водонасичення або нижньої межі паропроникності. Кожна така область фактично є бінарною маскою, що містить точки, що задовольняють критерію, і точки, що не задовольняють йому. Оверлейна карта дозволяє швидко виявити, чи існує взагалі область факторних комбінацій, в якій матеріалосумісність досягається одночасно за декількома ключовими властивостями, і якщо так – визначити геометрію цієї області та її положення щодо досліджених рівнів факторів.

В роботі оверлейні карти будували, наприклад, у площині факторів X_1 та X_3 при фіксованому значенні X_2 , що дозволило наочно відобразити вплив частки цементу та частки подрібненого черепашника при різних рівнях вмісту глини. Надалі саме ця область є стартовою зоною для чисельної оптимізації, задає доцільні межі й дозволяє виключити області, які не задовольняють вимогам щодо водонасичення, адгезії або паропроникності.

Цільові значення властивостей, що були використані в оптимізації наведені в табл. 2.

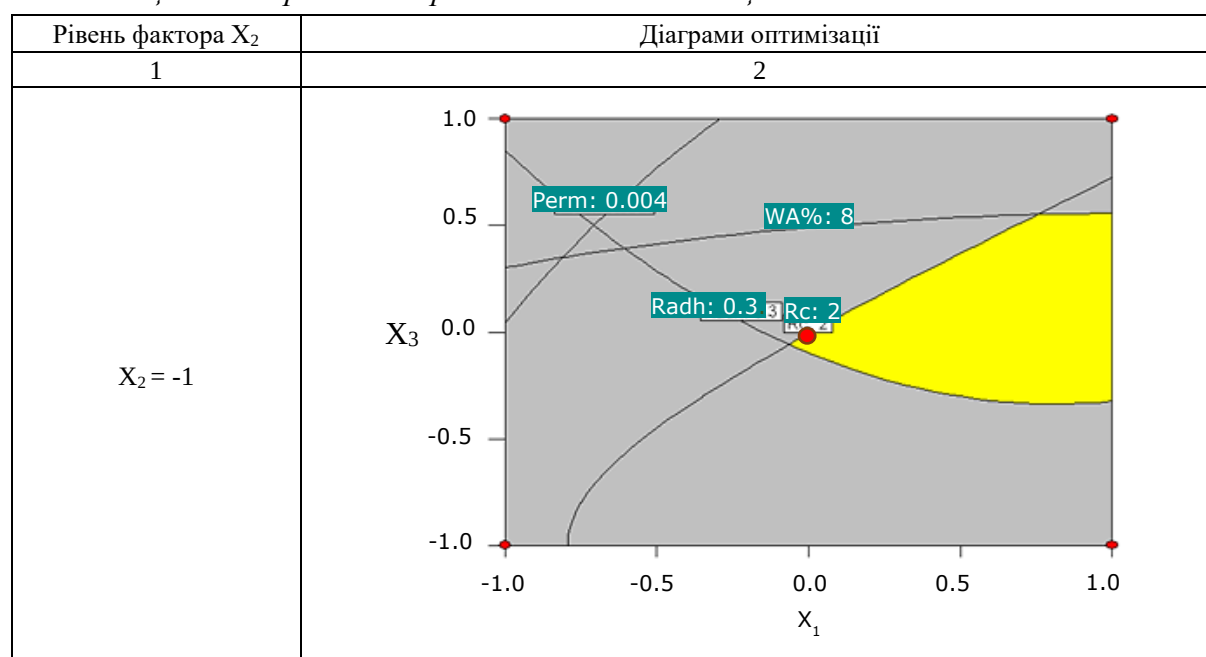
Таблиця 2 – Інтервали допустимості експлуатаційних характеристик складів

Властивість	Скорочення	Одиниці вимірювання	Мінімальний рівень	Максимальний рівень
1	2	3	4	5
Адгезійна міцність	Radh	МПа	0,3	0,5
Паропроникність	Perm	мг/(м·год·Па)	0,001	0,004
Міцність при стисненні	Rc	МПа	2	3,5
Рівень водонасичення	WA%	%	2	8

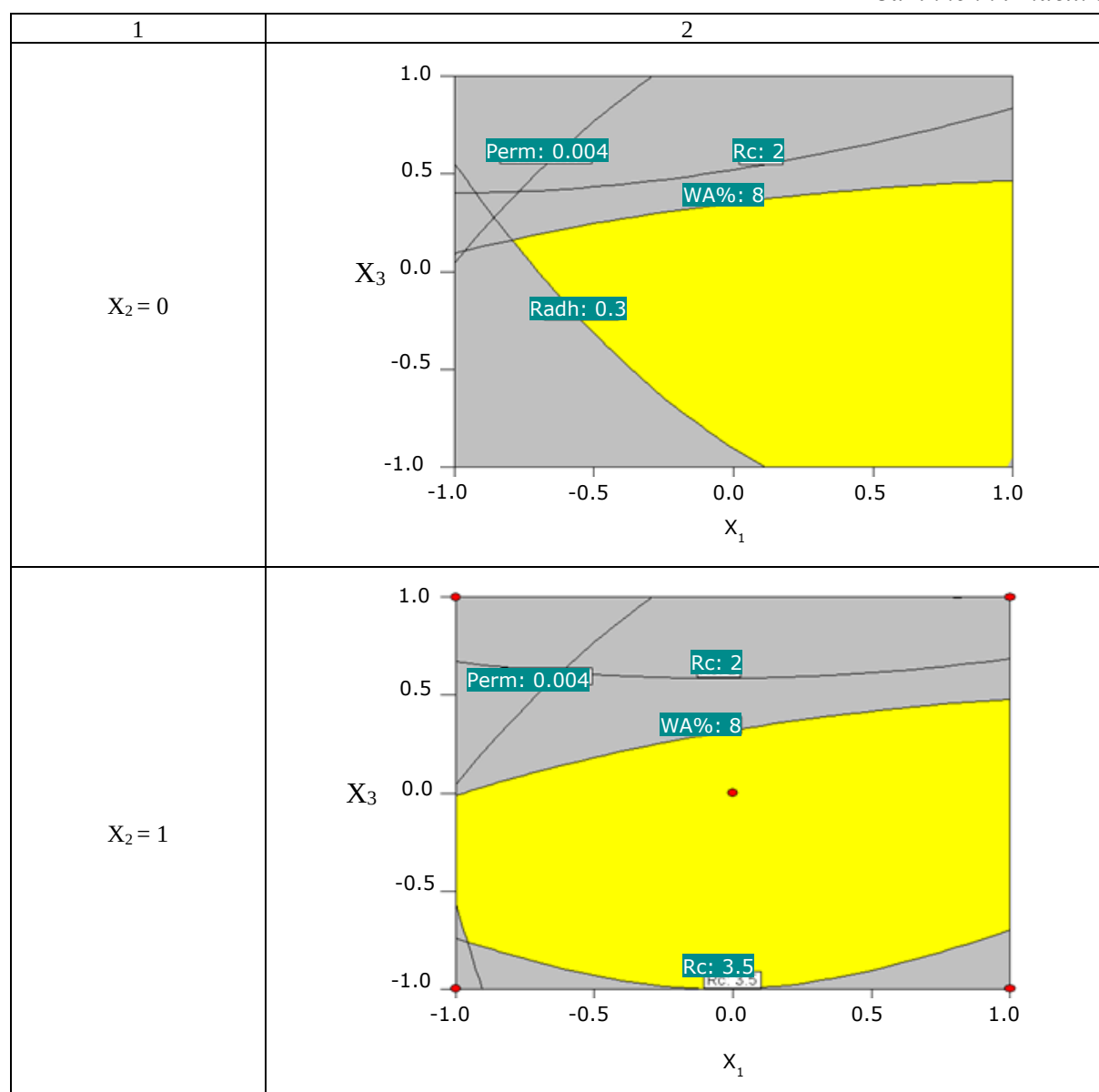
Джерело: розроблено авторами

При якісній оптимізації отримано оверлейні діаграми, які систематизовані в табл. 3.

Таблиця 3 – Оверлейні діаграми якісної оптимізації



Закінчення табл. 3



Джерело: розроблено авторами.

З оверлейних діаграм видно, що у всьому діапазоні змін чинника X_2 , тобто. за будь-якого вмісту глини, присутня криволінійна область складної форми. При $X_2 = -1$ кривими, що обмежують, є мінімуми R_{adh} і R_c і максимум $WA\%$, при $X_2 = 0$ такими кривими є максимум $WA\%$, і мінімуми R_{adh} , а при $X_2 = -1$ обмеженнями є максимум $WA\%$ і максимум R_c .

Після виділення областей допустимих складів було здійснено перехід до кількісної, багатокритеріальної оптимізації методом функції бажаності, заснованої на перетворенні кожного відгуку Y_i в часткову безрозмірну бажаність. У класичному формулюванні, що застосовується у програмному пакеті Design-Expert [17], бажаність кожної властивості визначається залежно від мети: максимізації, мінімізації, досягнення цільового значення або потрапляння в заданий інтервал. Так, з метою «максимізувати» використовується функція, що має вигляд (1):

$$d(y) = \begin{cases} 0, & y \leq L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^s, & L < y < T \\ 1, & y \geq T \end{cases} \quad (1)$$

де L – нижня межа;

T – бажане цільове значення, а параметр $s > 0$ відіграє роль ваги, що задає кривизну функції: при $s > 1$ функція стає більш "суворою", різкіше штрафує відхилення від мети; при $s < 1$ – більш "м'який".

Після визначення часткової бажаності виконується їхня агрегація в загальну бажаність (D), яка є критерієм оптимальності. У класичному вигляді загальна бажаність є зваженим геометричним середнім (2):

$$D = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{w_i}\right)^{\frac{1}{\sum w_i}}, \quad (2)$$

де w_i – коефіцієнти, пропорційні важливості i -го відгуку, що визначається користувачем. Важливість (importance) являє собою параметр від 1 до 5, що відображає відносний внесок відгуку в загальну оптимізацію. Відгуки, що є критично важливими для функціональної довговічності, отримують високу важливість, що збільшує їх внесок при формуванні D . Далі оптимізація зводиться до максимізації (D) і рішення, що має найбільше значення загальної функції бажаності, вважається оптимальним у багатокритеріальному сенсі.

У задачі підбору складів реставраційних композитів для будівель з вапняку-черепашнику застосування функції бажаності особливо зручно, оскільки властивості матеріалів перебувають у конфліктних відношеннях: подрібнений черепашник збільшує адгезію та паропроникність, але одночасно різко підвищує водонасичення та знижує міцність на стиск; цемент підвищує міцність та знижує водонасичення, але зменшує паропроникність; глина підвищує адгезію та покращує реологію, але може збільшувати водопоглинання. У таких умовах немає єдиного критерію, і застосування функції бажаності дозволяє вибрати компромісне рішення, що відповідає конкретній «спеціалізації» складу.

Існує кілька тематичних варіантів оптимізації, кожен з яких відповідає певній ролі композиційного матеріалу в системі реставрації. В роботі при розробці максимально «дихаючого» складу (складу А) основною метою було досягнення низького водонасичення та високої паропроникності. Тому для цих властивостей функція бажаності була задана як мінімізація для водонасичення і максимізація для паропроникності, причому ваги обирались строго вище одиниці ($s = 2$), а важливість встановлена максимальною (5). Адгезію до черепашнику задали як параметр, що прагне максимуму, але з дещо меншою вагою, щоб уникнути надмірної концентрації рішення у вузьких областях факторного простору. Міцність у цьому варіанті була задана у вигляді інтервалу «не нижче за деякий мінімум», щоб шар залишався структурно стійким, але не втрачав паропроникності.

Таким чином, для визначення складу А були використані вимоги, обмеження, важливості та ваги, що наведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Вимоги та обмеження для складу А

Фактори та властивості	Мета оптимізації	Нижня межа	Верхня межа	Нижня вага	Верхня вага	Важливість
X_1	В інтервалі	-1	1	1	1	3
X_2	В інтервалі	-1	1	1	1	3
X_3	В інтервалі	-1	1	1	1	3
R_c	В інтервалі	2,7	3,5	1	1	3
$Perm$	максимум	0,001131	0,006168	1	1	5
$Radh$	максимум	0,3	0,5	1	1	4
$WA\%$	мінімум	3,4	12,7	1	2	5

Джерело: розроблено авторами.

Результати оптимізації спеціалізованого «дихаючого» складу представлено в табл. 5 (перші 3 оптимальні варіанти).

Таблиця 5 – Оптимальний «дихаючий» консерваційний склад і його властивості

№	X ₁	X ₂	X ₃	Rc	Perm	Radh	WA%	Desirability
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1	-0,1	3,007	0,002	0,461	5,755	0,369
2	1	1	-0,11	3,021	0,002	0,460	5,715	0,369
3	1	1	-0,05	2,958	0,002	0,462	5,907	0,369

Джерело: розроблено авторами.

Оптимальний склад (склад А) реставраційного композиту, що «дихає», та значення для його основних властивостей показані на рис. 6.

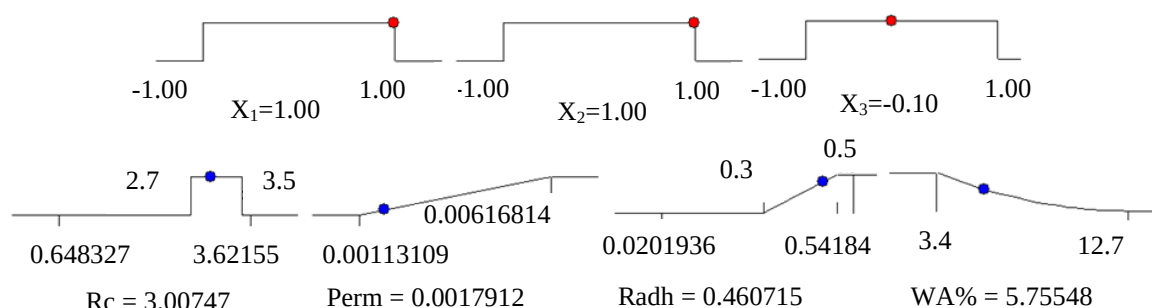


Рис. 6. Відображення складу А композиту та його властивостей

Джерело: розроблено авторами.

Низький рівень значень функції бажаності свідчить про суттєву різноспрямованість вимог.

Для стін з підвищеною вологістю ключовою метою стає мінімізація водонасичення при одночасному забезпеченні високої паропроникності, щоб прискорити віддачу води. Для цих критеріїв ваги часткових бажаностей встановлювали високими з максимальними значеннями. Адгезія регулювалась як максимальна величина з помірною вагою для забезпечення якісного контакту, але без обмеження оптимізації. Міцність на стиск задавалась без прагнення до максимальних значень, які можуть погіршити вологообмін.

Вимоги для оптимального складу Б композиту, призначеного для стін з підвищеною вологістю наведені в таблиці 6.

Таблиця 6 – Вимоги до складів для стін з підвищеною вологістю

Фактори та властивості	Мета оптимізації	Нижня межа	Верхня межа	Нижня вага	Верхня вага	Важливість
X ₁	В інтервалі	-1	1	1	1	3
X ₂	В інтервалі	-1	1	1	1	3
X ₃	В інтервалі	-1	1	1	1	3
Rc	В інтервалі	3	3,62155	1	1	3
Perm	максимум	0,00113	0,00617	1,2	1	5
Radh	максимум	0,3	0,5	1	1	4
WA%	мінімум	3,4	12,7	1	2,5	5

Джерело: розроблено авторами.

Результати оптимізації штукатурно-реставраційного складів для вологих стін (склад Б) показані в табл. 7 (три найкращі склади).

Таблиця 7 – Оптимальні штукатурні та реставраційні суміші для вологих стін

№	X ₁	X ₂	X ₃	Rc	Perm	Radh	WA%	Desirability
1	1	1	-0,93	3,622	0,002	0,432	4,062	0,313
2	1	1	-0,88	3,597	0,002	0,434	4,113	0,311
3	-0,45	1	-0,22	3,000	0,002	0,387	6,589	0,306

Джерело: розроблено авторами.

Отримані результати оптимізації (1 найкращий склад) відображені графічно на рис. 7.

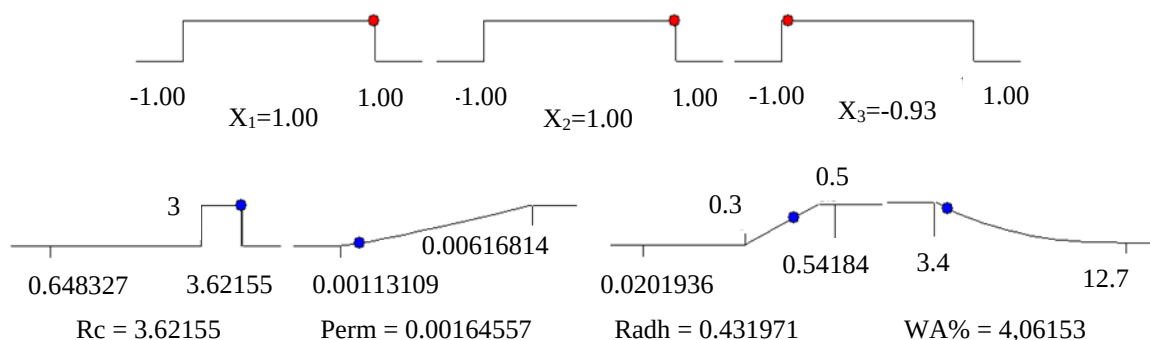


Рис. 7. Оптимальний штукатурно-реставраційний склад (склад Б) композиту для вологих стін

Джерело: розроблено авторами.

Значення функції бажаності суттєво менше за 1, що свідчить про різноспрямованість та конфлікт вимог до складу.

Висновки. Аналіз проведених досліджень показав, що ефективність реставраційних композитів для будівель з вапняку-черепашнику визначається насамперед ступенем їх структурної та гідрофізичної сумісності з пористою карбонатною основою, а не максимальними значеннями окремих механічних характеристик.

Вапняк-черепашник має пористу багатомасштабну структуру, що вимагає необхідність створення перехідної контактної зони між матеріалом реставрації та основою. Ця зона повинна мати градієнт пористості, проникності та жорсткості, що забезпечує рівноважний вологообмін між композитом і каменем. Такий підхід суттєво знижує ризик концентрації напружень у процесі експлуатації реставрованої будівлі, забезпечуючи довговічність і стабільність реставрації. Отже, важливо не просто прагнути до максимальної міцності матеріалів, а створювати комплексне узгодження фізико-хімічних і механічних параметрів реставраційних композитів з природною структурою вапняку-черепашнику.

Експериментально-статистичні моделі типу «склад – властивість» показали наявність виражених нелінійних ефектів і взаємного антагонізму між адгезійними, дифузійними, гідрологічними та міцнісними характеристиками. Підвищення адгезії та паропроникності, необхідних для довговічної роботи в системі «черепашник – реставраційний шар», супроводжується зростанням водонасичення і зниженням міцності на стиск, тоді як надмірне ущільнення матриці за рахунок збільшення частки жорстких в'язучих призводить до блокування капілярної мережі та погіршення вологообміну. Це підтверджує, що оптимальні рецептури формуються в області компромісу між взаємно конкуруючими вимогами.

Використання подрібненого черепашнику як складової комбінованого наповнювача відіграє ключову роль у формуванні сумісної контактної зони між реставраційним композитом і пористою карбонатною основою. Завдяки мінералогічній спорідненості з основою, подрібнений черепашник сприяє підвищенню адгезії, тобто покращенню зчеплення матеріалів. Крім того, його присутність підтримує високу паропроникність

композиту, що зумовлено відкритою поровою структурою, яка забезпечує ефективний вологообмін. Водночас існують граничні концентрації подрібненого черепашнику в складі реставраційного композиту. Перевищення цих концентрацій призводить до надмірного водопоглинання, що негативно впливає на механічні характеристики матеріалу, зокрема, знижує його міцність і працездатність при експлуатації. Таким чином, дуже важливо точно дозувати цей компонент для забезпечення балансу між адгезією, паропроникністю та механічною стабільністю реставраційного матеріалу.

Роль цементної складової в реставраційних матеріалах полягає в забезпеченні необхідної ранньої міцності та структурної зв'язності композиту. Але важливо обмежувати її вміст, оскільки надлишок цементу підвищує жорсткість матеріалу та знижує його дифузійну здатність, що негативно позначається на реставрації пористих карбонатних порід, де важлива паропроникність і здатність до вологообміну.

Глиниста домішка виступає як ефективний реологічний і структурний регулятор. Вона покращує проникнення матриці в пори основи та збільшує адгезійні властивості реставраційного шару. Проте, і для глинистої домішки існує оптимальний діапазон вмісту, при перевищенні якого зростає ступінь водонасичення композиту, що призводить до погіршення його міцнісних характеристик.

Застосування багатокритеріальної оптимізації методом функції бажаності у реставраційних композитах дозволило виділити технологічно відтворювані області складів із погодженими експлуатаційними характеристиками. Це дало змогу розробити спеціалізовані рецептури, адаптовані до різних умов експлуатації.

Список використаних джерел

1. Lubelli, B., Nijland, T.G., van Hees, R.P.J. (2021). Characterization and compatibility assessment of stone repair mortars. *Journal of Cultural Heritage*, 49, 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.02.001>.
2. Groot, C. (2016). Repair mortars for historic masonry: Effects of the binder choice on durability. *Heron*, 61(1), 33–56. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:41316542-1251-4c70-b970-65bff5a396a3>.
3. Alvarez-Galindo, J.I., Veiga, R., Martínez-Ramírez, S., Secco, M., Faria, P., Maravelaki-Papayianni, P., et al. (2021). RILEM TC 277-LHS: A review on mechanisms of setting and hardening of lime-based binding systems. *Materials and Structures*, 54, 1–30. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01648-3>.
4. Wang, X., Shang, H., Zhou, J., Gu, L., Xiao, Z., Wang, X., et al. (2024). Enhancing Hydraulic Lime Mortar with Metakaolin: A Study on Improving Restoration Materials for Historic Buildings. *Materials*, 17, 3548. <https://doi.org/10.3390/ma17143548>.
5. Naga Sai, A.; Ramadoss, R. (2021). A review on role of additives & pozzolanic materials in ancient structures. *Mater. Today Proc*, 43, 1383–1388. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.173>.
6. Žižlavský, T., Vyšvářil, M., Bayer P. (2023) Fine Pumice as Pozzolanic Additive in Restoration Lime Mortars. *RILEM Bookseries*, 42, 426–435. https://doi.org/10.1007/978-3-031-31472-8_34.
7. Strandberg-de Bruijn, P., Balksten K. (2024). Material properties of building limes for pointing mortar for renovation and restoration of neo-Gothic churches in Sweden. *MATEC Web of Conferences*, 403(3), 02010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202440302010>.
8. Branco, F.G., Belgas, M.d.L., Mendes, C., Pereira, L., Ortega, J.M. (2021). Characterization of Fresh and Durability Properties of Different Lime Mortars for Being Used as Masonry Coatings in the Restoration of Ancient Constructions. *Sustainability*, 13, 4909. <https://doi.org/10.3390/su13094909>.
9. Chen, Z., Liu, H., Xu, L., Ge, W. (2024). A review of mechanical properties and carbonation behavior evolution of lime mortar for architectural heritages restoration. *Miner. Miner. Mater*, 3, 3. <https://doi.org/10.20517/mmm.2023.26>.
10. Fusade, L., Orr, S.A., Wood, C., O'Dowd, M., Viles, H. (2019). Drying response of lime-mortar joints in granite masonry after an intense rainfall and after repointing. *Heritage Science*, 7, 38. <https://doi.org/10.1186/s40494-019-0277-7>.

11. Zhang, Y., Zhang, Y., Huang, J. (2022). Experimental study on capillary water absorption of sandstones from different grotto heritage sites in China. *Heritage Science*, 10, 25 <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00656-y>.
12. Yue W, Wang B. (2024). Ceramic-added lime and cement mortars: A review of applications in building products. *Science Progress*, 107(3), 28. <https://doi.org/10.1177/00368504241266559>.
13. Silva, Bruna A., Guerreiro, E., Duarte, António P.C. (2025). Comparative study of lime-based mortars for conservation and restoration interventions. *Construction and Building Materials*, 499, 143956 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143956>.
14. Ляшенко Т. В. (2021). Структуровані системи факторів і експериментально-статистичні моделі при дослідженні будівельних композитів. *Механіка та математичні методи*, 3(1), 47–61. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2021-3-1-47-61>.
15. Voznesensky, V., Lyashenko, T. (1998). Experimental statistical modelling in computational materials science. In: *Proceeding of the 37th International Seminar Modeling and Optimisations composites*. Odessa, April.
16. Voznesensky, V.A., Lyashenko, T.V., Ogarkov, B.L. (1989) Numerical Methods for Solving Construction and Technological Problems on a Computer. *Publishing House "Vyshcha School"*: Kyiv, Ukraine, 328 p.
17. Design of Experiments (DOE) Made Easy. (n.d.). <https://www.statease.com/software/design-expert/>.

References

1. Lubelli, B., Nijland, T.G., van Hees, R.P.J. (2021). Characterization and compatibility assessment of stone repair mortars. *Journal of Cultural Heritage*, 49, 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.02.001>.
2. Groot, C. (2016). Repair mortars for historic masonry: Effects of the binder choice on durability. *Heron*, 61(1), 33–56. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:41316542-1251-4c70-b970-65bff5a396a3>.
3. Alvarez-Galindo, J.I., Veiga, R., Martínez-Ramírez, S., Secco, M., Faria, P., Maravelaki-Papayianni, P., et al. (2021). RILEM TC 277-LHS: A review on mechanisms of setting and hardening of lime-based binding systems. *Materials and Structures*, 54, 1–30. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01648-3>.
4. Wang, X., Shang, H., Zhou, J., Gu, L., Xiao, Z., Wang, X., et al. (2024). Enhancing Hydraulic Lime Mortar with Metakaolin: A Study on Improving Restoration Materials for Historic Buildings. *Materials*, 17, 3548. <https://doi.org/10.3390/ma17143548>.
5. Naga Sai, A.; Ramadoss, R. (2021). A review on role of additives & pozzolanic materials in ancient structures. *Mater. Today Proc*, 43, 1383–1388. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.173>.
6. Žižlavský, T., Vyšvářil, M., Bayer P. (2023) Fine Pumice as Pozzolanic Additive in Restoration Lime Mortars. *RILEM Bookseries*, 42, 426–435. https://doi.org/10.1007/978-3-031-31472-8_34.
7. Strandberg-de Bruijn, P., Balksten K. (2024). Material properties of building limes for pointing mortar for renovation and restoration of neo-Gothic churches in Sweden. *MATEC Web of Conferences*, 403(3), 02010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202440302010>.
8. Branco, F.G., Belgas, M.d.L., Mendes, C., Pereira, L., Ortega, J.M. (2021). Characterization of Fresh and Durability Properties of Different Lime Mortars for Being Used as Masonry Coatings in the Restoration of Ancient Constructions. *Sustainability*, 13, 4909. <https://doi.org/10.3390/su13094909>.
9. Chen, Z., Liu, H., Xu, L., Ge, W. (2024). A review of mechanical properties and carbonation behavior evolution of lime mortar for architectural heritages restoration. *Miner. Mater.*, 3, 3. <https://doi.org/10.20517/mmm.2023.26>.
10. Fusade, L., Orr, S.A., Wood, C., O'Dowd, M., Viles, H. (2019). Drying response of lime-mortar joints in granite masonry after an intense rainfall and after repointing. *Heritage Science*, 7, 38 <https://doi.org/10.1186/s40494-019-0277-7>.
11. Zhang, Y., Zhang, Y., Huang, J. (2022). Experimental study on capillary water absorption of sandstones from different grotto heritage sites in China. *Heritage Science*, 10, 25 <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00656-y>.
12. Yue W, Wang B. (2024). Ceramic-added lime and cement mortars: A review of applications in building products. *Science Progress*, 107(3), 28. <https://doi.org/10.1177/00368504241266559>.

13. Silva, Bruna A., Guerreiro, E., Duarte, António P.C. (2025). Comparative study of lime-based mortars for conservation and restoration interventions. *Construction and Building Materials*, 499, 143956 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143956>.
14. Liashenko, T. V. (2021). Strukturovani systemy faktoriv i eksperymentalno-statystychni modeli pry doslidzhenni budivelnnykh kompozytiv [Structured factor systems and experimental-statistical models in the study of building composites]. *Mekhanika ta matematychni metody – Mechanics and mathematical methods*, 3(1), 47–61. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2021-3-1-47-61>.
15. Voznesensky, V., Lyashenko, T. (1998). Experimental statistical modelling in computational materials science. In: *Proceeding of the 37th International Seminar Modeling and Optimisations composites*. Odessa, April.
16. Voznesensky, V.A., Lyashenko, T.V., Ogarkov, B.L. (1989) Numerical Methods for Solving Construction and Technological Problems on a Computer. *Publishing House “Vyshcha School”*: Kyiv, Ukraine, 328 p.
17. Design of Experiments (DOE) Made Easy. (n.d.). <https://www.statease.com/software/design-expert/>.

Дата першого надходження статті до видання: 24.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.12.2025

UDC 691.55:519.233

Andrii Kolesnykov¹; Dmytro Levytskyi²

¹Doctor in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Ecology
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture (Odessa, Ukraine)

E-mail: kolesnikov_himek@odaba.edu.ua, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8737-0933>

ResearcherID: [IRZ-3809-2023](https://orcid.org/IRZ-3809-2023)

²postgraduate student of the Department of Chemistry and Ecology
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture (Odessa, Ukraine)
E-mail: 9241dv@odaba.edu.ua, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5350-522X>

RESEARCH AND OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF RESTORATION COMPOSITES FOR SHELL LIMESTONE BUILDINGS

The paper presents the results of a comprehensive experimental and analytical study aimed at the development and optimization of plastering and restoration composites intended for the repair and conservation of buildings constructed from shell limestone. The relevance of the research is due to the pronounced porosity, multi-scale capillary structure, and moisture sensitivity of this natural carbonate stone, which makes it particularly vulnerable to incompatibility effects when dense cement-based or polymer repair materials are applied. This incompatibility often leads to moisture accumulation, salt crystallization, stress concentration at the interface, and subsequent degradation of the stone or the repair layer.

The study focuses on a multi-phase system “shell limestone substrate – interfacial zone – restoration composite,” in which the restoration material is based on air lime modified with moderate amounts of Portland cement and clay, and incorporates a combined aggregate consisting of quartz sand and crushed shell limestone. This formulation concept is intended to ensure mineralogical and structural compatibility with the porous carbonate substrate while simultaneously providing sufficient mechanical stability and controlled moisture transport.

Based on the experimental data, second-order regression models of the “composition–property” type were developed. The resulting response surfaces and isosurfaces revealed pronounced nonlinear effects and antagonistic interactions between the components. It was shown that adhesion, moisture transport properties, and mechanical strength are governed by competing mechanisms: densification of the mineral matrix increases strength but reduces vapor permeability, whereas the introduction of porous carbonate aggregate enhances moisture transport and interfacial compatibility at the expense of compressive strength. Clay plays a dual role by improving rheological properties and interfacial adaptation while, under certain conditions, increasing capillary activity.

To resolve these inherent contradictions, a multi-criteria optimization procedure based on the desirability function approach was applied. This method made it possible to identify compromise formulations tailored to different restoration scenarios, including “breathable” conservation layers and plasters for walls exposed to elevated moisture levels. The optimized compositions exhibit balanced adhesion, sufficient vapor permeability, controlled water uptake, and adequate mechanical performance, ensuring long-term compatibility with shell limestone substrates.

Keywords: Shell limestone, restoration composites, adhesion, vapor permeability, water saturation, experimental–statistical modeling, multi-criteria optimization.

Fig.: 7. Table: 7. References: 17.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-501-508](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-501-508)

УДК 004.94:711.4:528.9

Олена Віталіївна Савченко¹, Тетяна Володимирівна Ганєєва²¹доктор технічних наук, зав. кафедри архітектури та дизайну

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: olenasavch15@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5461-7127>. ResearcherID: G-5911-2014²старший викладач кафедри архітектури та дизайну

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: tetiana.hanieieva@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8228-5916>. ResearcherID: H-1354-2016

QGIS ЯК ІНСТРУМЕНТ ПРОСТОРОВОГО АНАЛІЗУ В СУЧАСНОМУ МІСТОБУДУВАННІ

Сучасне містобудування потребує точного просторового аналізу для забезпечення сталого розвитку та адаптації до змін. В умовах діджиталізації ключова роль належить ГІС-технологіям, зокрема відкритому програмному забезпеченню (Open Source GIS). У статті розглянуто архітектуру QGIS, яка підтримує повний цикл роботи з геопросторовими даними. Проаналізовано ключові методи просторового аналізу: векторний, растровий та мережевий. Дослідження підтверджує, що QGIS є повноцінним, багатофункціональним та економічно вигідним інструментом, який може виконувати складні операції. Його використання сприяє підвищенню ефективності планування та якісній підготовці кадрів.

Ключові слова: QGIS; просторовий аналіз; містобудування; Open Source GIS; освітній процес; ГІС-технології.

Рис.: 2. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Містобудування стикається із сучасними викликами від необхідності забезпечення сталого розвитку та підвищення якості життя до адаптації міст до кліматичних змін та управління стрімкою урбанізацією. Ефективне вирішення цих комплексних проблем неможливе без точного просторового аналізу, який дозволяє моделювати, прогнозувати та візуалізувати просторові наслідки планувальних рішень.

В умовах діджиталізації та зростання обсягів великих геоданих (Big Geodata), ключова роль у підтримці прийняття рішень належить ГІС-технологіям. «Інформаційні науки», такі як ГІС-наука, можуть процвітати разом з цим новим способом ведення науки, оскільки здатність обробляти, зберігати, описувати, обмінюватися та впорядковувати інформацію дедалі більше стає ключем до вирішення наших найнагальніших проблем [1]. Особливої актуальності набуває впровадження відкритого програмного забезпечення (Open Source GIS), яке забезпечує доступ до потужних аналітичних інструментів без значних ліцензійних витрат. Серед таких рішень QGIS виступає як найбільш гнучка та функціонально насичена платформа, що ідеально підходить для використання в муніципальних установах та академічному середовищі. Застосування QGIS сприяє підвищенню прозорості та обґрунтованості планувального процесу.

Постановка проблеми. Незважаючи на зростаючу потребу ринку праці у фахівцях, які вільно володіють інструментами просторового аналізу, освітні програми часто стикаються з фінансовими та організаційними обмеженнями при інтеграції комерційного ГІС-програмного забезпечення у навчальний процес. Висока вартість ліцензій на пропрієтарне програмне забезпечення обмежує кількість здобувачів, які можуть працювати з ним одночасно, та перешкоджає їхній самостійній роботі поза аудиторіями. У часи пандемії та воєнного стану саме самостійна робота є важливою та необхідною частиною у навчальному процесі, що створює проблему недостатньої практичної підготовки здобувачів ВО спеціальностей G19 «Будівництво та цивільна інженерія» та G17 «Архітектура і містобудування». Виникає потреба в систематизації та демонстрації повного спектра можливостей QGIS як доступної, функціонально еквівалентної та ліцензійно необмеженої платформи для забезпечення якісного та масового навчання методам просторового аналізу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. QGIS є широко визнаним інструментом у науковому середовищі, особливо в галузях, які активно працюють із природними та екологічними даними. Однак, існує тенденція до меншої кількості публікацій, зосереджених виключно на QGIS у контексті складного містобудівного аналізу порівняно з іншими сферами. Так, у лісівництві, сільському господарстві та екології QGIS часто використовується завдяки його потужному растровому аналізу та інтеграції з відкритими даними, зокрема, у лісівництві та екології – для моніторингу вирубки та росту лісів, моделювання поширення пожеж, класифікації типів лісового покриву, аналізу стану здоров'я лісів за індексами [2]; у сільському господарстві – для картографування врожайності, створення карт диференційованого внесення добрив, аналізу ґрунтів та їхньої вологості [3, 4]; у гідрології – для моделювання стоку поверхневих вод, визначення водозбірних басейнів, аналізу гідрографічної мережі.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на універсальність QGIS, у сфері комплексного містобудування та транспортного моделювання наукові публікації, які використовують виключно QGIS, є менш численними порівняно з комерційними ГІС-платформами. Це може бути пов'язане з тим, що традиційно великі містобудівні та транспортні моделі розроблялися з використанням комерційних платформ (наприклад, ArcGIS, TransCAD) через їхні спеціалізовані та історично усталені модулі, а також тим, що хоча QGIS має інструменти мережевого аналізу, але складні інтегровані моделі транспортного планування частіше вимагають спеціалізованих комерційних пакетів або тісної інтеграції з іншими Open Source інструментами.

Метою статті є проаналізувати можливості та методи застосування QGIS для виконання ключових типів просторового аналізу в контексті сучасного містобудування в освітньому процесі та оцінити переваги цієї платформи порівняно з комерційними аналогами.

Виклад основного матеріалу. Просторовий аналіз – це процес інтерпретації, оцінки та моделювання ГІС-даних. Отримана інформація обробляється за допомогою спеціалізованих комп'ютерних програм та класифікується за кількістю та складністю завдань: від простої візуалізації до комплексної аналітики за допомогою конкретних інструментів [5]. У контексті містобудування він є критично важливим для переходу від інтуїтивного планування до обґрунтованого, науково підтвердженого ухвалення рішень [1].

Основні напрямки просторового аналізу в місті включають:

- функціональне зонування: аналіз території міста за функціями (житлова, промислова, торгова, рекреаційна) та характером використання;
- аналіз міської інфраструктури: дослідження мережі доріг, громадського транспорту, комунікацій, їх доступності та навантаження;
- соціально-економічний аналіз: вивчення розподілу населення, житлового фонду, соціальних об'єктів (шкіл, лікарень), а також рівня доходів та зайнятості в різних районах;
- екологічний аналіз: оцінка стану довкілля, рівня забруднення, наявність зелених зон та їх доступність для мешканців;
- демографічний аналіз: аналіз чисельності, структури, динаміки населення та його просторового розподілу;
- містобудівний аналіз: використання просторових даних для розробки містобудівної документації, планування забудови та реорганізації міських територій;
- аналіз земельних ресурсів: вивчення використання земельних ділянок, їх належності та проблемних питань.

QGIS є ключовим представником Open Source GIS і пропонує значні переваги (рисунок 1) порівняно з комерційними аналогами, що особливо важливо для державного сектору та освітніх установ:

- QGIS є безкоштовним, що дозволяє впроваджувати його на всіх рівнях управління та створювати необмежену кількість робочих місць без фінансових бар'єрів, а також проводити навчання;

- програмне забезпечення може бути модифіковане та розширене через численні плагіни, а також інтегроване в інші системи завдяки відкритому API (PyQGIS). Це дозволяє адаптувати його під вузькоспеціалізовані потреби містобудування;

- велика міжнародна спільнота розробників та користувачів забезпечує постійне оновлення, швидке виправлення помилок та додавання нових аналітичних інструментів [6];

- QGIS повністю підтримує стандарти OGC (Open Geospatial Consortium), що гарантує сумісність з іншими ГІС-системами та легкість обміну даними (наприклад, через формати GeoJSON, KML, WMS/WFS).



Рис. 1. Переваги QGIS

Джерело: сформовано авторами.

QGIS функціонує як потужний інтеграційний інструмент, що забезпечує повний цикл роботи з геопросторовими даними: від імпорту до візуалізації та аналізу. Архітектура платформи ефективно підтримує складні завдання міського планування:

1. Базові інструменти та ядро забезпечують обробку векторних та растрових даних, роботу з координатами та проєкціями. Вбудовані інструменти геообробки дозволяють виконувати основні операції (буферизація, накладання, кліпування).

2. Система плагінів – це розширюваний модуль, який дає QGIS значну перевагу. Плагіни, зокрема QuickOSM (для отримання відкритих міських даних) або OR Tools (для складного мережевого аналізу), трансформують QGIS у спеціалізовану робочу станцію для планувальника [7].

3. Інтеграція з базами даних: QGIS є ідеальним клієнтом для роботи з просторовими базами даних, зокрема PostGIS. Це дозволяє зберігати великі обсяги міських даних, виконувати складні просторові запити на рівні сервера та забезпечувати колективний доступ до інформації.

QGIS надає планувальникам набір потужних інструментів, згрупованих у модулі Processing Toolbox та розширених через плагіни, що охоплюють три ключові категорії просторового аналізу: векторний, растровий та мережевий.

1. Векторний аналіз та геообробка.

Векторний аналіз працює з точковими, лінійними та полігональними об'єктами і є основою для моделювання міської структури.

- буферні зони (Buffer Analysis): цей інструмент створює полігони навколо векторних об'єктів на задану відстань. У містобудуванні буфери використовуються для визначення зон санітарного захисту (наприклад, навколо промислових об'єктів) та оцінки зони обслуговування (наприклад, 300 метрів пішохідної доступності до зупинки громадського транспорту) (рис. 2);

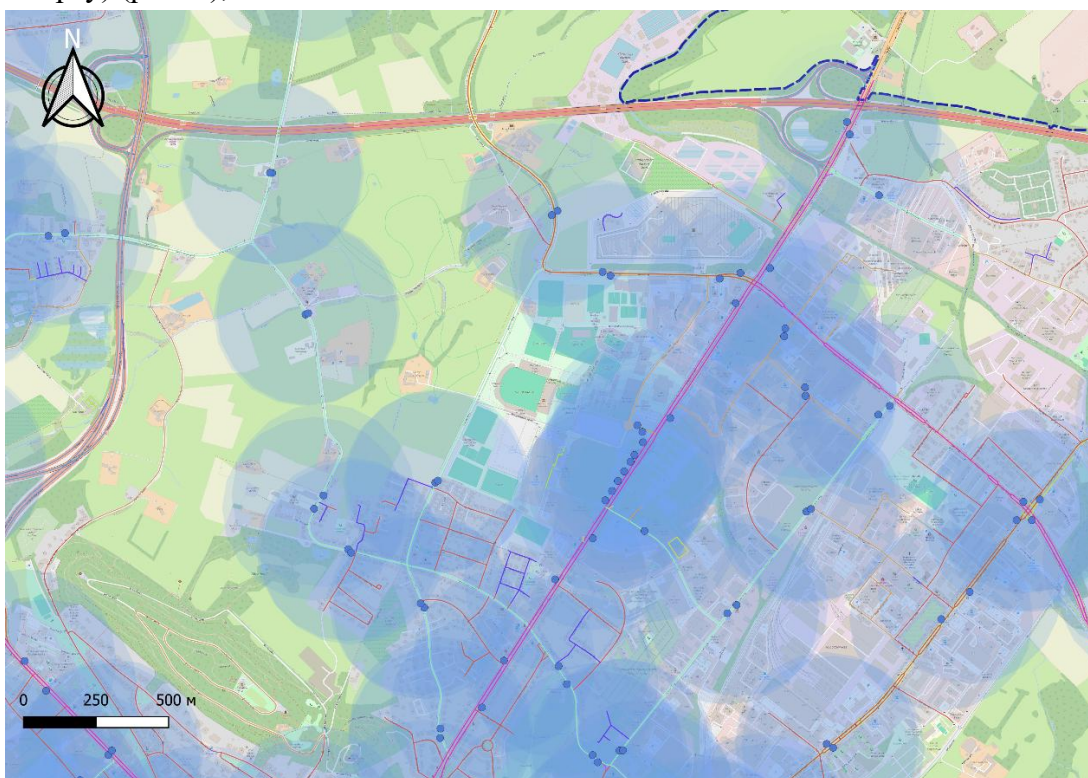


Рис. 2. Пішохідна доступність автобусних зупинок

Джерело: сформовано авторами у QGIS.

- накладання (Overlay Analysis): це група операцій (Union, Intersect, Difference, Symmetrical Difference), які об'єднують атрибутивні дані та геометрію двох або більше шарів. Це критично важливо для виявлення ділянок, що відповідають множинним критеріям. Наприклад, операція Intersect може знайти території, які одночасно є потенційною зоною затоплення та зоною нової житлової забудови;

- геокодування та просторове з'єднання: QGIS дозволяє пов'язувати дані з таблиць (наприклад, дані про населення чи кількість ліжок-місць) з геометрією полігонів (квартили, райони) на основі їхнього просторового розташування. Це забезпечує можливість тематичного картографування та статистичного аналізу.

2. Растровий аналіз.

Растровий аналіз працює з регулярними сітками даних (пікселями) і є незамінним для аналізу безперервних полів (рельєф, температура, супутникові знімки). Використання растрових моделей для аналізу рельєфу (Digital Elevation Model - DEM) дозволяє генерувати похідні шари, критичні для планування:

- ухили (Slope) – для визначення ділянок із занадто великим чи малим ухилом для будівництва;
- експозиція (Aspect): аналіз освітленості схилів, важливий для інсоляційного режиму та розміщення сонячних панелей;
- моделювання видимості (Viewshed Analysis) потрібне для визначення зон видимості від пам'ятки або архітектурної домінанти для контролю висотності забудови;
- класифікація супутникових знімків: QGIS, часто у поєднанні з плагінами, може обробляти супутникові знімки (наприклад, Landsat або Sentinel). Це дає можливість спостерігати зміни землекористування, оцінювати площу зеленого покриття через індекси, як-от NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), та контролювати незаконну забудову.

3. Мережевий аналіз (Network Analysis).

Мережевий аналіз моделює переміщення людей і ресурсів дорожньою або пішохідною мережею, що є ключовим для транспортного та соціального планування:

- розрахунок доступності та ізохрон: засобами QGIS та спеціалізованих плагінів (наприклад, ORS Tools або вбудованими інструментами для найкоротшого шляху) можна розрахувати час або відстань переміщення існуючою мережею. Це дозволяє створювати ізохрони – зони, доступні за певний часовий ліміт (наприклад, 20 хвилин на громадському транспорті), що є основою для оцінки доступності шкіл, лікарень чи робочих місць [8];
- оптимізація маршрутів: аналіз дозволяє знайти найкоротші або найшвидші маршрути, що важливо для планування маршрутів громадського транспорту, логістики комунальних служб або оптимізації роботи служб доставки та екстреної допомоги;
- матриця "Вихід-Призначення" (Origin-Destination Matrix): розрахунок відстаней або часу між багатьма точками попиту (наприклад, житлові будинки) та точками пропозиції (наприклад, лікарні) використовується для кількісної оцінки потенційної доступності всього міста.

Практична цінність QGIS у містобудуванні розкривається через його здатність швидко інтегрувати та аналізувати різноманітні просторові дані, надаючи планувальникам необхідну доказову базу для прийняття рішень.

1. Аналіз житлової забудови та щільності.

QGIS є незамінним інструментом для моніторингу та оцінки параметрів забудови, що є ключовим для контролю за міським розвитком.

- тематичне картографування щільності: за допомогою інструментів просторової статистики (наприклад, розрахунок площі полігонів забудови, населення на одиницю площі) та функціоналу тематичного картографування створюються карти щільності населення, забудови або використання житлового фонду. Це дозволяє швидко виявляти райони надмірного навантаження на інфраструктуру або, навпаки, території з недостатнім використанням;

- оцінка відповідності нормам: шляхом накладання (Overlay) шару фактичної забудови на шар проєктного зонування (генеральний план) можна виявити зони конфліктів землекористування та порушення містобудівних норм (наприклад, перевищення дозволеної висотності або відсотка забудови ділянки).

2. Планування зеленої інфраструктури.

Використання растрового аналізу в QGIS є критично важливим для оцінки та планування міських зелених зон.

- аналіз NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): обробка мультиспектральних супутникових знімків дозволяє розрахувати індекс NDVI, який слугує надійним показником здоров'я та щільності рослинного покриву. Це дає можливість точно оцінити «зелений фонд» міста та теплові острови;

- оцінка доступності зелених зон: за допомогою мережевого аналізу розраховуються ізохрони пішохідної доступності (наприклад, 10–15 хвилин) від житлових масивів до парків і скверів. Результати цього аналізу дозволяють виявити райони, що мають дефіцит зелених зон, і обґрунтувати необхідність створення нових об'єктів рекреації.

3. Оцінка ризиків та вразливості.

QGIS активно використовується для моделювання загроз і оцінки вразливості міських територій, що є основою для розробки планів протидії надзвичайним ситуаціям:

- моделювання зон затоплення: інтеграція QGIS з гідрологічними моделями (наприклад, через інструменти GRASS або SAGA у Processing Toolbox) дозволяє моделювати поширення водних потоків на основі цифрової моделі рельєфу (DEM) та оцінити, які об'єкти інфраструктури та житлові райони потрапляють у потенційну зону ризику при різних рівнях опадів;

- аналіз шумового забруднення: шляхом просторового поєднання даних про джерела шуму (автомагістралі, залізничні колії) та моделей поширення звуку можна створити карти шумового дискомфорту (ізошуми). Ці карти є ключовим аргументом для планування захисних заходів (шумозахисні екрани) або коригування функціонального зонування.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує, що QGIS є повноцінним, багатофункціональним та економічно вигідним інструментом для здійснення широкого спектра просторового аналізу в сучасному містобудуванні. Завдяки своїй відкритій архітектурі QGIS успішно інтегрує ключові методи (векторний, растровий, мережевий аналіз) та надає планувальникам можливість виконувати складні операції – від моделювання зон ризику затоплення та аналізу зеленої інфраструктури до точного розрахунку транспортної доступності та оцінки придатності територій. Таким чином, QGIS суттєво сприяє підвищенню ефективності, обґрунтованості та прозорості містобудівного процесу, демократизуючи доступ до високоякісних ГІС-технологій.

Незважаючи на значні переваги, впровадження QGIS у містобудівну практику супроводжується низкою викликів:

- для повноцінного використання розширеного функціоналу QGIS та інтеграції плагінів потрібна належна підготовка фахівців, оскільки навчання може бути менш формалізованим, ніж для комерційного програмного забезпечення;

- ефективність аналізу значною мірою залежить від якості та повноти відкритих геопросторових даних (наприклад, OpenStreetMap, Open Data порталів). Інколи потрібна значна робота з очищення та топологічної корекції даних;

- може виникати потреба у стандартизації робочих процесів та забезпеченні технічної підтримки, що вимагає внутрішньої експертизи.

Подальший розвиток QGIS та суміжних технологій відкриває нові можливості для містобудівного аналізу:

- посилення можливостей роботи з 3D-даними (наприклад, через плагіни для відображення будівель та аналізу тіней), що дозволить перейти до більш комплексного міського моделювання та візуалізації;

- інтеграція алгоритмів машинного навчання для автоматизованої класифікації супутникових знімків, виявлення об'єктів та прогнозування просторових змін (наприклад, через бібліотеки Python, інтегровані в PyQGIS);

- розвиток інструментів для обробки великих динамічних масивів даних (наприклад, дані мобільних операторів або GPS-трекінгу) для моделювання транспортних потоків та соціальної активності міста в реальному або квазіреальному часі;

Таким чином, QGIS не лише є інструментом сьогодення, але й формує основу для інноваційного та науково обґрунтованого планування міст майбутнього.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання текстів.

Під час написання цього матеріалу автор(и) використовували Google Gemini – покращення сприйняття візуального ряду, обробка та пошук джерел за тематикою.

Після використання Google Gemini автор(и) переглянув(ли) та відредагував(ли) зміст за потреби та взяв(ли) на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Goodchild, M. F. (2009). Geographic information systems and science: Today and tomorrow. *Annals of GIS*, 15(1), 3–9. <https://doi.org/10.1080/19475680903250715>.
2. Khainus, D. D., et al. (2024). Geospatial database generation of forest growth using the QGIS software package. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1415(1), Article 012049. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012049>.
3. Fallah, M. H., Ramadan, G. M., & Venkatcharyulu, S. (2025). Optimizing fertilizer use in precision agriculture with GIS and remote sensing. *SHS Web of Conferences*, 216, Article 01061. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202521601061>.
4. Firoozi, M. A., Goodarzi, M., & Shirali, R. (2017). Assessment and potential survey of lands in Khuzestan Province using the Buckley geometric mean model and geographic information system (GIS). *Open Journal of Geology*, 7(3), 234–241. <https://doi.org/10.4236/ojg.2017.73016>.
5. Kohut, P. (n.d.). *Prostorovyi analiz: Obrobka HIS danykh ta yikh vykorystannia* [Spatial analysis: Processing GIS data and their application]. EOS Data Analytics. <https://eos.com/uk/blog/prostorovyi-analiz/>.
6. QGIS Development Team. (2024). *QGIS user guide* (Version 3.40). QGIS Project. https://docs.qgis.org/3.40/en/docs/user_manual/index.html.
7. QGIS Development Team. (2024). *QGIS user guide* (Version 3.40). QGIS Project. https://docs.qgis.org/3.40/en/docs/user_manual/index.html.
8. Mitchell, A. (2005). *The ESRI guide to GIS analysis: Volume 2 — Spatial measurements and statistics*. ESRI Press.

References

1. Goodchild, M. F. (2009). Geographic information systems and science: Today and tomorrow. *Annals of GIS*, 15(1), 3–9. <https://doi.org/10.1080/19475680903250715>.
2. Khainus, D. D., et al. (2024). Geospatial database generation of forest growth using the QGIS software package. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1415(1), Article 012049. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012049>.
3. Fallah, M. H., Ramadan, G. M., & Venkatcharyulu, S. (2025). Optimizing fertilizer use in precision agriculture with GIS and remote sensing. *SHS Web of Conferences*, 216, Article 01061. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202521601061>.
4. Firoozi, M. A., Goodarzi, M., & Shirali, R. (2017). Assessment and potential survey of lands in Khuzestan Province using the Buckley geometric mean model and geographic information system (GIS). *Open Journal of Geology*, 7(3), 234–241. <https://doi.org/10.4236/ojg.2017.73016>.
5. Kohut, P. (n.d.). *Prostorovyi analiz: Obrobka HIS danykh ta yikh vykorystannia* [Spatial analysis: Processing GIS data and their application]. EOS Data Analytics. <https://eos.com/uk/blog/prostorovyi-analiz/>.
6. QGIS Development Team. (2024). *QGIS user guide* (Version 3.40). QGIS Project. https://docs.qgis.org/3.40/en/docs/user_manual/index.html.
7. QGIS Development Team. (2024). *QGIS user guide* (Version 3.40). QGIS Project. https://docs.qgis.org/3.40/en/docs/user_manual/index.html.
8. Mitchell, A. (2005). *The ESRI guide to GIS analysis: Volume 2 — Spatial measurements and statistics*. ESRI Press.

Дата першого надходження статті до видання: 30.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.12.2025

Olena Savchenko¹, Tetiana Hanieieva²

¹Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Architecture and Design
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: olenasavch15@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5461-7127>. ResearcherID: G-5911-2014

²Lecturer of the Department of Architecture and Design

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: tetiana.hanieieva@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8228-5916>. ResearcherID: H-1354-2016

QGIS AS A SPATIAL ANALYSIS TOOL IN MODERN URBAN PLANNING

Modern urban planning faces challenges of sustainable development and adaptation to change, which necessitates accurate spatial analysis using GIS technologies. The implementation of open-source software (Open Source GIS) is becoming particularly relevant.

The high cost of commercial GIS software limits its integration into educational curricula, creating a problem of insufficient practical training for students specializing in civil engineering and architecture.

The aim of the article is to analyze the capabilities and methods of applying QGIS for performing key types of spatial analysis within the context of contemporary urban planning in the educational process, and to evaluate the advantages of this platform compared to commercial analogues.

The article analyzes the QGIS architecture, which ensures a full cycle of work with geospatial data, including basic tools, the plugin system (QuickOSM, OR Tools), and integration with spatial databases. The use of key spatial analysis methods in QGIS is examined, namely: vector analysis and geoprocessing (using buffer zones to assess service areas, overlay analysis to identify areas meeting multiple criteria, and spatial joining); raster analysis (applying Digital Elevation Models (DEM) to calculate slopes, aspect, visibility modeling, as well as satellite imagery classification for NDVI analysis and land-use control); network analysis (calculating accessibility and isochrones to assess coverage by social facilities, route optimization, and creating Origin-Destination matrices); and practical case studies (analysis of residential development, green infrastructure planning, risk assessment).

The study confirms that QGIS is a multifunctional and cost-effective tool, capable of performing the complex operations required for informed urban planning. The use of QGIS in the educational process facilitates high-quality personnel training and the democratization of access to GIS technologies. Challenges and prospects for further development (3D modeling, Machine Learning integration) are also considered.

Keywords: QGIS, spatial analysis, urban planning, Open Source GIS, educational process, GIS technologies.

Fig.: 2. **References:** 8.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-509-521](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-509-521)

УДК 502.131.1:631.6:574.3

**Микола Георгійович Сербов¹, Алла Вікторівна Толмачова²,
Віктор Вікторович Пилип'юк³**

¹доктор економічних наук, професор, декан факультету гідрометеорології і екології
Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова (Одеса, Україна)

E-mail: serbovng@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0220-6745>

²кандидат географічних наук, доцент кафедри агрометеорології та агроєкології

Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова (Одеса, Україна)

E-mail: agro@onu.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9340-5028>

³кандидат географічних наук, доцент,

доцент кафедри гідрології суші,

Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова, (Одеса, Україна)

E-mail: gidro@onu.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0365-4275>

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МЕЛІОРАТИВНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОРІЗНОМАНІТТЯ АГРОЛАНДШАФТІВ

Стаття обґрунтовує концептуальну модель екологічної оптимізації меліоративних комплексів України, яка спрямована на узгодження аграрної продуктивності зі збереженням біорізноманіття агроландшафтів України. Отримані результати засвідчують, що традиційні інтенсивні меліоративні системи спричиняють фрагментацію ландшафтів, вторинне засолення, деградацію ґрунтів і значне зменшення біорізноманіття. Запропоновано інтегральний індекс екологічної стійкості та низку математичних моделей, які дають змогу кількісно оцінювати та мінімізувати негативні наслідки меліоративної діяльності. Запропоновано інтегральний індекс екологічної стійкості та низку математичних моделей, які дають змогу кількісно оцінювати та мінімізувати негативні наслідки меліоративної діяльності. Практична значущість дослідження полягає у формуванні науково обґрунтованої методики проектування та модернізації меліоративних систем, придатної для реалізації в проєктах поствоєнного відновлення та адаптації аграрного сектору України.

Ключові слова: меліоративні системи; екологічна оптимізація; біорізноманіття; агроландшафт; адаптивне управління; водний режим; ландшафтно-екологічний підхід; екологічна стійкість.

Рис.: 1. Табл. 5. Бібл.: 17.

Актуальність теми дослідження. Екологічна оптимізація меліоративних систем набуває критичного значення в контексті конвергенції кількох ключових загроз для аграрної сфери України – інтенсифікації виснаження ґрунтово-водних ресурсів, підвищення кліматичної варіабельності, воєнної деструкції інженерної інфраструктури та імперативу повоєнної реконструкції на принципах екологічної трансформації, що вимагає фундаментального переосмислення підходів до управління водним режимом агроландшафтів. Конвенційні меліоративні моделі, зорієнтовані здебільшого на максимізацію продуктивності через інтенсивне зрошення, осушення та дренажування, спричинили загострення деградаційних явищ, вторинне засолення, редукцію структурної різноманітності біотопів і ерозію біорізноманіття, що лімітує довгостроковий потенціал аграрного виробництва та посилює вразливість територій до екстремальних гідрометеорологічних подій. За цих обставин формування науково обґрунтованої меліоративної моделі, яка інтегрує продуктивність, екологічну резильєнтність і збереження біологічного різноманіття, постає критичною передумовою імплементації європейських екологічних стандартів, адаптації до кліматичних змін і розбудови конкурентоспроможної, ресурсоефективної аграрної стратегії України.

Постановка проблеми. Проблема полягає в тому, що наявна практика проектування, функціонування та модернізації меліоративних систем здебільшого ґрунтується на інженерно-технологічних та агротехнічних критеріях, натомість екологічні параметри функціонування агроландшафтів, індикатори біорізноманіття та довгострокові наслідки трансформації природних гідрологічних режимів залишаються фрагментарно врахованими або повністю виключеними з системи прийняття управлінських рішень. Як наслідок, ме-

ліорація нерідко функціонує як фактор поглиблення ґрунтової деградації, елімінації водно-болотних екосистем, деструкції екологічних коридорів і спрощення ландшафтно-архітектури, що суперечить принципам сталого розвитку й сучасним вимогам до екосистемного менеджменту територій. Відтак наукове завдання полягає в конструюванні концептуальної та інструментальної моделі екологічно оптимізованої меліорації, яка синхронізує зональне водорегулювання, природоохоронні інтервенції та економічні механізми стимулювання, забезпечуючи збалансований консенсус між продуктивністю та збереженням біорізноманіття агроландшафтів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Літературні джерела підтверджують, що екологічна оптимізація меліоративних систем це доволі багатоаспектна проблематика, яка охоплює як стан ґрунтових ресурсів, так і трансформаційні процеси в екосистемах під впливом меліоративних заходів. Зокрема, Балюк С. у своїх роботах акцентує на деградаційних тенденціях чорноземів та необхідності імплементації сталих систем управління ґрунтовою родючістю [1], натомість Бондарчук С. аргументує потенціал ренатуралізації меліорованих територій як стратегії відновлення екологічної рівноваги на трансформованих землях Полісся [2]. Монографічне видання за редакцією Балюка С. висвітлює критичний стан ґрунтового покриву в умовах воєнних дій та наголошує на значущості адаптивних природоохоронних інтервенцій [3]. Суттєвий внесок у розуміння лісоохоронних аспектів меліорації репрезентують також дослідження Дяченка М., де акцентується на інституційних викликах реформування лісового сектору [4]. У роботах Ісаченка С. проаналізовано вплив різних систем обробітку на екологічний стан меліорованих земель, підкреслюючи сенситивність агроландшафтів до гідрологічних модифікацій [5]. Дослідження Ковальова М. доповнюють оцінку трансформацій гумусового стану в умовах агромеліоративного впливу [6], тоді як методичні рекомендації НЗК-БРДО окреслюють сучасні підходи до управління зрошенням та дренажуванням [7]. Аналітичний документ щодо реформи збереження біорізноманіття [8] структурує природоохоронні пріоритети, які мають бути інтегровані у проекти екологічної оптимізації меліоративних систем.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на вагомий обсяг наукових досліджень, які присвячені аналізу ефективності меліоративних систем та впливу водорегулюючих заходів на продуктивність агроландшафтів, досі залишається недостатньо розробленою проблематика комплексної взаємодії меліоративних процесів із просторовою організацією біорізноманіття, зокрема в умовах посилення кліматичної мінливості та регіональних водних диспропорцій. Відсутні інтегровані моделі, що поєднували б зональну специфіку меліорації, гідрологічну чутливість територій, антропогенну фрагментацію ландшафтів та екосистемні функції, які визначають стійкість агроландшафтів. Обмеженим є наукове осмислення механізмів адаптивного управління земельними ресурсами, що інтегрують природоохоронні підходи, економічні інструменти та меліоративні практики в регіонах з контрастними природними умовами: степовій, приморській та поліській зонах України, які демонструють диференційовану відповідь на водні інтервенції. Окрему дослідницьку прогалину становить відсутність методологічних підходів до оцінки кумулятивних і відкладених наслідків меліоративної діяльності, що є критично важливим для прогнозування довготривалої екологічної стійкості агроландшафтів.

Метою статті є обґрунтування концепції екологічної оптимізації меліоративних систем шляхом поєднання ландшафтно-екологічних принципів, інтегрованої оцінки біорізноманіття та моделювання водорегулюючих процесів для формування адаптивних, екологічно стійких та ресурсоефективних режимів управління агроландшафтами України.

Виклад основного матеріалу. Ландшафтно-екологічні принципи формування стійких агросистем ґрунтуються на інтеграції природних геосистемних процесів у структуру агровиробництва таким чином, щоб зберегти цілісність біотичних і абіотичних компонентів, забезпечити оптимальний режим водообміну, підтримати різноманітність біотопів та мінімізувати антропогенну фрагментацію території, оскільки саме ландшафтна цілісність визначає потенціал екосистемного саморегулювання, здатність агроландшафту амортизувати кліматичні стреси та протидіяти деградаційним процесам. У цих умовах виділимо питання коректного забезпечення мезорельєфних та мікрорельєфних одиниць, що визначають специфіку поверхневого стоку, динаміку ґрунтових вод і характер ґрунтоутворних процесів, адже навіть незначні морфологічні зміни рельєфу здатні радикально трансформувати функціонування агроєкосистеми та змінити її реакцію на меліоративні втручання (рис. 1) [9].



Рис. 1. Агроєкологічне районування території України

Джерело: [10].

Структурні й функціональні компоненти агроландшафту, що виявляють найвищу чутливість до меліорації, охоплюють ґрунтово-гідрологічні комплекси, рослинні угруповання, мережу дрібних водотоків, заплавні елементи та лісосмути, які виконують роль стабілізаційних біокоридорів і елементів екологічного каркасу; порушення цих компонентів, зумовлене регулюванням водного режиму, механічною трансформацією ґрунтів або зміною рослинного покриву, призводить до зниження трофічної різноманітності, руйнування локальних ніш і спрощення біотичних зв'язків. Таким чином, будь-яка меліоративна система, яка не враховує ландшафтну структуру та природну неоднорідність території, неминуче зменшує стійкість агроландшафту, спричиняючи довготривалі дисфункції, що виходять за межі локального впливу та набувають характеру регіональних екологічних ризиків.

Вплив меліоративних систем на біорізноманіття проявляється через комплекс гідрологічних змін, що включають перерозподіл ґрунтових вод, зміну глибини їх залягання, модифікацію напрямку поверхневого стоку й здатність площі утримувати вологу, що в результаті зумовлює формування нових гідротопів або, навпаки, повне знищення вологолюбних біоценозів. Осушення земель, яке передбачає інтенсивне відведення надлишкової вологи, призводить до прогресуючої мінералізації органічної речовини, зниження

рівня ґрунтової біоти, деградації торфових угідь та втрати специфічних видів, адаптованих до гідрофільних умов, тоді як зрошення, у свою чергу, за неправильного режиму подачі води спричиняє вторинне засолення, заболочування окремих ділянок та порушення газового режиму ґрунтів, що негативно відбивається на різноманітності і продуктивності місцевих фітокомплексів [11].

Методика оцінки екологічної стійкості меліорованих агроландшафтів направлена на побудову системи індикаторів, яка дозволяє одночасно враховувати структурні, композиційні та функціональні параметри біорізноманіття, а також інтегрувати в аналіз властивості ґрунту, стан водних ресурсів і динаміку рослинного покриву, що у сукупності визначає здатність агроландшафту зберігати рівновагу під дією меліоративних втручань різної інтенсивності та просторового охоплення. У межах цієї системи структурні індикатори відображають ступінь горизонтальної та вертикальної диференціації агроландшафту, композиційні характеристики: домінантність окремих фітоценозів, співвідношення природних і трансформованих ділянок, а функціональні показники – інтенсивність біогеохімічних потоків, швидкість рециркуляції органічної речовини та гнучкість екосистемних зв'язків, що реагують на зміну водного режиму, ґрунтової вологості, глибини дренажу або рівня зрошення.

Оцінка екологічних індикаторів ґрунту починається з аналізу гранулометричного складу, вмісту гумусу, запасів доступних форм азоту та фосфору, ступеня структурної агрегованості, проникності кореневмісного шару та його здатності акумулювати вологу, оскільки кожен із цих параметрів реагує на меліоративні втручання по-різному, формуючи специфічні екологічні траєкторії, які необхідно враховувати в довгострокових моделях управління. Стан водних ресурсів оцінюють через рівень ґрунтових вод, швидкість їх коливань упродовж вегетаційного періоду, концентрацію розчинних солей, ступінь вторинного засолення та динаміку відтоку, що формує нові гідрологічні ніші, які можуть бути сприятливими для окремих біотичних угруповань або, навпаки, спричиняти їх деградацію. Аналіз рослинності охоплює вивчення фітоценотичної різноманітності, домінантного складу, проєктивного покриття, частки адвентивних та інвазійних видів і стійкості угруповань до коливань вологості чи змін у живленні, спричинених меліоративними заходами. Для комплексної оцінки екологічної стійкості агроландшафту застосовується інтегральний індекс стійкості, який можна подати у вигляді формули:

$$I_{eco} = \alpha B_s + \beta B_c + \gamma B_f + \delta S_g + \eta W_q + \theta V_c, \quad (1)$$

де B_s – структурні індикатори біорізноманіття;

B_c – композиційні індикатори;

B_f – функціональні індикатори;

S_g – ґрунтові екологічні параметри;

W_q – показники якості води та водного режиму;

V_c – характеристики рослинного покриву;

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \theta$ – вагові коефіцієнти, отримані внаслідок експертного або статистичного нормування.

Для підвищення практичної придатності оцінювання застосовується матриця агрегованих індикаторів, що дозволяє порівнювати агроландшафти, які перебувають у різних меліоративних режимах (табл. 1).

Таблиця 1 – Матриця проведення оцінки екологічної стійкості меліорованих агроландшафтів

№	Індикатор	Метод вимірювання	Нормативний діапазон	Чутливість до меліорації	Значення ризику	Пріоритетність дій
1	Структурна різноманітність	GIS-аналіз	0,4–0.6	Висока	Середній	Корекція просторової структури
2	Вміст гумусу	Лабораторний аналіз	3–4%	Середня	Високий	Агротехнічні заходи
3	Рівень ґрунтових вод	Моніторинг свердловин	1–2,5 м	Висока	Середній	Регулювання дренажу
4	Засоленість ґрунту	Електропровідність	<2 dS/m	Висока	Високий	Зміна режиму зрошення
5	Фітоценотичне різноманіття	Польові геоботанічні описи	>12 видів/100 м ²	Висока	Середній	Відновлення рослинності
6	Якість дренажної води	Хімічний аналіз	NO ₃ < 50 мг/л	Середня	Високий	Оптимізація поливу
7	Стабільність ґрунтової структури	Агрономічний аналіз	>60% агрегатів	Середня	Середній	Поліпшення агротехніки

Джерело: сформовано на основі [12; 13; 14].

Математичне моделювання меліоративних процесів утворює основу ключовий для прогнозування змін у водному режимі, родючості ґрунтів та стані біоти, що дозволяє адаптувати режими водорозподілу залежно від наявних ресурсів, кліматичних сценаріїв та екологічних обмежень. Однією з найбільш універсальних моделей є модель оптимізації водорозподілу при дефіциті води, яка передбачає максимізацію ефективності використання обмежених водних ресурсів з урахуванням природоохоронних параметрів, що обмежують обсяги поливу. Оптимізаційна модель має багатокритеріальний і нелінійний характер. Вона одночасно враховує економічні, екологічні та гідрологічні цілі, які перебувають у відносинах компромісу. Нелінійність зумовлена реакцією біотичних і ґрунтово-гідрологічних компонентів на зміну водного режиму та інтенсивності меліоративних впливів. Формалізована модель у вигляді цільової функції виглядає таким чином:

$$\max F = \sum_{i=1}^n (Y_i - C_i) W_i, \quad (2)$$

де Y_i – приріст урожайності на i -тій ділянці внаслідок поливу (т/га);

C_i – витрати води, що знижують екологічну стійкість (м³/га);

W_i – обсяг води, що подається на ділянку (м³/га);

n – кількість ділянок (од.).

Обмеження моделі включають:

$$\sum_{i=1}^n W_i \leq W_{\max}, W_i \geq 0, \quad (3)$$

де $W_{\max}$ – максимальний доступний водний ресурс (м³).

Оцінка еколого-економічних ефектів меліорації формується через визначення величини потенційних збитків, спричинених надмірним втручанням у природні гідрологічні системи, що описується формулою приросту збитків:

$$D = k_1 S_s + k_2 A_c + k_3 L_b, \quad (4)$$

де S_s – площа вторинного засолення (га);

A_c – площа еродованих ґрунтів (га);

L_b – довжина порушених біокоридорів (км);
 k_1, k_2, k_3 – оцінні коефіцієнти екосистемних втрат.

У координатах адаптивного управління меліорованими агроландшафтами застосовують імітаційні та балансові моделі, які дозволяють оцінити зміну водного балансу залежно від структури посівів, кліматичних параметрів та ступеня дренажності території. Баланс води в агроландшафті подаємо у вигляді формули:

$$B_w = P + I - E - D - R, \quad (5)$$

де P – опади (мм);

I – обсяг зрошення (мм);

E – сумарне випаровування ($\text{м}^3/\text{га}$);

D – дренажні втрати ($\text{м}^3/\text{га}$);

R – поверхневий стік ($\text{м}^3/\text{га}$).

Для практичного впровадження моделей адаптивного управління меліорацією доцільно застосовувати спеціальні матриці рішень, які дозволяють зіставити різні режими водорозподілу, їх потенційні ризики та очікувані екологічні ефекти (табл. 2).

Таблиця 2 – Матриця адаптивних рішень для оптимізації меліорації в умовах водного дефіциту

№	Режим меліорації	Екологічний ефект	Економічна ефективність	Ризики деградації	Оптимальний сезон застосування	Рекомендації
1	Нормований полив	Покращення біоти	Середня	Низький	Весна	Контроль нітратів
2	Регульований дренаж	Стабілізація вологи	Середня	Середній	Літо	Сенсори вологості
3	Краплинне зрошення	Зменшення засолення	Висока	Низький	Літо	Малі норми подачі
4	Осушення вибіркове	Зменшення заболочення	Середня	Високий	Осінь	Локальні канали
5	Комбіноване зрошення	Підвищення продуктивності	Висока	Середній	Весна–літо	Погодні моделі
6	Зрошення за графіком ET	Збалансований водний режим	Висока	Низький	Літо	Супутникові дані
7	Лісомеліоративні бар'єри	Поліпшення мікроклімату	Середня	Низький	Цілий рік	Підбір деревних видів

Джерело: сформовано на основі [3; 13; 15].

Застосування окреслених моделей забезпечує виконання багатокритеріальної оцінки, яка враховує не лише потенціал урожайності, але й здатність агроландшафту зберігати структурну різноманітність, біогеохімічні потоки й водний баланс, що в довгостроковій перспективі визначає рівень екологічної стійкості та продуктивності. Головним елементом є використання адаптивних моделей, які будуть здатні перебудовувати параметри залежно від наявності води, кліматичних меж та технічних можливостей меліоративної інфраструктури, що дозволяє уникнути надмірного втручання у природні екосистеми. Застосування просторового аналізу, зокрема картування фрагментації ландшафту та побудови карт ризику вторинного засолення або деградації ґрунтів, синхронізує математичні моделі з реальними даними, що виводить управління меліорацією на рівень точного екологічно орієнтованого планування [15]. Просторові моделі будуть працювати разом з методами машинного навчання, які прогнозують реакцію агроландшафту на зміну рівня зрошення або глибини дренажу, що підвищує точність управлінських рішень і зменшує невизначеність.

Концептуальна схема екологічно оптимізованої меліоративної системи формується як багаторівнева модель просторової диференціації меліоративних заходів залежно від природної стійкості окремих частин агроландшафту, їхньої екологічної вразливості та функціональної ролі у формуванні біогеохімічних потоків, причому ключовим інструментом стає виділення зон інтенсивної, помірної та екологічної меліорації, які відрізняються режимом водокористування, гідрологічними навантаженнями, структурою рослинного покриву та рівнем допустимого антропогенного втручання. Інтенсивна меліорація є доцільною тільки при стабільних ґрунтах із високим потенціалом відновлення та сприятливим геоморфологічним профілем, тоді як помірна меліорація орієнтована на ділянки, де потрібне збалансоване регулювання водного режиму без суттєвого втручання у природні гідрологічні цикли, а екологічна меліорація призначена для ландшафтних фрагментів, що виконують роль екологічних коридорів, меліоративно чутливих водно-болотних комплексів і охоронних буферів між агровиробничими масивами [16].

Формування зонального підходу ґрунтується на принципі оптимального співвідношення продуктивності та екологічної стійкості, який можна представити у вигляді функції компромісу між урожайністю та екологічними показниками, що визначають довготривалу стабільність агроландшафту, причому важливу роль відіграє узгодження меліоративного навантаження з природною здатністю біотичних комплексів до саморегуляції. Для забезпечення балансування цих параметрів застосовується модель порівняльної оцінки:

$$E_{opt} = \frac{P_{agr}}{1 + \lambda D_{eco}} \quad (6)$$

де E_{opt} – показник екологічно оптимізованої продуктивності (т/га);

P_{agr} – потенційна продуктивність меліорованої площі (т/га);

D_{eco} – індекс екологічного навантаження;

λ – коефіцієнт екологічної чутливості території.

Зростання D_{eco} зумовлює пропорційне зниження результативності меліоративних заходів, що відображає реальну взаємозалежність між інтенсивністю водорегулювання та станом біоти. Для практичної ілюстрації можна розглянути умовний приклад: за потенційної продуктивності 7,2 т/га та індексу екологічного навантаження 0,8 при чутливості $\lambda=1,3$ отримаємо:

$$E_{opt} = \frac{7,2}{1 + 1,3 \cdot 0,8} = 3,53 \text{ т / га},$$

що демонструє, як неврахування екологічних параметрів може вдвічі зменшити реальний ефект меліорації.

Таблиця 3 – Функціональна класифікація зон меліорації в екологічно оптимізованій системі

№	Тип зони	Основна функція	Допустимий водний режим	Обмеження втручання	Типові біотопи	Рекомендовані заходи
1	2	3	4	5	6	7
1	Інтенсивна	Максимізація продуктивності	Високі норми поливу	Середні	Орні землі	Оптимізоване зрошення
2	Помірна	Стабілізація водного режиму	Середні норми	Середні	Лугопасторальні угіддя	Регульований дренаж
3	Екологічна	Збереження біорізноманіття	Мінімальне втручання	Високі	Водно-болотні угіддя	Ренатуралізація
4	Прибережна	Охорона водотоків	Збалансований режим	Високі	Заплавні екосистеми	Буферні смуги

Закінчення табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
5	Перехідна	Зниження фрагментації	Низькі норми	Середні	Мозаїчні ландшафти	Агролісосмуги
6	Ерозійно небезпечна	Запобігання деградації	Обмежене зрошення	Високі	Схили	Контурно-лісова меліорація
7	Ресурсно обмежена	Рациональне використання води	Мінімальні норми	Середні	Території дефіциту води	Краплинне зрошення

Джерело: сформовано авторами.

Інтеграція меліоративних та природоохоронних заходів передбачає не механічне поєднання двох систем управління, а побудову нової логіки функціонування агроландшафтів, у якій меліорація набуває екологічно орієнтованого характеру та сприяє відновленню природних середовищ, а не виключно підвищенню аграрної продуктивності. Буферні захисні смуги, наприклад, не тільки перехоплюють поверхневий стік, запобігаючи надходженню агрохімікатів у водотоки, але й формують мікрокліматичний градієнт, що підвищує різноманіття рослинності та слугує місцем гніздування ентомофауни-запилювачів, які відіграють критичну роль у стабільності екосистемних функцій. Розрахунки показують, що 20-м буферна смуга може скоротити кількість частинок ґрунтової ерозії в поверхневому змиві на 45-65%, а концентрація нітратів у дренажній воді за наявності багаторівневої буферної системи знижується в середньому до 34 %.

Лісомеліорація, у свою чергу, забезпечить потужний довготривалий ефект стабілізації водного балансу, оскільки деревна рослинність регулює випаровування, впливає на структуру ґрунту й сприяє формуванню органічної маси, що покращує водоутримувальну здатність [17]. Для оцінки впливу агролісосмуг застосуємо модель зменшення швидкості вітру за висотою смуги:

$$V_d = V_0(1 - \mu h), \quad (7)$$

де V_d – швидкість вітру за агролісосмугою (м/с);

V_0 – початкова швидкість (м/с);

h – висота лісосмуги (м);

μ – емпіричний коефіцієнт захисної дії (0.04–0.07).

Наприклад, при висоті смуги 12 м та $\mu=0,06$, початкова швидкість 8 м/с зменшується до:

$$V_d = 8(1 - 0,06 \cdot 12) = 8 \cdot (1 - 0,72) = 2,24 \text{ м/с}.$$

Це буде означати зниження дефляційних втрат ґрунту на понад 70 %, а це прямо впливає на біорізноманіття ґрунтових комах, мезофауни та рослин.

Ренатуралізація водно-болотних угідь являє собою найпотужніший інструмент екологічного відновлення, оскільки такі угіддя є центрами біорізноманіття, регуляторами паводкового стоку та природними біофільтрами. Відновлення навіть невеликої ділянки площею 5-7 га збільшує видовий склад водно-болотної фауни на 20-40%, а вміст органічної речовини у верхньому горизонті ґрунту – на 8-12 % протягом п'яти років.

Таблиця 4 – Інтегративні природоохоронні заходи та їхні меліоративні ефекти

№	Захід	Основний ефект	Вторинні вигоди	Екологічна доцільність	Просторовий масштаб	Типові результати
1	2	3	4	5	6	7
1	Буферні смуги	Зменшення забруднення	Підтримка запилювачів	Висока	Лінійні ділянки	–40 % NO_3 у стоку
2	Агролісосмуги	Зменшення дефляції	Збагачення органіки	Висока	Поля і межі	–70 % вітрової ерозії

Закінчення табл. 4

1	2	3	4	5	6	7
3	Ренатуралізація боліт	Підвищення біорізноманіття	Паводкове регулювання	Дуже висока	Локально-регіональний	+35 % видів
4	Охоронні заплави	Збереження водотоків	Стабілізація вологи	Висока	Прибережні зони	Скорочення змиву на 50 %
5	Мозаїчні екотони	Збільшення різноманітності	Покращення міграції	Середня	Ландшафтна мозаїка	+15 % фітодидерситету
6	Багаторічні травостої	Захист від ерозії	Покращення структури ґрунту	Середня	Схили	Зниження втрат ґрунту на 38 %
7	Регульовані ставки	Регуляція стоку	Аквакультурний потенціал	Середня	Зрошувальні системи	Підвищення водозбереження на 20 %

Джерело: сформовано авторами.

Управлінські та економічні інструменти оптимізації меліоративних систем забезпечують формування нового типу господарювання, у якому прийняття рішень ґрунтується не лише на короткострокових виробничих вигодах, але й на довгострокових екосистемних результатах, що визначають стійкість усієї агросфери. Екологічні стандарти й ліміти на водокористування формують нижню межу втручання у природні гідрологічні потоки, обмежуючи використання води до рівнів, які не перевищують поновлюваних запасів та не спричиняють деградацію водно-болотних чи заплавлених екосистем. Так, для регіонів України з водним дефіцитом оптимальні ліміти становлять 280...350 мм/рік доступної для зрошення води, що унеможливить різке сезонне падіння рівня ґрунтових вод, а в системах інтенсивного землеробства діє рекомендація не перевищувати 60...70 % технічно доступної вологості ґрунту [5].

Агроекологічні стимули для фермерів включають компенсаційні виплати за використання екологічно дружніх меліоративних технологій, субсидії на лісомеліорацію та агролісосмуги, підтримку органічного землеробства й фінансування заходів з ренатуралізації. Прикладні розрахунки демонструють, що інвестиція у створення агролісосмуги окупається протягом 4-6 років за рахунок зростання урожайності на 8...14 %, покращення структури ґрунту та зменшення втрат води через випаровування. Моніторинг екосистемних послуг у системах оптимізованої меліорації проводять за допомогою супутникового аналізу NDVI, оцінки водного балансу, біоіндикаторів рослинності, аналізу якості води та ґрунту, що дозволяє отримувати регулярні дані для адаптивного управління (табл. 5).

Таблиця 5 – Управлінські та економічні інструменти екологічно оптимізованої меліорації

№	Інструмент	Механізм дії	Екологічний ефект	Економічний ефект	Спосіб реалізації	Очікуваний результат
1	Водні ліміти	Обмеження забору води	Зниження деградації	Стабільність урожаю	Регулювання норм	Баланс водного режиму
2	Еко-субсидії	Фінансова підтримка	Відновлення біоти	Зниження витрат	Державні програми	Зростання екостійкості
3	Платежі за екосистемні послуги	Компенсація землевласникам	Підтримка природних угідь	Диверсифікація доходів	Контракти	Збільшення природних площ
4	Моніторинг NDVI	Супутниковий контроль	Оцінка стану рослинності	Оптимізація виробництва	ГІС-системи	Точне управління
5	Ліцензування меліорації	Регуляторний контроль	Захист водних ресурсів	Зменшення ризиків	Дозвільні процедури	Підвищення стандартів
6	Аудит ґрунту	Регулярний аналіз	Покращення родючості	Зростання врожайності	Агрономічний моніторинг	Підтримка оптимальних показників
7	Інвестиційні гранти	Фінансування модернізації	Зменшення впливу меліорації	Підвищення ефективності	Конкурсний розподіл	Інноваційні системи

Джерело: сформовано авторами.

Сукупність наведених компонентів забезпечить модульну модель екологічно оптимізованої меліоративної системи, що функціонуватиме як адаптивний механізм управління територіями. В ній кожен компонент, від гідрологічного балансу до біорізноманіття, взаємодіє в межах єдиного просторово-функціонального контуру, що забезпечує синергію відновлювальних і продуктивних процесів.

Висновки. Розроблено методичний підхід проведення екологічної оптимізації меліоративних систем, який демонструє, що стабільність агроландшафтів залежить передусім від узгодженості водорегулювання з ландшафтною організацією території, її природною гетерогенністю та реактивністю ґрунтово-гідрологічних і біотичних складових, а не від інтенсивності меліоративних впливів як таких. Аргументовано, що синтез структурних, композиційних і функціональних маркерів біорізноманіття з параметрами стану: ґрунтового середовища, водного балансу й фітоценозів у формі уніфікованого інтегрального індексу екологічної стійкості та матриці агрегованих індикаторів забезпечує якісний перехід у діагностиці наслідків меліоративних втручань. Це уможливило виявлення латентних деградаційних процесів і встановлення науково обґрунтованих критичних меж антропогенного навантаження.

Встановлено, що залучення математичного апарату оптимізації водорозподілу в умовах дефіциту ресурсів, еколого-економічного оцінювання збитків та балансових описів водного режиму в синтезі з імітаційним моделюванням уможливило формування адаптивних меліоративних режимів, які паралельно мінімізують деградаційні явища та гарантують стабільність урожайності. Запропоновані методи конструювання інтегральних цільових функцій і систем обмежень, сенситивних до індикаторів засолення, ерозійної загрози та порушення біокоридорів, засвідчили спроможність кількісної оцінки компромісів між економічною ефективністю та екологічною резильєнтністю агроландшафтів. Показано, що інкорпорація просторового аналізу до цих моделей, зокрема карт фрагментації ландшафту, зон ризику вторинного засолення й сценаріїв трансформації водного балансу, створює інструментарій прецизійного планування меліоративних інтервенцій і редукує невизначеність управлінських рішень, підвищуючи адаптивність та наукову валідність системи управління за різних кліматичних траєкторій.

Сконструйована модель екологічно оптимізованої меліоративної системи, що інтегрує зональний підхід до диференціації інтенсивної, помірної та екологічної меліорації з інкорпорацією буферних зон, агролісомеліоративних елементів, ренатуралізованих водно-болотних екосистем та комплексу управлінських і економічних механізмів, виявила здатність забезпечувати збалансований консенсус між продуктивністю аграрного виробництва та збереженням біологічного різноманіття. Продемонстровано, що впровадження водних лімітів, екологічних субсидій, компенсацій за екосистемні сервіси, систематичного моніторингу NDVI та періодичного аудиту ґрунтового покриття формує інституційну архітектуру, в межах якої меліорація трансформується з джерела екологічних загроз у каталізатор підвищення ландшафтної резильєнтності.

Список використаних джерел

1. Балюк, С. А., Воротинцева, Л. І., Соловей, В. Б., & Шимель, В. В. (2023). Реалії українського чорнозему: сучасний стан, еволюція, охорона та стале управління. *Вісник аграрної науки*, (3), 5–13. <https://doi.org/10.31073/agrovissnyk202303-01>.
2. Бондарчук, С. П., Бондарчук, Л. Ф., Федонюк, В. В., & Іванців, В. В. (2021). Агроекологічна оцінка можливості ренатуралізації меліорованих земель як наряду вирішення регіональних екологічних проблем Північно-Західного Полісся. *Грааль науки*, (1), 171–175. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.19.02.2021.032>.
3. Балюк, С. А., Кучер, А. В., & Ромащенко, М. І. (Ред.). (2024). *Ґрунтовий покрив України в умовах воєнних дій: стан, виклики, заходи з відновлення* (Монографія). Аграрна наука.

4. Дяченко, М. І., & Жмуденко, В. О. (2025). Управлінські виклики та стратегічні напрями реформування лісового сектору України в умовах війни. *Економічний простір*, (202), 72–77. <https://doi.org/10.30838/EP.202.72-77>.
5. Ісаченко, С. О., Морозов, О. В., & Морозов, В. В. (2019). Комплексна оцінка еколого-агромеліоративного стану земель за різних систем обробітку ґрунту. *Таврійський науковий вісник*, (106), 220–229. https://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/106_2019/34.pdf.
6. Ковальов, М. М., Медведєва, О. В., & Мірзак, Т. П. (2023). Агроекологічна трансформація гумусного стану чорнозему типового Бугсько-Дніпровського міжріччя. *Таврійський науковий вісник*, (133), 345–352. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.133.46>.
7. НЗК-БРДО. (2024). *Зрошення і дренаж: Методичні рекомендації*. <https://brdo.com.ua/wp-content/uploads/2024/06/11-ZK-Zroshennya-i-drenazh.pdf>.
8. Реформа системи збереження біорізноманіття: Україна на шляху до ЄС. (2025). *Аналітичний документ*. <https://epl.org.ua/wp-content/uploads/2025/04/Reforma-systemy-zberezhennya-bioriznomanittya-Ukrayina-na-shlyahu-do-YES.pdf>.
9. Boinot, S., Barkaoui, K., Mézière, D., Lauri, P.-E., Sarthou, J.-P., & Alignier, A. (2022). Research on agroforestry systems and biodiversity conservation: What can we conclude so far and what should we improve? *BMC Ecology and Evolution*, 22, Article 24, 1–6. <https://doi.org/10.1186/s12862-022-01977-z>.
10. Державне агентство лісових ресурсів України. (n.d.). Офіційний сайт. <https://forest.gov.ua>.
11. Shevchuk, S., Gapon, S., Chuvpylo, V., Nahorna, S., & Kuryshko, R. (2024). The use of GIS for ecological and landscape land management of human settlements. *AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research*, 14(1), 200–203. <https://doi.org/10.33543/140139200203>.
12. Makedon, V., Mykhailenko, O., & Krasnikov, P. (2023). Управління розробкою та реалізацією національних і міжнародних проєктів у сфері відновлювальної енергетики. *Підприємництво та інновації*, (26), 5–13. <https://doi.org/10.32782/2415-3583/26.1>.
13. Alix, A., Bylemans, D., Dauber, J., Dohmen, P., Knauer, K., Maltby, L., Mayer, C. J., Pepiette, Z., & Smith, B. (Eds.). (2022). *Optimising agricultural food production and biodiversity in European landscapes: Report of an online workshop* (Thünen Report No. 98). Johann Heinrich von Thünen Institute. https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen_Report_98.pdf.
14. Степаненко, Т. О. (2025). Еколого-економічні аспекти землекористування в умовах воєнного стану. *Economics: Time Realities*, (3), 132–139. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15750487>.
15. ФОРЗА. (n.d.). *Наближене до природи лісівництво в Українських Карпатах*. <https://forza.org.ua/uk/nablizhene-do-prirodi-lisivnictvo-v-ukrayinskih-karpatah>.
16. Makedon, V., Myachin, V., Plakhotnik, O., Fisunen, N., & Mykhailenko, O. (2024). Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(13(128)), 47–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.
17. García-Vega, D., Dumas, P., Prudhomme, R., Kremen, C., & Aubert, P.-M. (2024). A safe agricultural space for biodiversity. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, Article 1328800, 1–19. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1328800>.

References

1. Baliuk, S. A., Vorotyntseva, L. I., Solovei, V. B., & Shymel, V. V. (2023). Realii ukrainskoho chornozemu: suchasnyi stan, evoliutsiia, okhorona ta stale upravlinnia [Realities of Ukrainian chernozem: current state, evolution, protection and sustainable management]. *Visnyk ahrarnoi nauky – Bulletin of agrarian sciences*, 3, 5–13. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202303-01>.
2. Bondarchuk, S. P., Bondarchuk, L. F., Fedoniuk, V. V., & Ivantsiv, V. V. (2021). Ahroekolohichna otsinka mozhlyvosti renaturalizatsii meliorovanykh zemel yak napriam vyrishennia rehionalnykh ekolohichnykh problem Pivnichno-Zakhidnoho Polissia [Agroecological assessment of the possibility of renaturalizing reclaimed lands as a way to solve regional environmental problems of Northwestern Polissia]. *Hraal nauky - Grail of science*, 1, 171–175. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.19.02.2021.032>.
3. Baliuk, S. A., Kucher, A. V., & Romashchenko, M. I. (Eds.). (2024). Gruntovyi pokryv Ukrainy v umovakh voiennykh dii: stan, vyklyky, zakhody z vidnovlennia [Soil cover of Ukraine under wartime conditions: state, challenges and restoration measures]. *Ahrarna nauka – Agrarian Science*.

4. Diachenko, M. I., & Zhmudenko, V. O. (2025). Upravlinski vyklyky ta stratehichni napriamy reformuvannya lisovoho sektoru Ukrainy v umovakh viiny [Managerial challenges and strategic directions of reforming Ukraine's forestry sector under wartime conditions]. *Ekonomichnyi prostir – Economic space*, 202, 72–77. <https://doi.org/10.30838/EP.202.72-77>.
5. Isachenko, S. O., Morozov, O. V., & Morozov, V. V. (2019). Kompleksna otsinka ekoloho-ahromelioratyvnoho stanu zemel za riznykh system obrobittu gruntu [Comprehensive assessment of ecological and agroameliorative state of lands under different tillage systems]. *Tavriiskiyi naukovyi visnyk – Tavriia Scientific Bulletin*, 106, 220–229. https://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/106_2019/34.pdf.
6. Kovalov, M. M., Medvedieva, O. V., & Mirzak, T. P. (2023). Ahroekolohichna transformatsiia humusnoho stanu chornozemu typovoho Buhsko-Dniprovskoho mizhrichchia [Agroecological transformation of the humus state of typical chernozem of the Bug–Dnipro interfluve]. *Tavriiskiyi naukovyi visnyk – Tavriia Scientific Bulletin*, 133, 345–352. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.133.46>.
7. NZK–BRDO. (2024). Zroshennia i drenazh: Metodychni rekomendatsii [Irrigation and drainage: methodological guidelines]. <https://brdo.com.ua/wp-content/uploads/2024/06/11-ZK-Zroshennya-i-drenazh.pdf>.
8. *Reforma systemy zberezhennia bioriznomanittia: Ukraina na shliakhu do YeS* [Reform of the biodiversity conservation system: Ukraine on the path to the EU]. (2025). <https://epl.org.ua/wp-content/uploads/2025/04/Reforma-systemy-zberezhennya-bioriznomanittya-Ukrayina-na-shlyahu-do-YES.pdf>.
9. Boinot, S., Barkaoui, K., Mézière, D., Lauri, P.-E., Sarthou, J.-P., & Alignier, A. (2022). Research on agroforestry systems and biodiversity conservation: what can we conclude so far and what should we improve? *BMC Ecology and Evolution*, 22, 24, 1–6. <https://doi.org/10.1186/s12862-022-01977-z>.
10. *Derzhavne ahentstvo lisovykh resursiv Ukrainy*. (2024). [State Agency of Forestry Resources] Ofitsiyniyi sait [Official website]. <https://forest.gov.ua>.
11. Shevchuk, S., Gapon, S., Chuvpylo, V., Nahorna, S., & Kuryshko, R. (2024). The use of GIS for ecological and landscape land management of human settlements. *AD ALTA Journal of Interdisciplinary Research*, 14(1), 200–203. <https://doi.org/10.33543/140139200203>.
12. Makedon, V., Mykhailenko, O., & Krasnikov, P. (2023). Upravlinnia rozrobkoiu ta realizatsi-ieiu natsionalnykh i mizhnarodnykh proektiv u sferi vidnovliuvanoi enerhetyky [Management of development and implementation of national and international renewable energy projects]. *Pidpriemnytstvo ta innovatsii – Entrepreneurship and innovation*, 26, 5–13. <https://doi.org/10.32782/2415-3583/26.1>.
13. Alix, A., Bylemans, D., Dauber, J., Dohmen, P., Knauer, K., Maltby, L., Mayer, C. J., Pepiette, Z., & Smith, B. (Eds.). (2022). Optimising agricultural food production and biodiversity in European landscapes: Report of an online-workshop. *Thünen Report* 98. https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen_Report_98.pdf.
14. Stepanenko, T. O. (2025). Ekoloho-ekonomichni aspekty zemlekorystuvannya v umovakh voiennoho stanu [Ecological and economic aspects of land use under martial law]. *Economics: time realities*, 3(79), 132–139. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15750487>.
15. FORZA. (2024). Nablyzhene do pryrody lisivnytstvo v Ukrainskykh Karpatakh [Close-to-nature forestry in the Ukrainian Carpathians]. <https://forza.org.ua/uk/nablizhene-do-prirodi-lisivnictvo-v-ukrayinskih-karpatah>.
16. Makedon, V., Myachin, V., Plakhotnik, O., Fisunenko, N., & Mykhailenko, O. (2024). Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(13(128)), 47–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.
17. García-Vega, D., Dumas, P., Prudhomme, R., Kremen, C., & Aubert, P.-M. (2024). A safe agricultural space for biodiversity. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1328800, 1–19. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1328800>.

Дата першого надходження статті до видання: 26.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.12.2025

Mykola Serbov¹, Alla Tolmachova², Viktor Pylypyuk³

¹Doctor of Economic Sciences, Professor Dean of the Faculty of Hydrometeorology and Ecology
Odesa I.I. Mechnikov National University (Odesa, Ukraine)

E-mail: serbovng@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0220-6745>

²Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Agrometeorology and Agroecology
Odesa I.I. Mechnikov National University (Odesa, Ukraine)

E-mail: agro@onu.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9340-5028>

³Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor
Associate Professor of the Department of Land Hydrology
Odesa I.I. Mechnikov National University (Odesa, Ukraine)

E-mail: gidro@onu.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0365-4275>

OPTIMIZATION OF ENVIRONMENTAL PARAMETERS OF LAND RECLAMATION SYSTEMS FOR THE PRESERVATION OF BIODIVERSITY IN AGRICULTURAL LANDSCAPES

The article substantiates a conceptual model for the ecological optimization of Ukraine's reclamation complexes, aimed at harmonizing agricultural productivity with the conservation of agro-landscape biodiversity in the context of climate transformation, water scarcity, and post-war reconstruction. The research methodology is based on a systemic landscape-ecological approach integrating the analysis of spatial organization of agro-landscapes, assessment of the sensitivity of biotic and abiotic components to anthropogenic hydrological impacts, and multi-criteria mathematical modelling of water-regulation processes. The study employs a comprehensive set of ecological stability indicators (structural, compositional, functional), an integral stability index, water-use balance and optimization models, as well as geoinformation technologies and matrices of adaptive management decisions. The results show that traditional intensive reclamation systems cause landscape fragmentation, secondary salinization, soil degradation, and a significant reduction of biodiversity. In contrast, the ecologically oriented model based on zonal differentiation of reclamation regimes (intensive, moderate, ecological zones) ensures the preservation of key elements of the ecological framework of agro-landscapes. An integral ecological stability index and a set of mathematical models are proposed to quantitatively assess and minimize the negative consequences of reclamation activities. The practical significance of the research lies in the development of a scientifically grounded methodology for designing and modernizing reclamation systems suitable for implementation in post-war recovery projects and for the adaptation of Ukraine's agricultural sector. Prospects for further research relate to testing the proposed model in pilot regions across different natural zones of Ukraine and developing digital platforms for adaptive reclamation management based on machine-learning technologies and satellite monitoring. Further in-depth investigation is also required to assess the long-term cumulative effects of ecologically optimized reclamation on trophic networks and ecosystem services of agro-landscapes.

Keywords: reclamation systems, ecological optimization, biodiversity, agro-landscape, adaptive management, water regime, landscape-ecological approach, ecological stability.

Fig.: 6. Table 5. References: 17.

**Андрій Михайлович Бридун¹, Марія Володимирівна Чоботаєва²,
Андрій Романович Согор³, Наталія Петрівна Ярема⁴**

¹кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри вищої математики, Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: andrii.m.brydun@lpnu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5634-0512>

ResearcherID: [AAC-1271-2020](https://orcid.org/0000-0001-5634-0512), Scopus Author ID: [57212560353](https://orcid.org/0000-0001-5634-0512)

²студентка 2-го магістерського рівня вищої освіти Інституту геодезії
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: mariia.chobotaieva.mhdhm.2025@lpnu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1745-7180>

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри картографії та геопросторового моделювання
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: andrii.r.sohor@lpnu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0084-9552>

ResearcherID: [ABI-6288-2020](https://orcid.org/0000-0002-0084-9552), Scopus Author ID: [57224950613](https://orcid.org/0000-0002-0084-9552)

⁴кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри картографії та геопросторового моделювання
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: nataliia.p.yarema@lpnu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5796-2038>

Scopus Author ID: [57218923725](https://orcid.org/0000-0002-5796-2038)

ЗАСТОСУВАННЯ ГІС ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛІЗУ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ РІЧКИ ПІВДЕННИЙ БУГ У МЕЖАХ ХМЕЛЬНИЦЬКОЇ ТА ВІННИЦЬКОЇ ОБЛАСТЕЙ

Проблема забруднення річок є актуальною вже багато років, проте за останнє десятиліття наслідки стають все більш помітні, тому метою цієї наукової праці є висвітлення даної проблеми. Річка Південний Буг є важливою водною артерією Центральної України, що забезпечує водопостачання, гідроенергетику, рибацтво та рекреацію. Попри значну екологічну цінність, річка стикається з численними екологічними проблемами, пов'язаними з антропогенними навантаженнями та змінами клімату. Ця робота присвячена дослідженню екологічного стану річки Південний Буг на території Хмельницької та Вінницької областей з використанням картографічних методів. У роботі проаналізовано основні джерела забруднення річки, такі як промислові та сільськогосподарські стоки, урбанізація, неорганізоване сміттєзвалище, а також вплив зміни клімату на водний режим річки. Проведено комплексне оцінювання якості води на основі гідрохімічних, біологічних та радіологічних показників з акцентом на використання геоінформаційних систем (ГІС) для створення тематичних карт та аналізу екологічної ситуації. Картографічні методи дозволили візуалізувати просторовий розподіл забруднень, оцінити ступінь впливу різних факторів на екосистему річки та визначити найбільш проблемні ділянки.

Ключові слова: річка Південний Буг; екологічний стан; геоінформаційні технології; екологічний моніторинг; забруднення; антропогенні чинники; управління водними ресурсами.

Рис.: 4. Бібл.: 18.

Постановка проблеми. Екологічні проблеми водних ресурсів є одними з найбільш актуальних сьогодні, оскільки забруднення водних об'єктів негативно впливає на стан екосистем, здоров'я людини та економічну діяльність регіонів. Річка Південний Буг є однією з важливих водних артерій центральної України, яка протікає через кілька областей, зокрема Хмельницьку та Вінницьку. Вона забезпечує водою значну частину населення, а також має важливе значення для сільського господарства, промисловості та рекреаційних потреб. Однак діяльність людини, зокрема промислові викиди, сільське господарство та несанкціоновані скиди, спричиняють забруднення вод річки, що ставить під загрозу її екологічний стан.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Екологічний стан водних об'єктів може змінюватися під впливом природних та антропогенних факторів, і картографія є потужним інструментом для регулярного моніторингу цих змін. Даною проблематикою займалися [3; 4]. Створення тематичних карт на основі даних, зібраних протягом певного періоду, дозволяє оцінювати динаміку змін екологічного стану річок, водосховищ чи інших водних об'єктів. Це дозволяє вчасно виявити негативні тенденції, такі як зростання забруднення води або зниження чисельності водних видів, і вжити необхідних заходів для їх усунення. Таку проблему досліджували у працях [6; 7]. Картографічні

дані можуть використовуватися для прогнозування майбутніх змін в екологічному стані водних об'єктів, зокрема, для оцінки впливу різних факторів, таких як скиди забруднюючих речовин, зміни клімату або урбанізація. Цю проблематику вивчали дослідники [9; 10]. За допомогою карт можна моделювати різні сценарії розвитку подій і на основі отриманих результатів розробляти стратегії управління водними ресурсами. Наприклад, за допомогою карт можна визначити зони, де забруднення може збільшитись у разі посилення антропогенного навантаження, що дозволяє оперативно реагувати на потенційні загрози. Таку тематику вивчали дослідники [12; 14; 15]. Картографія є важливим інструментом для прийняття рішень в екологічному управлінні та плануванні. Створення екологічних карт допомагає органам влади, підприємствам та екологічним організаціям ухвалювати обґрунтовані рішення щодо використання водних ресурсів, регулювання забруднення, відновлення екосистем чи розвитку природоохоронних заходів. Наприклад, карти, що відображають ступінь забруднення води, можуть бути використані для розробки планів з очищення води чи для визначення пріоритетних ділянок для екологічного відновлення. Такі дослідження наведені в працях [3; 16; 17; 18].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Карти є важливим інструментом для підвищення обізнаності громадськості щодо екологічного стану водних об'єктів. Вони можуть бути використані для демонстрації впливу людської діяльності на навколишнє середовище, зокрема, для показу результатів забруднення річок та інших водних ресурсів [16; 17]. Це допомагає мобілізувати громаду, організації та місцеві органи влади для вжиття необхідних заходів і стимулює розвиток екологічної свідомості серед населення. Картографія в екологічних дослідженнях тісно інтегрується з іншими науковими методами, такими як аналіз хімічного складу води, біологічні дослідження, моніторинг флори та фауни водних екосистем. Завдяки геоінформаційним системам (ГІС) можна об'єднати різноманітні типи даних на одній карті, що дає змогу отримати комплексне уявлення про екологічний стан водних об'єктів [3; 18]. Це дозволяє розглядати екосистеми як цілісні системи, у яких кожен елемент має своє значення і взаємодіє з іншими компонентами. Наявність детальних карт екологічного стану водних об'єктів спрощує процес прийняття рішень на всіх рівнях управління. Вони можуть використовуватися як основа для розробки нормативних актів, що регулюють використання водних ресурсів, для організації робіт з очищення води, а також для планування розвитку інфраструктури в районах, що знаходяться поблизу водних ресурсів [1; 2; 5].

Мета статті. Метою даної роботи є розробка картографічної моделі екологічного стану річки Південний Буг в межах Хмельницької та Вінницької областей, а також оцінка рівня забруднення водних ресурсів та їхнього впливу на екосистему. Одним з основних етапів обробки даних було створення карт, які наочно відображають результати екологічного моніторингу. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити низку задач, а саме аналіз екологічного стану річки Південний Буг, розробка методики картографування екологічного стану річки Південний Буг, оцінка впливу антропогенних факторів на екологічний стан водних ресурсів. Ці задачі спрямовані на глибоке вивчення екологічного стану річки Південний Буг та на розробку детальних картографічних і аналітичних матеріалів, що можуть бути корисними для подальших досліджень і ухвалення управлінських рішень у галузі охорони водних ресурсів.

Виклад основного матеріалу. Картографування екологічного стану водних об'єктів є важливим інструментом для моніторингу та оцінки впливу антропогенних та природних факторів на водні ресурси. Воно дозволяє систематизувати інформацію, здійснювати порівняльний аналіз, а також надавати візуальну оцінку стану водних екосистем, що є важливим для розробки ефективних управлінських та екологічних заходів.

Картографування екологічного стану водних об'єктів – це процес створення карт, які відображають різні аспекти стану водних ресурсів, зокрема, якість води, рівень забруднення, біорізноманіття водних екосистем та інші екологічні характеристики. Воно сприяє виявленню проблемних ділянок, оцінці динаміки змін у часі та допомагає у плануванні заходів щодо охорони водних ресурсів.

Екологічний стан водного об'єкта зазвичай оцінюється за допомогою низки показників, зокрема (рис. 1):

- хімічних (концентрація забруднюючих речовин),
- фізичних (температура, прозорість води),
- біологічних (диверситет видів, стан водних організмів).



Рис. 1. Показники стану забруднення водних об'єктів

У межах дослідження картографування екологічного стану річки Південний Буг на прикладі Хмельницької та Вінницької областей важливими є ефективні методи збору та обробки інформації, які дозволяють отримати точні та актуальні дані про стан водних ресурсів. Розглянемо методи збору даних, а також методи їх обробки, що використовуються для картографування екологічного стану водних об'єктів. Інформацію про екологічний стан річки Південний Буг ми отримали завдяки використанню різних методів збору даних. Основні методи включають польові дослідження, аналіз вторинних джерел інформації та використання геоінформаційних систем (ГІС).

Польові дослідження є одним з основних методів збору первинної інформації про екологічний стан водних об'єктів. Цей метод дозволяє отримати дані безпосередньо на місці, що забезпечує високу точність та актуальність інформації. Для дослідження екологічного стану річки Південний Буг в межах Хмельницької та Вінницької областей передбачено проведення таких етапів:

- Збір проб води. Для оцінки якості води річки здійснюється збір проб води на визначених контрольних точках. Зразки води аналізуються на наявність фізико-хімічних характеристик (рН, температура, концентрація розчинених речовин, вміст забруднюючих компонентів, таких як нітрати, фосфати, важкі метали тощо).
- Біологічний моніторинг. Оцінка стану біорізноманіття водних організмів, таких як фітопланктон, зоопланктон, водорості та інші водні види. Це дозволяє визначити рівень забруднення води та ступінь її здатності підтримувати здорові екосистеми.

- Оцінка гідрологічних характеристик. Визначення рівня води, швидкості течії, глибини річки та інших фізичних параметрів, які можуть впливати на екологічний стан водного об'єкта.

- Інтерв'ювання місцевих жителів та користувачів водних ресурсів. Збір додаткової інформації від місцевих жителів та користувачів річки (фермери, промисловці, органи влади) щодо змін у водному режимі та екологічних проблемах.

Другим важливим методом збору інформації є використання вже наявних даних, що дозволяє оцінити екологічний стан річки в минулому та на даний час. До таких джерел належать:

- Офіційні звіти та документи. Дані про стан водних ресурсів на території Хмельницької та Вінницької областей ми отримали з офіційних звітів та досліджень, що публікуються органами екологічного контролю, такими як Міністерство екології та природних ресурсів України [1], управління водними ресурсами, екологічні інспекції тощо.

- Наукові праці та статті. Використання результатів попередніх досліджень річки Південний Буг та її екологічного стану, що публікуються у наукових журналах, статтях, монографіях.

- Спостереження та моніторинг. Використання результатів довгострокового моніторингу стану води, проведеного державними та приватними установами.

Третім потужним інструментом для збору, обробки та аналізу просторових даних, що дозволяє створювати карти екологічного стану річки Південний Буг, є ГІС. Основні етапи використання ГІС [2]:

- Збір просторових даних. Використання картографічних матеріалів, знімків супутників, аерофотознімків, а також даних від систем моніторингу забруднення для побудови базових карт.

- Інтеграція даних. Об'єднання різних типів даних (фізико-хімічні характеристики води, географічні дані, біологічні показники) на одній платформі для комплексного аналізу.

- Просторовий аналіз. Використання ГІС для визначення найбільш забруднених ділянок річки, оцінки змін в екологічному стані води та прогнозування майбутніх тенденцій.

Обробка зібраної інформації є важливим етапом, який включає в себе систематизацію, аналіз і побудову карт, що дозволяють наочно відобразити екологічний стан річки Південний Буг. Для оцінки екологічного стану води та виявлення закономірностей у забрудненні ми використали статистичний аналіз зібраних даних, який включав такі етапи:

- Оцінка середніх значень та відхилень для основних показників якості води (рН, вміст токсичних речовин тощо).

- Кореляційний аналіз для виявлення зв'язку між різними екологічними факторами, такими як рівень забруднення та біорізноманіття.

- Аналіз часу для порівняння зміни екологічного стану води на різних етапах дослідження.

Для формування картографічного матеріалу використовувались авторитетні джерела даних, зокрема офіційний сайт Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України – Екомоніторинг України [5], з цього сайту було взято інформацію про екологічний стан водойми, рівень забруднення річки Південний Буг та інші важливі параметри. Також було використано дані з сайту Водних інформаційних систем України (WISU) [1]. На рис. 2 зображено цифрову платформу, яка надає відкритий доступ до даних про водні ресурси України.



Рис. 2. Онлайн моніторинг та екологічна оцінка водних ресурсів України на сайті WISU

Візуальну геометрію русла річки отримано з відкритої картографічної платформи OpenStreetMap, яка слугувала основою для побудови векторного шару в ArcGIS Pro.

Для додаткової інформації щодо забруднень використовувалися європейські бази Data on Water Watch (DWW) у межах EIONET [8; 11; 13], що дозволили отримати дані згідно з міжнародними екологічними стандартами. Усі ці дані були ретельно проаналізовані, відфільтровані та приведені до спільного формату, зокрема у вигляді shapefile, geojson та CSV-таблиць, що дало змогу їх ефективно використовувати у ГІС-середовищі.

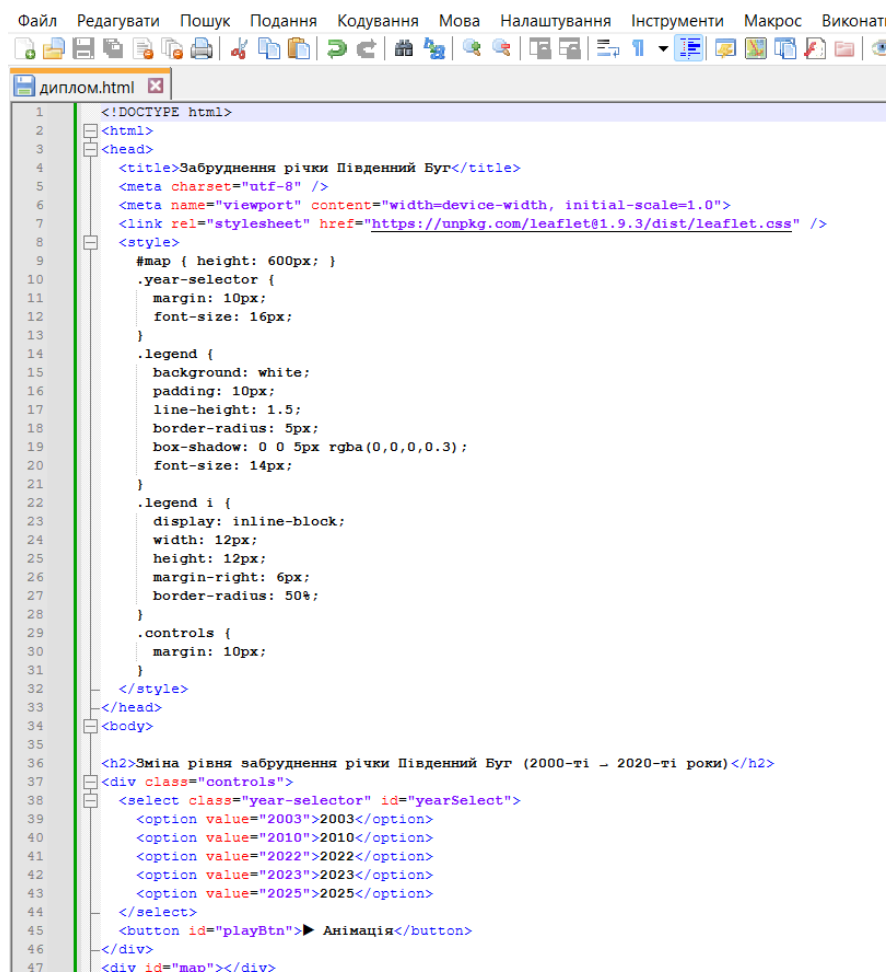
Інтерактивна вебкарта забруднення річки Південний Буг була розроблена з використанням програмного середовища «Notepad++» та «ArcGIS Pro». У контексті роботи Notepad++ використовувався для створення та редагування таблиць даних у форматі CSV, які містять інформацію про заміри якості води річки Південний Буг (наприклад, показники рівня забруднення, координати точок відбору проб). Ці дані були структуровані для подальшого імпорту в ArcGIS Pro.

У програмі ArcGIS Pro було створено векторний шар типу line та polyline, який відображає русло річки Південний Буг на ділянці Хмельницької та Вінницької областей. Процес оцифрування включав трасування русла за даними OpenStreetMap, уточнення геометрії за супутниковими знімками та офіційними картографічними ресурсами.

В атрибутивній таблиці кожного об'єкта було вказано адміністративну приналежність, координати початку та кінця лінії, протяжність, а також інші характеристики, які допомагають краще описати просторові властивості річки.

Для створення інтерактивної вебкарти забруднення річки Південний Буг дані спочатку були підготовлені в Notepad++ у форматі CSV, де вказувалися координати точок забруднення, показники вмісту забруднюючих речовин (наприклад, нітрати, фосфати, важкі метали) та дати вимірювань. Ці дані були імпортовані в ArcGIS Pro, де проведено їх просторовий аналіз та візуалізацію.

Також окремо було здійснено візуалізацію зон забруднення річки. За даними WISU, офіційного сайту Міністерства захисту довкілля та європейських баз DWW, було визначено моніторингові точки з перевищенням допустимих норм забруднення різними речовинами – азотом, фосфором, нафтопродуктами, важкими металами та іншими шкідливими компонентами. Ці ділянки позначено на карті як точкові об'єкти, які мають різне кольорове кодування залежно від типу забруднення, що дозволяє швидко ідентифікувати проблемні зони. Атрибутивна інформація містить дані про дату вимірювань, тип забруднення, концентрації та джерела забруднення, що додає глибини і контексту до створеної карти.



```

1  <!DOCTYPE html>
2  <html>
3  <head>
4    <title>Забруднення річки Південний Буг</title>
5    <meta charset="utf-8" />
6    <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
7    <link rel="stylesheet" href="https://unpkg.com/leaflet@1.9.3/dist/leaflet.css" />
8    <style>
9      #map { height: 600px; }
10     .year-selector {
11       margin: 10px;
12       font-size: 16px;
13     }
14     .legend {
15       background: white;
16       padding: 10px;
17       line-height: 1.5;
18       border-radius: 5px;
19       box-shadow: 0 0 5px rgba(0,0,0,0.3);
20       font-size: 14px;
21     }
22     .legend i {
23       display: inline-block;
24       width: 12px;
25       height: 12px;
26       margin-right: 6px;
27       border-radius: 50%;
28     }
29     .controls {
30       margin: 10px;
31     }
32   </style>
33 </head>
34 <body>
35
36   <h2>Зміна рівня забруднення річки Південний Буг (2000-ті – 2020-ті роки)</h2>
37   <div class="controls">
38     <select class="year-selector" id="yearSelect">
39       <option value="2003">2003</option>
40       <option value="2010">2010</option>
41       <option value="2022">2022</option>
42       <option value="2023">2023</option>
43       <option value="2025">2025</option>
44     </select>
45     <button id="playBtn">▶ Анімація</button>
46   </div>
47   <div id="map"></div>

```

Рис. 3. Кодування HTML-карти в середовищі Notepad++

Для відображення отриманих результатів роботи у зручному форматі було створено веб-карту у вигляді HTML-документа, редагованого у середовищі Notepad++. В HTML-коді реалізована базова структура вебсторінки з інтерактивними елементами, які дозволяють переглядати розташування забруднених ділянок, а також взаємодіяти з ними через вигулькові інформаційні вікна.

Для порівняння зростання або зменшення забруднень карту зроблено за різними роками, а саме, за 2003, 2010, 2022, 2023 та 2025 рр. Для візуального відображення маркерів використано стилі CSS та SVG-елементи. Такий підхід дозволив отримати легкий та доступний формат карти, який можна розміщувати на будь-якому вебресурсі без складної серверної інфраструктури, що значно полегшує доступ користувачів до екологічної інформації.

Результатом наших досліджень стала карта зміни рівня забруднення річки Південний Буг станом на 2003, 2010, 2022, 2023 та 2025 рр. (рис. 4).

Комплексна оцінка результатів досліджень. На основі багаторічних даних екологічного моніторингу та просторового аналізу в межах Хмельницької та Вінницької областей встановлено, що річка Південний Буг зазнає суттєвого антропогенного навантаження. Результати картографування засвідчили зростання концентрацій основних забруднювачів (нітрати, фосфати, важкі метали, нафтопродукти) в ряді локацій, зокрема поблизу населених пунктів, промислових об'єктів та в зоні інтенсивного сільськогосподарського землекористування.

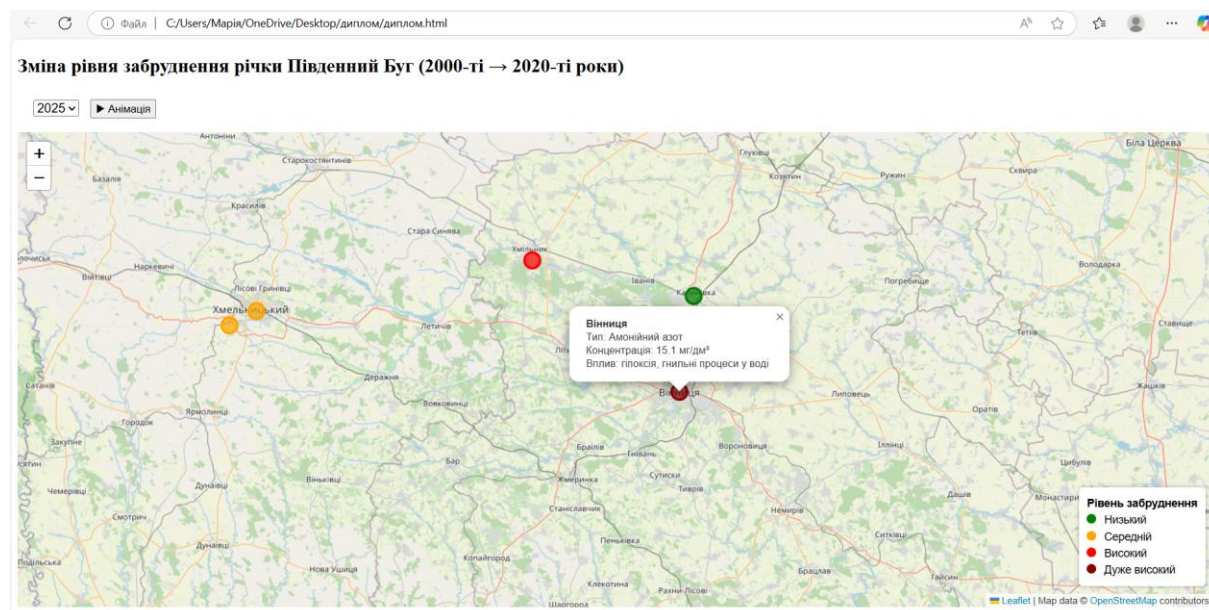


Рис. 4. Leaflet-карта забруднення річки Південний Буг за 2000-2020 роки

Аналіз даних за період 2003–2025 років демонструє тривожну тенденцію: попри окремі епізоди покращення якості води, загальний рівень забруднення залишається стабільно високим. Найпроблемнішими виявлено ділянки поблизу міст Хмельницький, Летичів, Вінниця та Ладижин, де водні ресурси забруднюються переважно органічними речовинами, сполуками азоту та важкими металами. Гідрологічні параметри свідчать про часткову деградацію річкової екосистеми: у ряді випадків зафіксовано зниження прозорості води, сповільнення течії та поява локальних зон застою. Біологічний моніторинг підтвердив зменшення видового різноманіття в таких групах, як фітопланктон та зоопланктон.

Використання геоінформаційних технологій дозволило провести просторову інтерполяцію результатів та побудувати багаторівневу модель оцінки екологічного стану річки. Це забезпечило комплексний підхід до аналізу якості води та її змін у часі, а також підвищило точність і наочність результатів.

Висновки і пропозиції. Результати дослідження відкривають ряд практичних і наукових перспектив:

- Запропонована модель картографування може бути адаптована для щорічного оновлення даних та автоматизованого виявлення змін екологічного стану.
- Створена веб-карта може бути використана місцевими органами влади, екоінспекціями та управліннями водного господарства для прийняття рішень щодо екологічного нагляду, зонування, планування очисних заходів тощо.
- Розроблена методика збору, обробки та візуалізації даних має універсальний характер і може бути використана для інших річкових басейнів України.
- Інтерактивна карта може бути інтегрована у просвітницькі кампанії та освітні програми, сприяючи зростанню громадської участі у збереженні водних ресурсів.
- Оцінка екологічного стану річки Південний Буг може стати основою для міждисциплінарних досліджень у сфері кліматології, гідрології, урбаністики та геоінформатики.

Таким чином, проведення дослідження не лише фіксує поточний стан водної екосистеми, але й створює підґрунтя для сталого управління природними ресурсами та формування екологічно орієнтованої політики на локальному та регіональному рівнях.

Список використаних джерел

1. Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру (2017). *Методичні рекомендації щодо картографування екологічного стану водних об'єктів*.

2. Міністерство екології та природних ресурсів України (2020). *Національна програма моніторингу водних ресурсів України*.
3. Согор, А. Р., Голубінка, Ю. І., Шаповал, В. В., Согор, М. А. (2020). Інтерактивна карта забруднення поверхневих вод Львівщини. *Молодий вчений*, 2(78), 193–199. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-2-78-44>.
4. Согор А.Р., Зазуляк П.М. (2022). Картографування екологічного забруднення повітря міста Львів. *Космічна наука і технологія*, 28(3), 86–91.
5. Управління водними ресурсами Хмельницької області (2020). *Звіт про стан водних ресурсів Хмельницької області*.
6. Bijeesh, T.V., Narasimhamurthy, K.N. (2020). Surface water detection and delineation using remote sensing images: a review of methods and algorithms Sustain. *Water Resour. Manag*, 6(68). <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00425-4>.
7. Bilgin, A. (2018). Evaluation of surface water quality by using the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) method and discriminant analysis method: A case study of the Coruh River Basin. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 554. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6927-5>.
8. Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine. (2015). *Ecosystem-based management of South Bug River Basin: South Bug River Basin management plan* (2nd ed.).
9. Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>.
10. Frappart, F., Papa, F., Famiglietti, J. S., Prigent, C., Rossow, W. B., & Seyler, F. (2008). Interannual variations of river water storage from a multiple satellite approach: A case study of the Rio Negro River basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113, D21104. <https://doi.org/10.1029/2007JD009438>.
11. *Global water quality monitoring and assessment techniques*. (2018). *Journal of Environmental Studies*, 11(4), 82–94.
12. Chen, K., Chen, H., Zhou, C., Huang, Y., Qi, X., Shen, R., Liu, F., Zuo, M., Zou, X., Wang, J., Zhang, Y., Chen, D., Chen, X., Deng, Y., & Ren, H. (2020). Comparative analysis of surface water quality prediction performance and identification of key water parameters using different machine learning models based on big data. *Water Research*, 171, 115454. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115454>
13. United Nations Development Programme. (2016). *Monitoring and protection of water resources in the South Bug Basin: Final report* (UNDP/GEF South Bug Project). UNDP Ukraine.
14. Pan, F., Wang, C., & Xi, X. (2016). Constructing river stage–discharge rating curves using remotely sensed river cross-sectional inundation areas and river bathymetry. *Journal of Hydrology*, 540, 670–687. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.048>.
15. Schwatke, C., Scherer, D., & Dettmering, D. (2019). Automated extraction of consistent time-variable water surfaces of lakes and reservoirs based on Landsat and Sentinel-2. *Remote Sensing*, 11(9), 1010. <https://doi.org/10.3390/rs11091010>.
16. Sohor, A., Brydun, A., Fys, M., Yarema, N., & Trefler, A. (2021). Web mapping of surface water quality in Lviv. In *GeoTerrace-2021: International scientific and technical conference of young professionals* (October 4–6, 2021, Lviv, Ukraine).
17. Sohor, A., Brydun, A., Yarema, N., Lozynskyi, V., & Sohor, M. (2020). Interactive map of environmental pollution of the surface waters in Lviv region. In *GeoTerrace-2020: International scientific and technical conference of young professionals* (December 7–9, 2020, Lviv, Ukraine).
18. Sohor, A., & Sohor, M. (2020). Web-mapping of environmental pollution of surface waters. *Молодий вчений*, (3), 199–204.

References

1. Derzhavna sluzhba Ukrainy z pytan heodezii, kartohrafii ta kadastru [State Service of Ukraine for Geodesy, Cartography and Cadastre]. (2017). *Metodychni rekomendatsii shchodo kartohrafovannia ekolohichnoho stanu vodnykh ob'ektiv – Methodological recommendations for mapping the ecological state of water bodies*.

2. Ministerstvo ekolohii ta pryrodnykh resursiv Ukrainy [Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine]. (2020). *Natsionalna prohrama monitorynhu vodnykh resursiv Ukrainy – National program for monitoring water resources of Ukraine*.
3. Sohor, A., Holubinka, Yu., Shapoval, V., & Sohor M. (2020). Interaktyvna karta zabrudnennia poverkhnevnykh vod Lvivshchyny. [Interactive Map of pollution of Surface waters of Lviv.] *Molodyi vchenyi – Young Scientist*, 2(78), 193–199. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-2-78-44>.
4. Sohor, A. R., & Zazuliak, P. M. (2022). Kartohrafuvannia ekolohichnoho zabrudnennia povitria mista Lviv [Mapping of enviromental pollution of air in Lviv]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiia – Space Science and Technology*, 28(3), 86–91.
5. Upravlinnia vodnymy resursamy Khmelnytskoi oblasti [Water Resources Administration of Khmelnytskyi Region]. (2020). *Zvit pro stan vodnykh resursiv Khmelnytskoi oblasti. Khmelnytskyi – Report on the state of water resources of Khmelnytskyi Region. Khmelnytskyi*.
6. Bijesh, T. V., & Narasimhamurthy, K. N. (2020). Surface water detection and delineation using remote sensing images: a review of methods and algorithms Sustain. *Water Resour. Manag*, vol.6, no. 68. <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00425-4>.
7. Bilgin, A. (2018). Evaluation of surface water quality by using the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) method and discriminant analysis method: A case study of the Coruh River Basin. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 554. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6927-5>.
8. Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine. (2015). *Ecosystem-based management of South Bug River Basin: South Bug River Basin management plan* (2nd ed.).
9. Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>.
10. Frappart, F., Papa, F., Famiglietti, J. S., Prigent, C., Rossow, W. B., & Seyler, F. (2008). Interannual variations of river water storage from a multiple satellite approach: A case study of the Rio Negro River basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113, D21104. <https://doi.org/10.1029/2007JD009438>.
11. *Global water quality monitoring and assessment techniques*. (2018). *Journal of Environmental Studies*, 11(4), 82–94.
12. Chen, K., Chen, H., Zhou, C., Huang, Y., Qi, X., Shen, R., Liu, F., Zuo, M., Zou, X., Wang, J., Zhang, Y., Chen, D., Chen, X., Deng, Y., & Ren, H. (2020). Comparative analysis of surface water quality prediction performance and identification of key water parameters using different machine learning models based on big data. *Water Research*, 171, 115454. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115454>.
13. United Nations Development Programme. (2016). *Monitoring and protection of water resources in the South Bug Basin: Final report* (UNDP/GEF South Bug Project). UNDP Ukraine.
14. Pan, F., Wang, C., & Xi, X. (2016). Constructing river stage–discharge rating curves using remotely sensed river cross-sectional inundation areas and river bathymetry. *Journal of Hydrology*, 540, 670–687. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.048>.
15. Schwatke, C., Scherer, D., & Dettmering, D. (2019). Automated extraction of consistent time-variable water surfaces of lakes and reservoirs based on Landsat and Sentinel-2. *Remote Sensing*, 11(9), 1010. <https://doi.org/10.3390/rs11091010>.
16. Sohor, A., Brydun, A., Fys, M., Yarema, N., & Trefler, A. (2021). Web mapping of surface water quality in Lviv. In *GeoTerrace-2021: International scientific and technical conference of young professionals* (October 4–6, 2021, Lviv, Ukraine).
17. Sohor, A., Brydun, A., Yarema, N., Lozynskyi, V., & Sohor, M. (2020). Interactive map of environmental pollution of the surface waters in Lviv region. In *GeoTerrace-2020: International scientific and technical conference of young professionals* (December 7–9, 2020, Lviv, Ukraine).
18. Sohor, A., Holubinka, Yu., Shapoval, V., & Sohor, M. (2020). Interactive map of pollution of surface waters of Lviv. *Young Scientist*, 2(78), 193–199. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-2-78-44>.

Дата першого надходження статті до видання: 23.10.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.11.2025

Andrii Brydun¹, Mariia Chobotaieva², Andrii Sohor³, Nataliia Yarema⁴

¹PhD in Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor of the Department of Mathematics Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: andrii.m.brydun@lpnu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5634-0512>

ResearcherID: [AAC-1271-2020](https://orcid.org/0000-0001-5634-0512), Scopus Author ID: [57212560353](https://orcid.org/0000-0001-5634-0512)

²Master of the Institute of Geodesy Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: mariia.chobotaieva.mhdhm.2025@lpnu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1745-7180>

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Cartography and Geospatial Modelling
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: andrii.r.sohor@lpnu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0084-9552>

ResearcherID: [ABI-6288-2020](https://orcid.org/0000-0002-0084-9552), Scopus Author ID: [57224950613](https://orcid.org/0000-0002-0084-9552)

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Cartography and Geospatial Modelling
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: nataliia.p.yarema@lpnu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5796-2038>

Scopus Author ID: [57218923725](https://orcid.org/0000-0002-5796-2038)

APPLICATION OF GIS FOR THE ANALYSIS OF THE ECOLOGICAL STATE OF THE SOUTHERN BUG RIVER WITHIN THE KHMELNYTSKYI AND VINNYTSIA REGIONS

The problem of river pollution has been relevant for many years. Still, over the last decade the consequences have become increasingly noticeable, so this scientific work aims to highlight this problem. The Southern Bug River is a vital water artery of Central Ukraine, providing water supply, hydropower, fishing and recreation. Despite its significant ecological value, the river faces numerous environmental problems associated with anthropogenic loads and climate change. This work is devoted to the study of the ecological state of the Southern Bug River in the territory of Khmelnytskyi and Vinnytsia regions using cartographic methods. The work analyzes the primary sources of river pollution, such as industrial and agricultural runoff, urbanization, unorganized landfill, and the impact of climate change on the water regime of the river. A comprehensive assessment of water quality was carried out based on hydrochemical, biological and radiological indicators, emphasizing geographic information systems (GIS) to create thematic maps and analyze the ecological situation. Cartographic methods allowed us to visualize the spatial distribution of pollution, assess the degree of influence of various factors on the river ecosystem and identify the most problematic areas. This work aimed to develop a cartographic model of the ecological state of the Southern Bug River within the Khmelnytskyi and Vinnytsia regions, as well as to assess the level of pollution of water resources and their impact on the ecosystem. One of the main stages of data processing was the creation of maps that clearly reflect the results of environmental monitoring. To achieve this goal, some tasks were solved: analysis of the ecological state of the Southern Bug River; development of a methodology for mapping the ecological state of the Southern Bug River; assessment of the impact of anthropogenic factors on the ecological state of water resources.

Keywords: Southern Bug River; ecological state; geoinformation technologies; environmental monitoring; pollution; anthropogenic factors; water resources management.

Fig.: 4. References: 18.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-532-541](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-532-541)

УДК 691+674

**Зоя Павлівна Копинець¹, Іван Миколайович Матюшенко²,
Володимир Олександрович Маєвський³, Олександр Миколайович Удовиський⁴,
Олег Богданович Ференц⁵**

¹кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів
Національний лісотехнічний університет України (Львів, Україна)
E-mail: tlsdbv@nltu.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8977-6953>

²кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів
Національний лісотехнічний університет України (Львів, Україна)
E-mail: tlsdbv@nltu.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6475-1901>

³доктор технічних наук, професор, директор навчально-наукового інституту деревообробних технологій і дизайну,
професор кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів
Національний лісотехнічний університет України (Львів, Україна)
E-mail: tlsdbv@nltu.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5820-9454>

⁴кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів
Національний лісотехнічний університет України (Львів, Україна)
E-mail: tlsdbv@nltu.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2234-806X>

⁵кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів
Національний лісотехнічний університет України (Львів, Україна)
E-mail: tlsdbv@nltu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4322-3952>

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ ВІД ПЕРЕРОБКИ ДЕРЕВИННОЇ СИРОВИНИ У ВИРОБНИЦТВІ БУДІВЕЛЬНИХ КОМПОЗИТІВ

Використання відходів деревообробних підприємств як сировини для будівельних композитів створює умови для одночасного вирішення проблеми зменшення виробничих витрат, а дослідження щодо застосування відходів деревообробного виробництва в будівництві є актуальним завданням. Для забезпечення енергоефективності споруд та високих теплоізоляційних показників будівельних композитів раціональним рішенням є введення до складу суміші органічних наповнювачів. Використання деревних відходів дасть змогу створити легкий та «теплий» композит для виготовлення стінових матеріалів.

Ключові слова: тирса; стружка; будівельний композит; коефіцієнт теплопровідності; міцність на тиск.

Рис.: 4. Бібл.: 21.

Актуальність теми дослідження. Пошук шляхів зниження собівартості продукції в одних галузях з одного боку і проблема утилізації відходів від переробки сировини в інших галузях з іншого боку можуть взаємно вирішуватися. Використання відходів одних галузей як вторинної сировини для інших створює умови для одночасного вирішення екологічних питань та зменшення виробничих витрат.

Саме у будівництві використовується значна частина всіх невідновлюваних (випадкових) ресурсів. Зокрема, на будівельний сектор припадає майже 32 % світового споживання енергії, 24 % використання видобутої сировини, 25 % твердих відходів. Це призводить до значного впливу на більшість чинників забруднення навколишнього середовища: забруднення повітря, питної води, викиди парникових газів, зменшення озонового шару тощо [1; 2].

Також відомо, що на деревопереробних підприємствах утворюються за характеристиками різні відходи: тирса (деревинні частинки, утворені під час розпилювання деревини), стружка (деревинні частинки, утворені під час фрезерування і свердління деревини), кускові відходи (утворені під час поздовжнього та поперечного розкрою сортиментів з деревини), шліфувальний порошок [3]. Вирішення проблеми утилізації відходів від переробки деревинної сировини підприємствами лісопромислового комплексу можливе, окрім як для виготовлення деревинних композитів (стружкові і волокнисті

плити), так і шляхом застосування їх у виробництві будівельних композитів [4, 5]. Тому для взаємної оптимізації економічних та екологічних показників дослідження застосування відходів деревообробного виробництва в будівництві досить актуальне питання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для зведення стін індивідуальних житлових будинків найчастіше використовують такі класичні матеріали як цегла, газоблоки, керамоблоки [6]. Достатньо поширене використання деревини, зокрема у вигляді оциліндрованої колоди, профільованого (цільного чи клеєного) бруса, а також каркасних чи каркасно-панельних дерев'яних конструкцій [7]. Також використовують і поєднання різних матеріалів в конструкційних елементах, наприклад деревозалізобетонні перекриття [8; 9].

Відомі також вироби з нетрадиційних матеріалів, зокрема блоки на основі соломи [10], арболіт збірний або монолітний, різновидом якого є костробетон на костриці льону або технічної коноплі [11], на основі стебел ріпаку [5], фіброліт [12]. Ці матеріали з використанням природних поновлюваних наповнювачів можуть слугувати як «зелені» технологічні рішення в будівельному виробництві [11].

Попри застосування відомих будівельних матеріалів, ведуться дослідження з включення деревинних відходів у цементні композити для розробки нових будівельних матеріалів та виробів на їх основі з такими характеристиками, що давали б змогу використовувати їх для зведення будівель і споруд [13]. Існують деревинно-цементні композити із використанням деревинної золи для часткової заміни цементу та деревинних відходів для часткової або повної заміни традиційного заповнювача.

Враховуючи сучасні реалії, все більше уваги надається застосуванню матеріалів, які б давали змогу ефективного використання сировинних ресурсів та були б енергоефективними. Важливим показником таких матеріалів є високий опір теплопередачі, оскільки застосування таких матеріалів дасть змогу зменшити втрати тепла через огорожувальні конструкції у зимовий період та використовувати меншу кількість енергоресурсів для опалення таких приміщень.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Використання відходів деревообробки (тирси, стружки, шліфувального порошку, кори) у виробництві будівельних матеріалів – це перспективний напрям циркулярної економіки. Однак, попри значну кількість досліджень, залишається низка технологічних та експлуатаційних проблем, які досі не розв'язані повною мірою.

Наприклад, деревина містить водорозчинні екстрактивні речовини, які сповільнюють процес гідратації цементу, що іноді негативно впливає до набору міцності або навіть розсіпання готового виробу. Створення універсального та екологічного методу нейтралізації цих речовин є актуальним завданням.

Деревинний заповнювач має пористу структуру і здатний вбирати воду в обсягах, що в рази перевищують його власну масу. Тому важливим є застосування стабільного гідрофобізатора, який би не знижував адгезію між деревиною та цементним каменем. Адже під час експлуатації деревобетони (арболіт, тирсобетон) «дихають», змінюючи лінійні розміри. Це призводить до появи тріщин у штукатурці та порушення цілісності конструкцій.

Невирішеним є питання прогнозування терміну служби таких сумішей у вологих середовищах. Внутрішня корозія органічного заповнювача за тривалого впливу вологи залишається малодослідженою. А отже можливе поступове руйнування структури матеріалу через 15–20 років експлуатації за несприятливих умов.

Відходи деревообробки часто є полідисперсними (від порошку до тріски). Тому неможливо отримати стабільні показники міцності та теплопровідності в промислових масштабах при використанні «сировини з купи».

Хоча деревобетони належать до важкогорючих матеріалів, високий вміст органіки створює певні ризики, які потрібно враховувати з огляду на особливості застосування таких матеріалів.

Тому огляд досліджень, щодо використання відходів від переробки деревинної сировини у будівельних композитах дасть змогу оцінити перспективи цього шляху.

Мета дослідження. Розглянути можливість використання відходів від переробки деревинної сировини для використання в будівельних композитах на мінеральних в'язучих в умовах нашої країни.

Виклад основного матеріалу. Питання використання відходів від переробки деревини як наповнювача у будівельних композитах є на цей час актуальним у світі, про що свідчать опубліковані результати досліджень.

Вивченню впливу деревинної стружки на властивості двох типів піщаних бетонів: з річковим та дюнным піском присвячена робота [14]. Вміст стружки у цьому дослідженні становив від 0 до 100 кг на 1 м³ бетону. Матриця піщаних бетонів складалася з піску, цементу, наповнювача (в основному подрібнених відходів з кар'єру (вапняку), отриманих шляхом просіювання з розміром отвору сита 80 мм), добавки та води. Отримані в цій роботі результати засвідчили, що завдяки додаванню деревинної стружки значно зменшується теплопровідність композиту (наприклад, з вмістом річкового піску з 1,30 Вт/(м·К) до 0,65 Вт/(м·К) з вмістом стружки 100 кг на 1 м³ бетону) хоча і зменшується механічна міцність (наприклад, з вмістом тільки річкового піску з 23,6 МПа до 6,2 МПа з вмістом стружки 100 кг на 1 м³ бетону). Тому автори цього дослідження констатують, що досліджуваний композит може мати застосування для теплоізоляції та як наповнювач, або для використання в конструкціях з низькою несучою здатністю, якщо вміст деревини невисокий. Також було встановлено, що збільшення вмісту стружки зменшує масу піщаних бетонів, помітно зменшуючи їхню щільність (для прикладу з вмістом річкового піску з 2100 кг/м³ до 1430 кг/м³ з вмістом стружки 100 кг на 1 м³ бетону).

В іншій роботі [13] досліджено властивості цементних будівельних композитів з мінеральними заповнювачами: одним типом піску та двома типами гравію (максимальним розміром до 10 мм та 16 мм). У процесі досліджень замінювали мінеральний заповнювач деревинною тріскою (максимальний розмір 16 мм), тирсою (максимальний розмір 4 мм) або їхньою сумішшю. Зафіксовано, що зі збільшенням вмісту деревинних частинок, як тріски, так і тирси знижується міцність на стискання досліджуваного композиту. Однак усі композити продемонстрували міцність при стиску понад 30 МПа. Також результати цього дослідження показали значне зниження теплопровідності для композиту з вмістом суміші деревинної тріски 171 кг на 1 м³ бетону та тирси 60 кг на 1 м³ бетону на 54 % та з вмістом тріски 214 кг на 1 м³ бетону на 52 % порівняно з контрольним взірцем (без вмісту деревинних частинок). Враховуючи одержані результати, на думку авторів статті [13], бетони, що містять до 20 % деревинної тріски та/або тирси, мають такі фізичні, механічні та довговічні властивості, що роблять їх придатними для використання як конструкційного матеріалу в будівництві, а також для виготовлення стовпів огорож, фасадних панелей та вуличних меблів.

У дослідженні [15] проведено аналіз властивостей цементних будівельних композитів із використанням природних заповнювачів. Розмір дрібного заповнювача становив 4,75 мм (просіювання на ситі № 4), а максимальний розмір крупного заповнювача становив 12,5 мм. Приготовано та проаналізовано чотири бетонні суміші: контрольна суміш (цемент, пісок та крупний заповнювач), в інших трьох сумішах 5, 10 та 15 % піску замінювали на тирсу. Результати цього дослідження показали, що збільшення кількості тирси у зразках бетону знижує міцність при стиску. Міцність при стиску зразків, у яких 5 % піску замінено тирсою, через 28 днів твердіння становила 26,2 МПа, за заміни 10 % піску

тирсою – 20,1 МПа, а за заміни 15 % піску тирсою – 15,9 МПа. Тому автори [15] рекомендують у бетонних конструкціях використовувати композит з вмістом 5 % тирси.

У роботі [16] проведено дослідження будівельного композиту з глини та тирси. Вміст тирси в композиті становив 2, 4, 6, 8 та 10 %. У роботі встановлено теплові характеристики невиненої цегли, як контрольного зразка без тирси. Вимірювання теплових характеристик композитів з різним відсотковим вмістом тирси проводили після стабілізації їхньої маси. Зі збільшенням вмісту тирси знижується щільність композиту (від 1985,45 кг/м³ за вмісту тирси 2 % до 1648,51 кг/м³ за вмісту тирси 10 %). Результати дослідження показують, що додавання тирси позитивно впливає на теплові властивості невинених матеріалів на основі глини. Теплопровідність розроблених у роботі [16] композитів змінюється від 0,87 Вт/(м·К) до 0,63 Вт/(м·К), що є нижче порівняно з контрольним зразком (0,90 Вт/(м·К)). Отже, інтеграція тирси може бути корисною для розробки термoeфективних легких будівельних матеріалів.

Проводили дослідження будівельних композитів з вмістом глини, піску та тирси в роботі [17]. Заміщали в композиті з вмістом 30 % глини та 70 % піску (контрольний зразок) пісок тирсою 10, 20, 30 та 40 %. Міцність при стиску контрольного зразка становила 2,1 МПа, а зразків із заміною піску на тирсу 2,19; 2,43; 2,19; 2,05 МПа відповідно до відсотка тирси в композиті. Як бачимо, найвищий показник міцності при стиску за 20 % вмісту тирси в композиті.

Використання глини у цементних будівельних композитах також розглядають в іншій роботі [18]. Досліджено властивості цементного будівельного композиту з цементу та піску (контрольний зразок) та композитів із заміщенням частини цементу на глину. Результати експериментальних досліджень свідчать, що додавання менш як 5 % сирової глини за масою до суміші має мінімальний вплив на міцність при стиску (після 28 днів твердіння зафіксовано зниження міцності при стиску на 10,9; 26,7; 41,1; 56,8; 55,7 та 63,7 % для рецептур М5, М10, М15, М20, М25 та М30 відповідно порівняно з контрольним зразком), але зменшує теплопровідність (додавання глини в кількості 5 % знизило теплопровідність на 3,4 %, а при додаванні глини в кількості 30 % теплопровідність зменшилася з 0,88 Вт/(м·К) до 0,81 Вт/(м·К)). За думкою авторів композит, у якому додано менше ніж 5 % сирової глини, можна використовувати, як конструкційний матеріал, а композит, у якому додано понад 5 % сирової глини за вагою, підходить для застосувань, де прийнятна нижча механічна міцність.

Дослідження композиту, у якому поєднано цемент, глину, вапно та тирсу [19], показало за складу композиту у такій пропорції: цемент 20 %, глина 50 %, вапно 10 %, тирса 20 % достатню його міцність при стиску (3,32 МПа) для застосування його як конструкційно-теплоізоляційного матеріалу несучих стін у малоповерховому будівництві.

Отже, як бачимо з наведених досліджень, проводиться активна робота над заміщенням матеріалів з непоновлюваних джерел (пісок, щебінь) на поновлювані матеріали, тобто деревинні. У деяких роботах також пропонують частково замінювати цемент на такий природний матеріал, як глина.

Згідно з Л. Й. Дворкіним [20], легкі бетони мають середню щільність, яка не перевищує 2000 кг/м³, важкі бетони мають щільність від 2000 до 2500 кг/м³. За призначенням бетони поділяють на теплоізоляційні, конструкційно-теплоізоляційні й конструкційні. У будівництві найбільше застосовують конструкційно-теплоізоляційні легкі бетони. Переважно їх використовують для виготовлення стінових панелей, плит перекриттів та інших конструкцій у житлово-цивільному і промисловому будівництві. Для теплової ізоляції використовують теплоізоляційні бетони, які мають щільність від 300 кг/м³ до 500 кг/м³, міцність при стиску від 0,5 МПа до 2,5 МПа, теплопровідність від 0,12 Вт/(м·К) до 0,24 Вт/(м·К). Для огорожува-

льних конструкцій будівель використовують, як правило, конструкційно-теплоізоляційні легкі бетони щільністю від 500 кг/м^3 до 1400 кг/м^3 , їхня теплопровідність – від $0,17 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ до $0,40 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, міцність при стиску – від $2,5 \text{ МПа}$ до 10 МПа . Для несучих конструкцій будівель і споруд використовують конструкційні легкі бетони: їхня щільність становить від 1400 кг/м^3 до 1800 кг/м^3 , теплопровідність від $0,58 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ до $0,40 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, міцність при стиску від 15 МПа до 50 МПа .

Як показують результати дослідження в роботі [14], без вмісту деревинної стружки бетон за щільністю відноситься до важких, а вже при додаванні 20 кг/м^3 деревинної стружки переходить до класу легких бетонів, оскільки його щільність стає нижчою 2000 кг/м^3 (рис. 1).

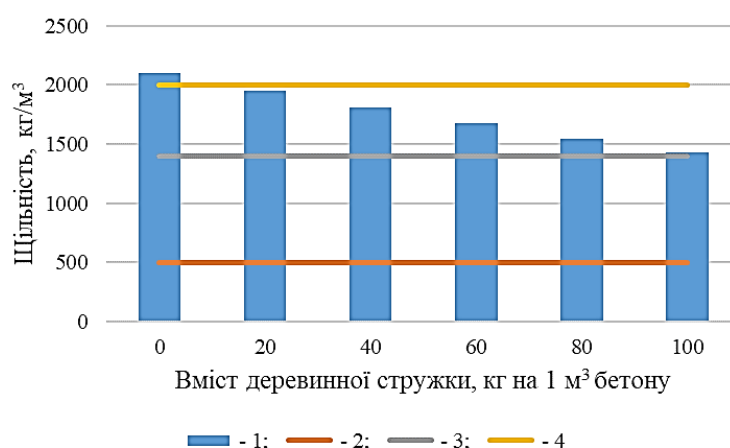


Рис. 1. Залежність щільності композиту від вмісту деревинної стружки:

- 1 – щільність композиту, кг/м^3 (побудовано авторами за даними [14]);
 2 – верхня межа щільності теплоізоляційного легкого бетону згідно з [20]; 2 – верхня межа щільності конструкційно-теплоізоляційного легкого бетону згідно з [20];
 3 – верхня межа щільності конструкційного легкого бетону згідно з [20]

Згідно з класифікацією Л. Й. Дворкіна [20] за міцністю при стиску композит з вмістом деревинної стружки 40 % і більше можна віднести до конструкційно-теплоізоляційного легкого бетону, а нижче 40 % – до конструкційного легкого бетону (рис. 2).

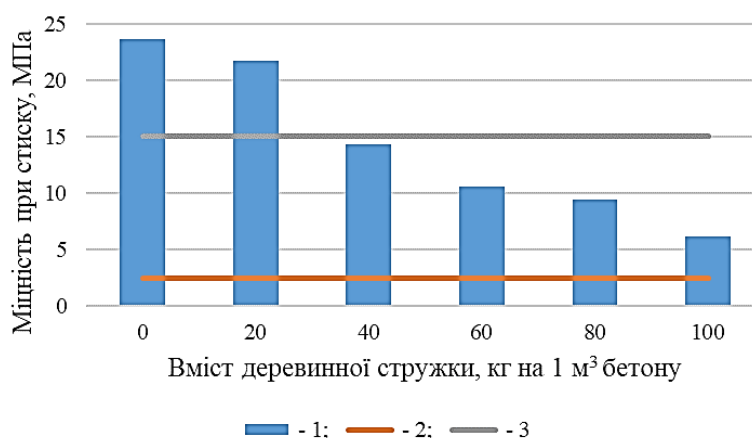


Рис. 2. Залежність міцності композиту при стиску від вмісту деревинної стружки:

- 1 – міцність композиту при стиску, МПа (побудовано авторами за даними [14]);
 2 – нижня межа міцності при стиску конструкційно-теплоізоляційного легкого бетону згідно з [20]; 3 – нижня межа міцності при стиску конструкційного легкого бетону згідно з [20].

За вмісту деревинної стружки 100 кг на 1 м³ бетону теплопровідність є нижчою за 0,66 Вт/(м·К), що відповідає теплопровідності керамзитобетону на керамзитовому піску щільністю 1800 кг/м³. Решта композитів має теплопровідність нижче 1,51 Вт/(м·К), що відповідає теплопровідності важких бетонів (рис. 3).

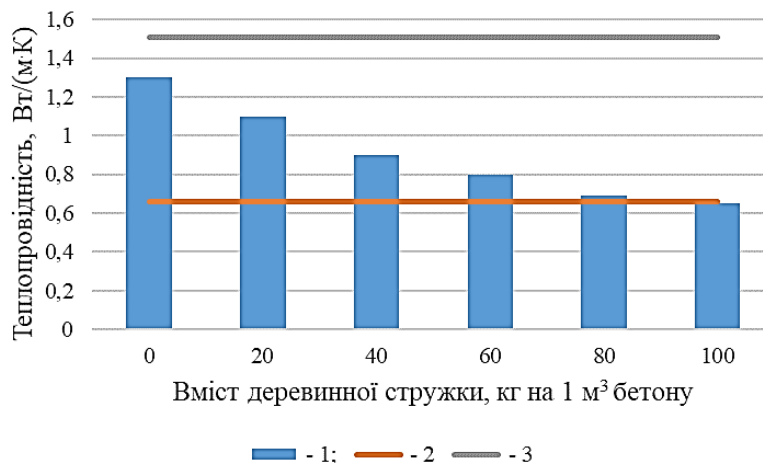


Рис. 3. Залежність теплопровідності композиту від вмісту деревинної стружки:
 1 – теплопровідність композиту, Вт/(м·К) (побудовано авторами за даними [14]);
 2 – найбільша теплопровідність легких бетонів згідно з [21];
 2 – теплопровідність важкого бетону згідно з [21]

При заміщенні в композиті з глини та піску частини піску тирсою у роботі [17] отримано такі результати щодо його міцності при стиску, що згідно з класифікацією [20] ці композити можна віднести до теплоізоляційних матеріалів (рис. 4).

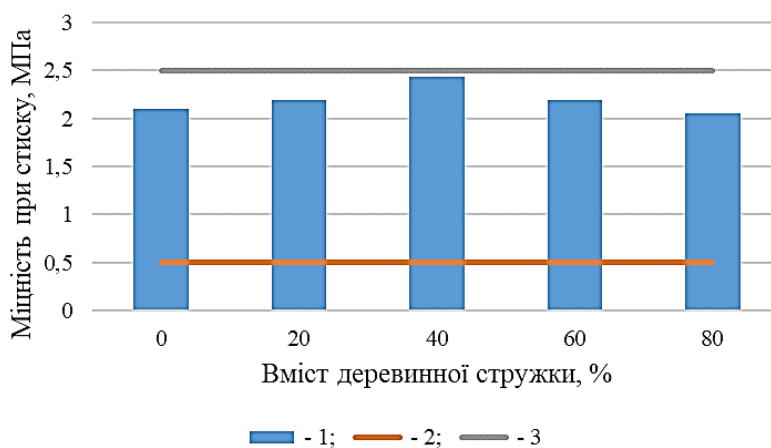


Рис. 4. Залежність міцності композиту при стиску від вмісту деревинної стружки:
 1 – міцність композиту при стиску, МПа (побудовано авторами за даними [17]);
 2 – нижня межа міцності при стиску теплоізоляційного легкого бетону згідно з [20];
 3 – верхня межа міцності при стиску теплоізоляційного легкого бетону згідно з [20].

Висновок. Для забезпечення високих теплоізоляційних показників будівельних композитів раціональним рішенням є введення до складу суміші органічних наповнювачів – відходів від переробки деревинної сировини, зокрема тирси та стружки. Використання деревних відходів дасть змогу створити легкий та «теплый» композит, що одночасно має вирішити проблему утилізації відходів від переробки сировини деревообробної

промисловості. Спираючись на сучасний світовий досвід та чисельні наукові дослідження, ми вважаємо перспективним розширення сфери застосування глини як активного компонента в цементних будівельних композитах. Таким чином, поєднання глини, цементу та деревинних заповнювачів відкриває шлях до створення екологічно безпечних, економічно вигідних та енергоощадних стінових матеріалів, які відповідатимуть сучасним вимогам сталого будівництва.

Список використаних джерел

1. Dodoo, A., Gustavsson, L., & Tettey, U. Y. (2019). Effects of end-of-life management options for materials on primary energy and greenhouse gas balances of building systems. *Energy Procedia*, 158, 4246–4253. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.802>.
2. Benachio, G. L. F., Freitas, M. D. C. D., & Tavares, S. F. (2020). Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 260, 121046. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046>.
3. Маєвський, В. О., Копинець, З. П., Ковбасюк, В. М., Миськів, Є. М., & Якуба, М. М. (2019). Технологічні аспекти регулювання витрат деревинної сировини під час виготовлення віконних блоків з тришарового клеєного бруса. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, (18), 208–216. <https://doi.org/10.15421/411922>.
4. Підгорна, О. В., Абрамович, В. С., & Бондар, А. В. (2018). Будівельні матеріали та вироби на основі відходів деревини. *XLVII Науково-технічна конференція факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання*. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2018/paper/view/4928>.
5. Копанський, М. М., Козак, Р. О., & Кусняк, І. І. (2024). Характеристики деревинних композитів на основі стебел ріпаку та мінерального в'язучого. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, (50), 473–475. <https://doi.org/10.36930/42245008>.
6. Козел, М. М. (2024). Аналіз сучасних архітектурно-конструктивно-технологічних систем зведення стін одnorodинного житла (на прикладі західних областей України). *Нові технології в будівництві*, (45), 10–17. <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2024.45.2>.
7. Максимів, В. М., Горбачова, Л. Н., & Хмарик, Л. В. (2013). Аналіз теплотехнічних характеристик стін різних конструкцій у дерев'яному домобудуванні. *Науковий вісник НЛТУ України*, (23.12), 191–197. https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2013/23_12/191_Mak.pdf.
8. Шехоркіна, С. Є., Нікіфорова, Т. Д., & Буцька, О. Л. (2020). Оцінка вертикальних переміщень гібридних дерево-залізобетонних будівель. *Науковий вісник будівництва*, 2(100), 149–157. <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/en/article/view/292>.
9. Ceccotti, A. (2002). Composite concrete-timber structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3), 264–275. <https://doi.org/10.1002/pse.126>.
10. Мазурак, А., Мазурак, О., Ковалик, І., & Михайлечко, В. (2019). Конструктивно-технологічні рішення зовнішніх огорожень стін із солом'яних блоків. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*, (20), 53–58. http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Vldau_2019_20_13.pdf.
11. Бікс, Ю. С., & Ратушняк, О. Г. (2018, 13-15 листопада). *Енергоефективний теплоблок. Інноваційні технології в будівництві. Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції*. Вінниця, Україна.
12. Веселівський, Р. Б., & Половко, А. П. (2013). Дослідження вогнестійкості огорожувальних конструкцій з фібролітовою нез'ємною опалубкою. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: VIII Міжнар. наук.-практ. конф.* Миколаїв, Україна.
13. Dias, S., Tadeu, A., Almeida, J., Humbert, P., António, J., de Brito, J., & Pinhão, P. (2022). Physical, mechanical, and durability properties of concrete containing wood chips and sawdust: An experimental approach. *Buildings*, 12(8), 1277. <https://doi.org/10.3390/buildings12081277>.

14. Bederina, M., Marmoret, L., Mezreb, K., Khenfer, M. M., Bali, A., & Quéneudec, M. (2007). Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modelling. *Construction and Building Materials*, 21(3), 662–668. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.008>.
15. Muhedin, D. A., Qadir, S. J., Hamakareem, M. I., & Rash, A. J. H. (2020). Effect of sawdust as partial replacement of sand in concrete. *Journal of Duhok University*, 23(2), 658–664. <https://surl.li/kzrnly>.
16. Charai, M., Sghiouri, H., Mezrhab, A., Karkri, M., Elhammouti, K., & Nasri, H. (2020). Thermal performance and characterization of a sawdust-clay composite material. *Procedia Manufacturing*, 46, 690–697. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.098>.
17. Jokhio, G. A., Mohsin, S. M. S., & Gul, Y. (2018). Two-fold sustainability–Adobe with sawdust as partial sand replacement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 342(1), 012069. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/342/1/012069>.
18. Drissi, M., Horma, O., Mezrhab, A., & Karkri, M. (2024). Exploring raw red clay as a supplementary cementitious material: Composition, thermo-mechanical performance, cost, and environmental impact. *Buildings*, 14(12), 3906. <https://doi.org/10.3390/buildings14123906>.
19. Химич, В. М., Копинець, З. П., & Рутковська, І. З. (2024). Розроблення композитів з вмістом відходів від переробки деревинної сировини. *Матеріали 76-ї науково-практичної конференції студентів, аспірантів та слухачів Малої лісової академії НЛТУ України*. Львів, Україна. https://drive.google.com/file/d/10TRRZZeowAmWhQCzNpUJIS_Y9q8TBiPk/view.
20. Дворкін, Л. Й. (2017). *Будівельне матеріалознавство: Навчально-довідковий посібник*. НУВГП.
21. ДСТУ 9191:2022. (2022). *Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель*. ДП «УкрНДНЦ».

References

1. Dodoo, A., Gustavsson, L., & Tettey, U. Y. (2019). Effects of end-of-life management options for materials on primary energy and greenhouse gas balances of building systems. *Energy Procedia*, 158, 4246–4253. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.802>.
2. Benachio, G. L. F., Freitas, M. D. C. D., & Tavares, S. F. (2020). Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 260, 121046. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046>.
3. Maievskyi, V. O., Kopynets, Z. P., Kovbasiuk, V. M., Myskiv, Ye. M., & Yakuba, M. M. (2019). Tekhnolohichni aspekty rehulivannia vytrat derevynnoi syrovyny pid chas vyhotovlennia vikonnykh blokv z trysharovoho kleienoho brusa [Technological aspects of regulating wood raw material consumption during the manufacture of window blocks from three-layer glued beams]. *Naukovi pratsi Lisivnychoi akademii nauk Ukrainy – Scientific works of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, (18), 208–216. <https://doi.org/10.15421/411922>.
4. Pidhorna, O. V., Abramovych, V. S., & Bondar, A. V. (2018). Budivelni materialy ta vyroby na osnovi vidkhodiv derevyny [Building materials and products based on wood waste]. *XLVII Naukovo-tekhnichna konferentsiia fakultetu budivnytstva, teploenerhetyky ta hazopostachannia – XLVII Scientific and Technical Conference of the Faculty of Construction, Thermal Power Engineering and Gas Supply*. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2018/paper/view/4928>.
5. Kopanskyi, M. M., Kozak, R. O., & Kusniak, I. I. (2024). Kharakterystyky derevynnykh kompozytiv na osnovi stebel ripaku ta mineralnogo viazhuchoho [Characteristics of wood composites based on rapeseed stalks and mineral binder]. *Lisove hospodarstvo, lisova, paperova i derevoobrobna promyslovist – Forestry, forestry, paper and woodworking industries*, (50), 473–475. <https://doi.org/10.36930/42245008>.
6. Kozel, M. M. (2024). Analiz suchasnykh arkhitekturno-konstruktyvno-tekhnologichnykh system zvedennia stin odnorodynnoho zhytla (na prykladi zakhidnykh oblastei Ukrainy) [Analysis of modern architectural, structural and technological systems for the construction of walls in single-family dwellings (based on the example of the western regions of Ukraine)]. *Novi tekhnolohii v budivnytstvi – New technologies in construction*, (45), 10–17. <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2024.45.2>.

7. Maksymiv, V. M., Horbacheva, L. N., & Khmaryk, L. V. (2013). Analiz teplotekhnichnykh kharakterystyk stin riznykh konstruksii u derevianomu domobuduvanni [Analysis of the thermal characteristics of walls of various designs in wooden house construction]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy – Scientific Bulletin of the National Forestry University of Ukraine*, (23.12), 191–197. https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2013/23_12/191_Mak.pdf.
8. Shekhorkina, S. Ye., Nikiforova, T. D., & Butska, O. L. (2020). Otsinka vertykalnykh peremishchen hibrydnykh derevo-zalizobetonnykh budivel [Assessment of vertical movements of hybrid timber-reinforced concrete buildings]. *Naukovyi visnyk budivnytstva – Scientific Bulletin of Construction*, 2(100), 149–157. <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/en/article/view/292>
9. Ceccotti, A. (2002). Composite concrete-timber structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3), 264–275. <https://doi.org/10.1002/pse.126>.
10. Mazurak, A., Mazurak, O., Kovalyk, I., & Mykhailechko, V. (2019). Konstruktyvno-tekhnologichni rishennia zovnishnikh ohorodzhenn stin iz solomianykh blokiv [Design and technological solutions for external wall cladding made of straw blocks]. *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Arkhitektura i silskohospodarske budivnytstvo – Bulletin of Lviv National Agrarian University. Architecture and Agricultural Construction*, (20), 53–58. http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Vldau_2019_20_13.pdf.
11. Biks, Yu. S., & Ratushniak, O. H. (2018, November 13–15). Enerhoefektyvnyi teploblok. Innovatsiini tekhnologhii v budivnytstvi. In *Zbirnyk materialiv Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, Vinnytsia, Ukraina – Enerhoefektyvnyi teploblok. Innovatsiini tekhnologhii v budivnytstvi (2018): Zbirnyk materialiv Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii*.
12. Veselivskyi, R. B., & Polovko, A. P. (2013). Doslidzhennia vohnestiikosti ohorodzhuvalnykh konstruksii z fibrolitovoio neziemnoio opalubkoio [Research on the fire resistance of enclosing structures with fibrolite permanent formwork]. *Problemy ekolohii ta enerhozberezhennia v sudnobuduvanni: VIII Mizhnar. nauk.-prakt. konf., Mykolaiv, Ukraina – Environmental and energy conservation issues in shipbuilding: VIII International Scientific and Practical Conference*.
13. Dias, S., Tadeu, A., Almeida, J., Humbert, P., António, J., de Brito, J., & Pinhão, P. (2022). Physical, mechanical, and durability properties of concrete containing wood chips and sawdust: An experimental approach. *Buildings*, 12(8), 1277. <https://doi.org/10.3390/buildings12081277>.
14. Bederina, M., Marmoret, L., Mezreb, K., Khenfer, M. M., Bali, A., & Quéneudec, M. (2007). Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modelling. *Construction and Building Materials*, 21(3), 662–668. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.008>.
15. Muhedin, D. A., Qadir, S. J., Hamakareem, M. I., & Rash, A. J. H. (2020). Effect of sawdust as partial replacement of sand in concrete. *Journal of Duhok University*, 23(2), 658–664. <https://surl.li/kzrnly>.
16. Charai, M., Sghouri, H., Mezhab, A., Karkri, M., Elhammouti, K., & Nasri, H. (2020). Thermal performance and characterization of a sawdust-clay composite material. *Procedia Manufacturing*, 46, 690–697. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.098>.
17. Jokhio, G. A., Mohsin, S. M. S., & Gul, Y. (2018). Two-fold sustainability–Adobe with sawdust as partial sand replacement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 342(1), 012069. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/342/1/012069>.
18. Drissi, M., Horma, O., Mezhab, A., & Karkri, M. (2024). Exploring raw red clay as a supplementary cementitious material: Composition, thermo-mechanical performance, cost, and environmental impact. *Buildings*, 14(12), 3906. <https://doi.org/10.3390/buildings14123906>.
19. Khymych, V. M., Kopynets, Z. P., & Rutkovska, I. Z. (2024). Rozroblennia kompozytiv z vmistom vidkhodiv vid pererobky derevynnoi syrovyny [Development of composites containing waste from wood processing]. *Materialy 76-yi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta slukhachiv Maloi lisovoi akademii NLTU Ukrainy, Lviv, Ukraina – Proceedings of the 76th Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Listeners of the Small Forest Academy of the National Forestry University of Ukraine, Lviv, Ukraine*. https://drive.google.com/file/d/10TRRZZeowAmWhQCzN-pUJIS_Y9q8TBiPk/view.

20. Dvorkin, L. I. (2017). *Budivelne materialoznavstvo: Navchalno-dovidkovyi posibnyk. NUVHP [Building Materials Science: Educational and Reference Guide]*. NUVGP.

21. DSTU 9191:2022. (2022). *Teploizoliatsiia budivel. Metod vyboru teploizoliatsiinoho materialu dlia uteplennia budivel [Thermal insulation of buildings. Method for selecting thermal insulation material for insulating buildings]*. Derzhavne pidpriemstvo "Ukrainskyi naukovo-doslidnyi instytut standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti" – State Enterprise 'Ukrainian Scientific Research Institute for Standardisation, Certification and Quality.

Дата першого надходження статті до видання: 24.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.12.2025

UDC 691+674

**Zoya Kopynets¹, Ivan Matiushenko², Volodymyr Mayevskyy³,
Oleksandr Udovytyskyi⁴, Oleh Ferents⁵**

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Saw-Milling, Joinery and Wooden Building Products
Ukrainian National Forestry University (Lviv, Ukraine)

E-mail: tlsdbv@nltu.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8977-6953>

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Saw-Milling, Joinery and Wooden Building Products
Ukrainian National Forestry University (Lviv, Ukraine)

E-mail: tlsdbv@nltu.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6475-1901>

³Doctor of Sciences, Professor, Director of Educational-Scientific Institute of Woodworking and Design, Professor of Department of Saw-Milling, Joinery and Wooden Building Products. Ukrainian National Forestry University (Lviv, Ukraine)

E-mail: tlsdbv@nltu.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5820-9454>

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Saw-Milling, Joinery and Wooden Building Products
Ukrainian National Forestry University (Lviv, Ukraine)

E-mail: tlsdbv@nltu.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2234-806X>

⁵PhD in Technical Sciences, associate Professor, Head of Department of Saw-Milling, Joinery and Wooden Building Products.
Ukrainian National Forestry University (Lviv, Ukraine)

E-mail: tlsdbv@nltu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4322-3952>

PROSPECTS FOR USING WOOD PROCESSING WASTE IN THE PRODUCTION OF CONSTRUCTION COMPOSITES

The woodworking industry produces various types of waste, including sawdust (small particles from sawing), shavings (from milling and drilling), lump waste, and fine sanding dust. Using these materials as secondary resources for other industries is an effective way to reduce production costs. Because of this, researching how to apply wood waste in the construction sector is a very relevant task, as it helps to balance economic goals with environmental protection.

Current research focuses on using wood processing by-products to create new building composites. There is a strong movement to replace non-renewable materials, such as sand and crushed stone, with renewable wood-based alternatives. One interesting proposal is to partially replace cement with clay, which is a natural and widely available material. Preliminary tests on a composite made from a mixture of cement, clay, lime, and sawdust have shown positive results. This material is strong enough to be used for load-bearing walls in low-rise buildings, providing both structural integrity and insulation.

In the modern world, improving the energy efficiency of buildings is a top priority. To ensure that building materials provide high levels of thermal insulation, a practical solution is to add organic fillers – specifically wood waste like sawdust and shavings – into the mixture. Using these wood by-products results in a composite that is both lightweight and "warm" (thermally efficient).

This approach solves two problems at once: it provides high-quality building materials and offers a way to recycle industrial waste. Ultimately, combining clay, cement, and wood aggregates creates wall materials that are environmentally safe, cost-effective, and energy-saving. These materials perfectly meet the modern requirements for sustainable construction.

Keywords: sawdust; wood shavings; lump waste; building composite; thermal conductivity; compressive strength.

Fig.: 4. References: 21.

**Тарас Антонович Наливайко¹, Тетяна Тарасівна Наливайко²,
Любов Олексіївна Маслій³**

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри проєктування доріг, геодезії і землевпорядкування
Харківський національний автомобільно-дорожній університет (Харків, Україна)

E-mail: nalivaykot@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5805-873X>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця (Харків, Україна)

E-mail: tetyana.nalivayko@hneu.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5069-486X>

³старший викладач кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем

Навчально-науковий інститут будівництва, землеустрою та цивільної інженерії

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)

E-mail: gnomomir@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3844-462X>

УДОСКОНАЛЕННЯ ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕТОДІВ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГОНЧАРІВСЬКОГО МОСТУ ЧЕРЕЗ р. ЛОПАНЬ У м. ХАРКІВ

У статті розглянуто методику інженерно-геодезичних робіт при обстеженні технічного стану Гончарівського мосту через р. Лопань у місті Харків. Виконано елементи вдосконалення методів та геодезичних засобів стосовно визначення планово-висотного положення і геометричних параметрів деформаційних величин моста за складних геологічних умов. Здійснено пошук та аналіз нормативних документів та інформації відносно організації геодезичного моніторингу по деформаціях інженерних споруд. У польових умовах виконано порівняльні дослідження точності сучасного електронного тахеометра та прецизійного оптичного теодоліта. На базі місця розташування мосту створено геодезичну опорну мережу для проведення вишукувань у вигляді геодезичного чотирикутника. Виконано розрахунок точності геодезичних вимірювань, а також наведено порівняльний аналіз результатів досліджень.

Ключові слова: інженерна інфраструктура; інженерно-геодезичні вишукування; моніторинг; опорний базис; траверсна полігонометрія; мікротріангуляція; тахеометрія; геометричне нівелювання; опорна мережа.

Рис.: 2. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. На сьогодні в умовах зростаючих транспортних навантажень на інженерну інфраструктуру, зокрема у місті Харків, виникає необхідність забезпечення надійної та безпечної експлуатації мостових споруд в Україні. Вона зумовлена старінням і ускладненням інженерно-геологічних умов, які характерні для багатьох міст країни. Своєю чергою мости, як основні відповідальні інженерні споруди, потребують систематичного контролю їхнього технічного стану на основі високоточного геодезичного моніторингу деформацій та зміщень.

Особливу увагу необхідно приділяти удосконаленню методики інженерно-геодезичних робіт, спрямованої на підвищення точності при визначенні планово-висотного положення і геометричних параметрів деформацій мостів і споруд, що перебувають у складних геологічних умовах.

Також швидкий розвиток сучасних геодезичних приладів, обладнання та технологій потребує науково обґрунтованого порівняння, яке характеризувало б їхню точність і застосування на практиці при обстеженнях інженерних споруд.

Крім того, є необхідність в аналізі чинної нормативно-правової бази з подальшим удосконаленням її щодо організації геодезичного моніторингу деформацій та адаптації до реальних умов експлуатації конкретних об'єктів. Ефективне визначення планово-висотного положення елементів мостів та параметрів їх деформацій є ключовим чинником своєчасного виявлення небезпечних змін технічного стану й запобігання аварійним ситуаціям.

Постановка проблеми. При розробці плану робіт з інженерно-геодезичного моніторингу на практиці виникають проблеми, пов'язані з обґрунтованим вибором методів і засобів геодезичних вимірювань, які адаптовані до конкретних умов експлуатації інженерних споруд, а також з недостатньою узгодженістю чинних нормативних документів щодо організації моніторингу деформацій. Особливо актуальним є питання оцінки точності сучасних електронних геодезичних приладів порівняно з класичними високоточними оптичними приладами й засобами при виконанні вищенаведених робіт.

Відповідно виникає потреба в удосконаленні методики інженерно-геодезичних робіт при обстеженні мостових споруд, зокрема шляхом створення раціональної геодезичної опорної мережі, обґрунтування точності вимірювань та аналізу результатів визначення деформаційних величин. Розв'язання зазначених проблем на прикладі Гончарівського мосту через р. Лопань у місті Харків є актуальним й має практичне значення для підвищення ефективності геодезичного забезпечення обстежень та моніторингу технічного стану інженерних споруд.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням моніторингу геометричних параметрів мостів із застосуванням геодезичних методів вимірювання присвячено багато наукових робіт, що свідчить про значний інтерес до проблеми забезпечення надійності та безпечної експлуатації інженерних споруд. У роботах закордонних та вітчизняних науковців і фахівців розглядаються як класичні, так і сучасні геодезичні методи, що застосовуються для визначення просторових переміщень і деформацій мостових конструкцій.

Можливості використання GNSS-технологій для моніторингу динамічних прогинів мостів приділена основна увага в публікації [1]. Автор доводить, що GNSS-спостереження з високою частотою ресстрації можуть бути ефективними для визначення просторових коливань і деформацій, однак точність таких вимірювань значною мірою залежить від конструктивних особливостей мосту, рівня шумів GNSS-сигналу та впливу багатопляхового поширення. Наголошується, що застосування GNSS є доцільним переважно для протяжних мостових споруд із помітними амплітудами деформацій, тоді як для коротких і жорстких мостів точність може бути недостатньою.

У роботі [2] розглядається комплексний підхід до геодезичного моніторингу мостів, де GNSS-спостереження застосовується для визначення планових і просторових зміщень, тахеометричні вимірювання для контролю горизонтальних переміщень, а нівелювання застосовується для визначення вертикальних деформацій. На прикладі цієї роботи автор показав, що є можливість отримати повні просторові характеристики деформацій шляхом поєднання різних методів вимірювань. Такий підхід дозволяє підвищити достовірність результатів, але потребує значних трудових та часових витрат і не забезпечує повної автоматизації процесу моніторингу.

У статті [3] авторами доведено, що інтеграція сучасних геодезичних і маркшейдерських технологій (GNSS, TLS, БПЛА-фотограмметрія, InSAR) суттєво підвищує точність, оперативність і надійність моніторингу деформацій техногенних об'єктів. Комплексне використання цих методів забезпечує своєчасне виявлення небезпечних змін, ефективне управління геотехнічними ризиками та відповідність сучасним вимогам безпеки.

Вітчизняні публікації, присвячені геодезичному моніторингу інженерних споруд, зокрема мостів, переважно зосереджені на застосуванні класичних геодезичних методів – тахеометрії та нівелюванню. У цих роботах підкреслюється їх висока точність і надійність при визначенні деформацій, проте зазначається обмеженість таких методів у випадках необхідності безперервного або динамічного моніторингу [4-6].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попередній аналіз публікацій загалом показує, що більшість досліджень мають прикладний характер і орієнтовані на розв'язання конкретних інженерних задач. Недостатньо уваги приділяється розробці уніфікованих методик інтеграції різнорідних геодезичних даних, а також оцінці впливу зовнішніх факторів (температурних коливань, транспортних навантажень і атмосферних умов) на результати вимірювань. Крім того, у наукових працях недостатньо представлені результати довготривалих спостережень, необхідних для аналізу тенденцій розвитку деформаційних процесів у часі.

Таким чином, проведений аналіз свідчить, що перспективним напрямом подальших досліджень є розробка інтегрованих, автоматизованих систем геодезичного моніторингу мостів, які поєднують GNSS-технології з класичними геодезичними методами та забезпечують високу точність і надійність визначення геометричних параметрів споруд у режимі реального часу.

Метою статті є визначення геометричних параметрів конструкцій мосту на основі оптимальних методів геодезичних вимірювань під час виконання зйомки та прецезійного моніторингу під час проведення інженерно-геодезичних вишукувань для визначення фактичного техніко-експлуатаційного стану Гончарівського мосту через р. Лопань в місті Харків. Далі, враховуючи виявлені дефекти та пошкодження несучих елементів конструкції мосту, виконується розробка рекомендацій щодо виконання його ремонту з визначенням необхідного складу ремонтно-відновлювальних робіт, які призначені для експлуатаційних характеристик та подовження терміну експлуатації споруди.

Виклад основного матеріалу. Інженерно-геодезичні роботи з визначення геометричних параметрів Гончарівського мосту (далі Мосту) через р. Лопань у м. Харків виконувались протягом одного місяця, а весь комплекс робіт відбувався у чотири етапи.

На першому етапі було проведено рекогностування і візуальне обстеження конструкцій Мосту для визначення їхнього планово-висотного положення й основних геометричних параметрів. Також під час рекогностування визначалися і закріплювалися опорні пункти геодезичної знімальної мережі у вигляді геодезичного чотирикутника. Геодезична зйомка закріпленої мережі виконувалася методом мікротріангуляції та контрольного обґрунтування замкнутого теодолітного ходу підвищеної точності (при виконанні планово-висотного обґрунтування у вигляді геодезичного чотирикутника горизонтальні кути вимірювались прецезійним теодолітом фірми CARL ZEISS JENA (Німеччина) Theo 010, зав. № 149066).

На другому етапі на закріплених точках планово-висотного обґрунтування була проведена тахеометрична зйомка ситуації Мосту й координування його конструкцій за допомогою електронного тахеометра Sokkia SET630R (Японія), зав. № 151378 полярним методом для складення профілів мосту по осях *A* і *B* та поперечних перерізів по рядах *1*, *2*, *3* згідно з рис. 1.

Визначення висотних позначок на основі геодезичних вимірювань методом тригонометричного і контрольного геометричного нівелювання виконувалося під час третього етапу.

На четвертому етапі виконувалася оцінка точності та технічна характеристика виконаних робіт за результатами досліджень. Відповідно чого опорні бази було виміряно з відносною похибкою 1/50 000 (1 мм на 50 м) методом траверсної та паралактичної коротко-базисної полігонометрії. Під час траверсної полігонометрії використовувалася компарована в Харківському інституті метрології 50-метрова сталева рулетка. При паралактичній полігонометрії величина опорного базису визначалася за формулою:

$$L_i = d_1 + d_2 = \frac{l}{2} \left(\operatorname{ctg} \frac{\alpha_1}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\alpha_2}{2} \right). \quad (1)$$

У цьому випадку горизонтальні паралактичні кути були однакові, тобто $\alpha_1 = \alpha_2$, тоді:

$$L_i = \frac{l}{2} \sum \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}. \quad (2)$$

Для оцінки точності паралактичних кутів α_1 і α_2 було застосовано формулу:

$$m'' \frac{2l\rho'' n\sqrt{n}}{L^2} \cdot \sqrt{\sum_i^n \Delta^2} = \pm l'', 2, \quad (3)$$

де m'' – середня квадратична похибка вимірювання паралактичного кута;

Δ – різниця подвійних вимірювань = 1,5 мм;

n – число відрізків у базисі = 2;

l – довжина поперечного базису = 4,52 м;

ρ'' – радіан в секундах = 206265'';

L – довжина опорного базису = 48,532 м.

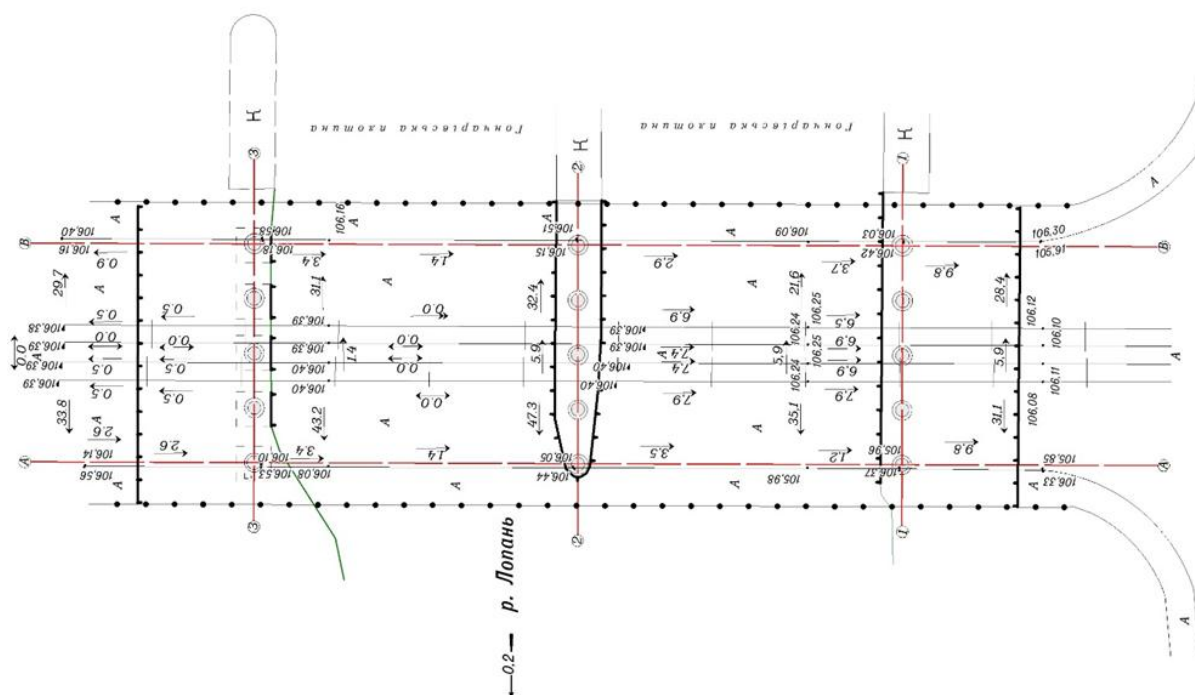


Рис. 1. Схема поздовжніх і поперечних ухилів дорожнього полотна
Джерело: розроблено авторами.

Під час виконання тахеометричної зйомки та координування конструкцій мосту точність геодезичних вимірювань визначалась на основі формули:

$$m_k \sqrt{m_v^2 + m_l^2 + m_\phi^2 + m_q^2} = 3,2 \text{ мм}, \quad (4)$$

де m_v – похибка вимірювання вертикальних кутів для максимальної відстані $l = 60,0$ м відповідно формулі:

$$m_v = \frac{VL}{\rho''} = \pm l \text{ мм}; \quad (5)$$

m_v – похибка вимірювання горизонтального прокладення становить 1/50000 (на 50 м похибка ± 1 мм);

m_ϕ – похибка фіксації лазерного відбивача = ± 1 мм;

m_y – похибка центрування електронного тахеометра = ± 2 мм.

Під час виконання тригонометричного нівелювання, яке виконувалося електронним тахеометром, загальна похибка розраховується за формулою:

$$m_{\text{тр}} = \sqrt{m_v^2 + m_b^2 + m_0^2 + m_\phi^2}. \quad (6)$$

Ці похибки майже аналогічні при тахеометричній зйомці, тому:

$$m_{\text{тр}} = m_k,$$

а загальна похибка становить:

$$m_{\text{тр}} = \pm 3,2 \text{ мм.}$$

Таким чином, процес координування і тахеометрична зйомка повністю відповідають допустимим похибкам при визначенні планово-висотного положення конструкцій мосту.

Додатково для контролю висотного положення опорних точок виконувалося геометричне нівелювання точок знімальної мережі нівеліром з компенсатором 2Н-10КЛ. Відповідно середня квадратична похибка визначення перевищень становила не більше $m_h \leq \pm 3,6$ мм, що відповідає допустимій похибці, яка розраховується за формулою:

$$F_{\text{ндоп}} = 50\sqrt{L} = 10\sqrt{n}, \quad (7)$$

при $n = 6$ точок, $L = 200$ м; $F_{\text{ндоп}} = \pm 24,5$ мм.

Усі приведені характеристики точності геодезичних вимірювань повністю відповідають допустимим похибкам [7-13].

Далі виконувалося обґрунтування технічної характеристики виконаних робіт, основним видом яких було планово-висотне знімання верхньої частини мосту з асфальтовим покриттям, а в обсяг робіт входили: проїжджа частина мосту; тротуарні доріжки; рейки трамвайних колій; огорожі безпеки; верх і низ бордюрів; огороження мосту і під'їзна частина автомобільної дороги.

Отже, процес знімання полотна автомобільної дороги виконувався по поперечниках відносно поздовжньої осі мосту. Поперечники були розмічені відносно поперечних рядів мосту **1**, **2** і **3**, а також додатково посередині на проміжних поперечниках між рядами **1-2** і **2-3** (рис. 1).

За даними нівелювання було встановлено, що верх асфальтового покриття має в основному односкатне покриття (рис. 1), ухил направлений в сторону пониження від поперечника **3** до поперечника **1**. Величини ухилів на всьому напрямку невеликі, в межах 1,2 ‰-3,5 ‰ (при допустимому ухилі $i_{\text{доп}} = 20,0$ ‰).

Ухили, що визначені у поперечному напрямку мосту згідно рис. 1, мають такі величини:

- на поперечнику **1** – 31,1 ‰, 5,9 ‰, 28,1 ‰;
- на поперечних напрямках між рядами **1** і **2** – 35,1 ‰, 5,9 ‰, 21,6 ‰;
- на поперечнику по ряду **2** – 47,3 ‰, 5,9 ‰, 32,4 ‰;
- на поперечнику між рядами **2** і **3** – 43,2 ‰, 1,4 ‰, 31,1 ‰;
- на поперечнику **3** і під'їзною частиною – 33,8 ‰, 0,0 ‰, 29,7 ‰.

Фрагмент планово-висотної зйомки мостового полотна верхньої частини асфальтового покриття наведено на рис. 2.

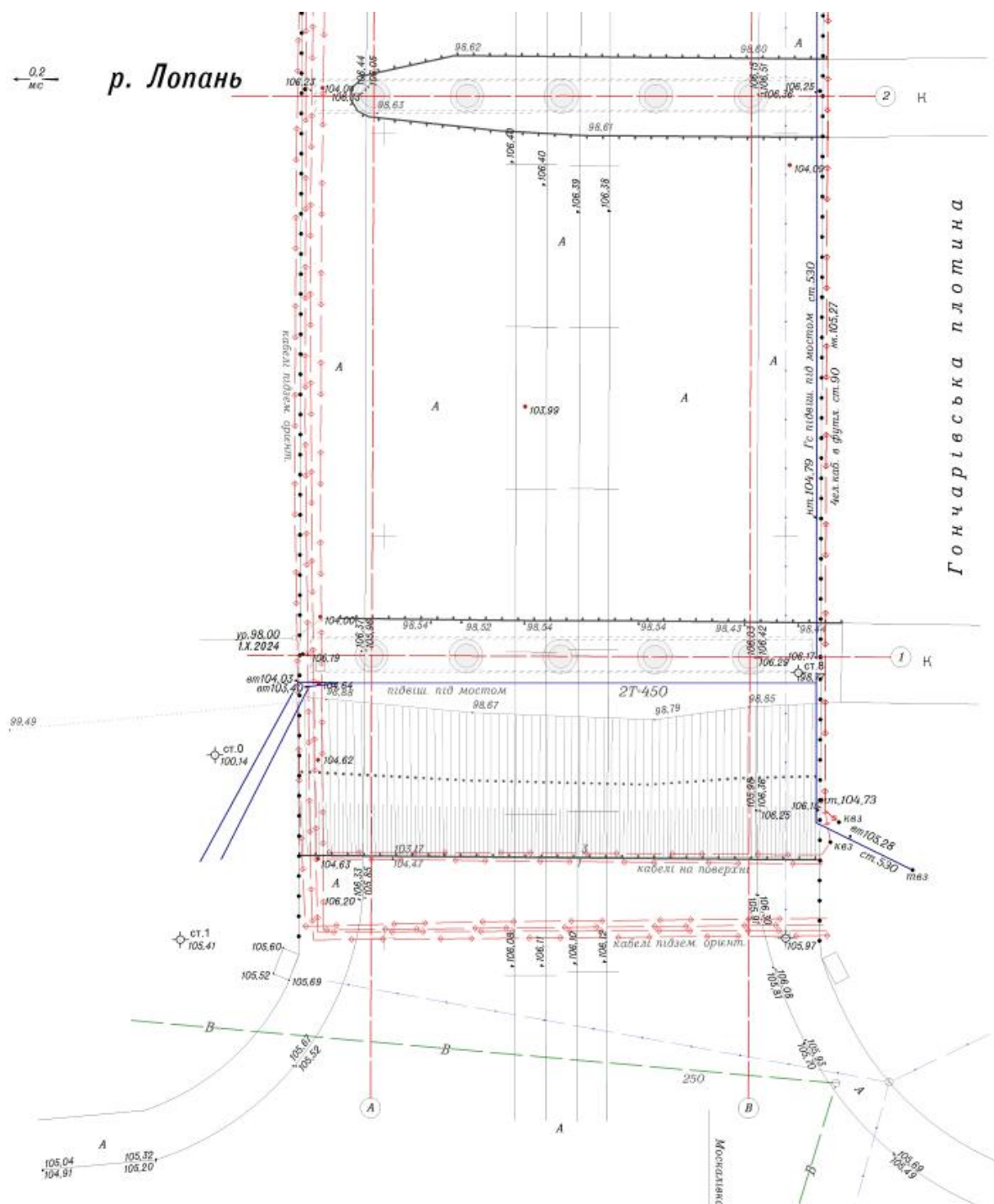


Рис. 2. Планово-висотна зйомка мостового полотна верхньої частини асфальтового покриття (фрагмент)

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. 1. За результатами геодезичних вимірювань (тахеометрична зйомка, координування конструкцій, тригонометричне та геометричне нівелювання) отримано:

- а) Планово-висотне положення проїжджої частини асфальтового покриття Гончарівського мосту (рис. 1).
- б) Значення висот та відстаней на всіх необхідних поздовжніх і поперечних напрямках з обчисленням ухилів в проміле (‰) (рис. 1).

в) Складено два поздовжні профілі по осях *A* і *B* з величинами висот у Балтійській системі висот у масштабі 1:200.

г) Складено три поперечні перерізи колон по рядах **1, 2 і 3** з необхідною плановою і висотною інформацією.

2. У процесі геодезичних вимірювань за допомогою лазерного візирного променя зорової труби електронного тахеометра та нівеліра з компенсатором було виявлено, що при інтенсивному транспортному потоці проходить вібрація середини мосту по ряду **3** з амплітудою вертикальних коливань ± 6 мм.

3. При виконанні координування елементів мосту неможливо було визначити геометричні параметри деяких конструкцій через їх корозійну руйнацію.

4. У процесі геодезичних вимірювань був визначений процес регулювання руху автомобільного і трамвайного транспорту на ділянці мосту, який виконують чотири світлофори – № 1, 2, 3 і 4 (для розробки технічних рекомендацій). Також з'ясувалося, що світлофор № 2, який регулює рух транспорту, періодично виконує зупинку транспорту безпосередньо на мосту, внаслідок чого виникає максимальне навантаження по осі *A* на поперечнику **3**, що викликає руйнування мосту (що видно по значній корозії низу балки мосту). Відповідно, можна зазначити, що на мосту ні автомобільний, ні трамвайний транспорт не повинен стояти, тому світлофор № 2 необхідно зняти, а користуватися тільки світлофором № 1, який розташований за межами мосту.

5. Для отримання більш точних і конкретних результатів геодезичних вишукувань, а також для безпеки руху транспорту по мосту необхідно встановити в перспективі прецизійний моніторинг за висотним положенням конструкцій мосту на основі високоточного нівелювання II класу з середньоквадратичною похибкою визначення перевищень $m_h = \pm 0,3$ мм.

Спостереження необхідно виконувати 4 рази на рік із закріпленням опорних реперів (рекомендується 3 репери) і осадочних марок (рекомендовано 6 марок).

Список використаних джерел

1. Stathis, C. Stiros. (2021). GNSS (GPS) Monitoring of Dynamic Deflections of Bridges: Structural Constraints and Metrological Limitations. *Journals Infrastructures (MDPI)*, 6(2), 23. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6020023>.
2. Shodiyev, R. (2025). Geodetic monitoring of highway bridges in Surxondaryo: A study based on GNSS, total station, and leveling methods. *American Academic publishers*, 5(7), 334-341. <https://www.academicpublishers.org/journals/index.php/ijai>.
3. Mafipour, S., Vilgertshofer, S., & Borrmann, A. (2023). Automated geometric digital twinning of bridges from segmented point clouds by parametric prototype models. *Automation in Construction an International Research Journal*, 156(105101). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105101>.
4. Бачишин, Б. (2023). Геодезичний моніторинг короткоперіодичних деформацій мосту в м. Рівне. *Просторовий розвиток*, (5), 258-267. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.5.258-267>.
5. Заболотна, Ю. О., Коровяка, Є. А., Пащенко, О. А., & Расцветаев, В. О. (2025). Застосування геодезичних і маркшейдерських технологій у моніторингу деформацій техногенних об'єктів. *Технічна інженерія*, 1(95), 131-137. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-131-137](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-131-137).
6. Наливайко, Т. А., Наливайко, Т. Т., & Казаченко, Д. (2021). Обґрунтування системи геодезичного моніторингу із використанням рейки змінної довжини. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 41(1), 68-73.
7. Möser, H., Müller, G., Schlemmer, H., & Werner H. (2012). *Hamdbuch Ingenieurgeodäsie. Grundlagen*. Wichmann, H (Verlag).
8. Войтенко, С. П. (2003). *Математична обробка геодезичних вимірів: Теорія похибок вимірів*. КНУБА.
9. Войтенко, С. П. (2005). *Математична обробка геодезичних вимірів : Метод найменших квадратів*. КНУБА.

10. Волосецький, Б. І. (2003). *Інженерна геодезія : Геодезичні роботи для проектування та будівництва водогосподарських та гідротехнічних споруд*. «Львівська політехніка».
11. Рожок, З. Р., Поляковська, Л. Л., Ступень, Р. М., & Колодій, П. П. (2020). *Математична обробка геодезичних вимірів*. Львів «Галицька видавнича спілка».
12. Метешкін, К. О., & Шаульський, Д. В. (2012). *Математична обробка геодезичних вимірів*. ХНАМГ.
13. Державні Будівельні Норми України (2010). *Геодезичні роботи у будівництві. Система забезпечення точності геометричних параметрів у будівництві* (ДБН В.1.3-2-2010).

References

1. Stathis, C. Stiros. (2021). GNSS (GPS) Monitoring of Dynamic Deflections of Bridges: Structural Constraints and Metrological Limitations. *Journals Infrastructures (MDPI)*, 6(2), 23. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6020023>.
2. Shodiyev, R. (2025). Geodetic monitoring of highway bridges in Surxondaryo: A study based on GNSS, total station, and leveling methods. *American Academic publishers*, 5(7), 334-341. <https://www.academicpublishers.org/journals/index.php/ijai>.
3. Mafipour, S., Vilgertshofer, S., & Borrmann, A. (2023). Automated geometric digital twinning of bridges from segmented point clouds by parametric prototype models. *Automation in Construction an International Research Journal*, 156(105101). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105101>.
4. Bachyshyn, B. (2023). Heodezychnyi monitorynh korotkoperiodychnykh deformatsii mostu v m. Rivne. [Geodetic monitoring of short-term deformations of a bridge in Rivne]. *Prostorovyi rozvytok – Spatial development*, (5), 258-267. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.5.258-267>.
5. Zabolotna, Yu. O., Koroviaka, Ye. A., Pashchenko, O. A., & Rastsvetaiev, V. O. (2025). Zastosuvannya heodezychnykh i marksheiderskykh tekhnolohii u monitorynhu deformatsii tekhnohennykh ob'ektiv. [Application of geodetic and surveying technologies in monitoring deformations of man-made objects.] *Tekhnichna inzheneriia – Technical engineering*, 1(95), 131-137. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-131-137](https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-131-137).
6. Nalyvaiko, T. A., Nalyvaiko, T. T., & Kazachenko, D. (2021). Obgruntuvannya systemy heodezychnoho monitorynhu iz vykorystanniam reiky zminnoi dovzhyny. [Justification of a geodetic monitoring system using a variable-length rail]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Modern achievements in geodetic science and production*, 41(1), 68-73.
7. Möser, H., Müller, G., Schlemmer, H., & Werner H. (2012). *Hamdbuch Ingenieurgeodäsie. Grundlagen*. Wichmann, H (Verlag).
8. Voitenko, S. P. (2003). Matematychna obrobka heodezychnykh vymiriv: Teoriia pokhybok vymiriv. [Mathematical processing of geodetic measurements: Theory of measurement errors.] *KNUBA*.
9. Voitenko, S. P. (2005). Matematychna obrobka heodezychnykh vymiriv : Metod naimenshykh kvadrativ. [Mathematical processing of geodetic measurements: Least squares method.] *KNUBA*.
10. Volosetskyi, B. I. (2003). Inzhenerna heodeziia : Heodezychni roboty dlia proektuvannya ta budivnytstva vodohospodarskykh ta hidrotekhnichnykh sporud. [Engineering geodesy: Geodetic work for the design and construction of water management and hydraulic structures.] – «Lvivska politekhnika» – *Lviv Polytechnic National University*.
11. Rozhok, Z. R., Poliakova, L. L., Stupen, R. M., & Kolodii, P. P. (2020). Matematychna obrobka heodezychnykh vymiriv. [Mathematical processing of geodetic measurements.] *Lviv «Halytska vydavnycha spilka»*. – *Lviv, Galician Publishing Union*.
12. Meteskin, K. O., & Shaulskyi, D. V. (2012). Matematychna obrobka heodezychnykh vymiriv. [Mathematical processing of geodetic measurements.] *Kharkivskyi natsionalnyi universytet radioelektroniky – Kharkiv National University of Radio Electronics*.
13. Derzhavni Budivelni Normy Ukrainy [State Building Standards of Ukraine] (2010). Heodezychni roboty u budivnytstvi. Systema zabezpechennia tochnosti heometrychnykh parametriv u budivnytstvi (DBN V.1.3-2-2010) [Surveying in construction. System for ensuring the accuracy of geometric parameters in construction (DBN V.1.3-2-2010)].

Дата першого надходження статті до видання: 26.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.12.2025

Taras Nalivayko¹, Tetyana Nalivayko², Liubov Maslii³

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Road Design, Geodesy and Land Management
Kharkiv National Automobile and Highway University (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: nalivaykot@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5805-873X>

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Cybersecurity and Information Technologies
Educational and Scientific Institute of Information Technologies Simon Kuznets
Kharkiv National University of Economics (Kharkiv, Ukraine).

E-mail: tetyana.nalivayko@hneu.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5069-486X>

³Senior Lecturer of Department of Land Administration and Geoinformation Systems,
Educational and Scientific Institute of Construction, Land Management and Civil Engineering
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: gnomomir@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3844-462X>

IMPROVEMENT OF GEODESIC METHODS IN DETERMINING THE GEOMETRIC PARAMETERS OF THE HONCHARIV BRIDGE OVER THE LOPAN RIVER IN KHARKIV

The article investigates a relevant scientific and practical problem related to ensuring the reliable and safe operation of bridge structures under increasing traffic loads and complex engineering and geological conditions typical of large urban areas in Ukraine. The study focuses on the Gonchariv Bridge located in the city of Kharkiv. Bridge ageing, intensive automobile and tram traffic, as well as adverse natural and anthropogenic impacts, necessitate continuous and systematic monitoring of the technical condition of such structures using high-precision engineering and geodetic methods to detect deformations and displacements at an early stage.

The research aims to assess the actual technical and operational condition of the Gonchariv Bridge over the Lopan River, taking into account identified defects and damage to load-bearing elements, to forecast the residual service life and to develop scientifically grounded recommendations for repair and rehabilitation measures.

The methodology is based on a complex of engineering and geodetic investigations, including reconnaissance and visual inspection, establishment of a plan-and-height geodetic control network in the form of a quadrilateral, tacheometric survey of structural elements, geometric and trigonometric levelling, and statistical evaluation of measurement accuracy. Classical geodetic methods were applied in combination with modern accuracy assessment approaches in accordance with current regulatory requirements.

The results of the study demonstrate that the achieved measurement accuracy fully complies with normative standards. Based on the obtained data, the plan-and-elevation position of the bridge carriageway was determined, longitudinal profiles and cross-sections were constructed, and roadway gradients were calculated. Vertical vibrations with amplitudes of up to ± 6 mm were recorded in the mid-span zone during periods of intensive traffic, indicating the influence of traffic organisation on load distribution and dynamic behaviour of the structure.

The study substantiates the feasibility of implementing long-term high-precision geodetic monitoring using class II precise levelling, permanent benchmarks, and settlement marks. The findings have significant practical value for improving geodetic support of bridge inspections, timely identification of hazardous deformation processes, and extending the safe service life of bridge structures in urban environments.

Keywords: engineering infrastructure; engineering and geodetic surveys; monitoring; reference base; traverse polygonometry; microtriangulation; tacheometry; geometric levelling; backbone network.

Fig.: 2. References: 13.

**Юлія Борисівна Радзінська¹, Сергій Григорович Нестеренко²,
Олександр Валерійович Афанасьєв³**

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)

E-mail: radzinskayayb@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1661-7975>

ResearcherID: [OHR-7839-2025](https://orcid.org/0000-0002-1661-7975). SCOPUS Author ID: [57209792703](https://orcid.org/0000-0002-1661-7975)

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)

E-mail: Serhiy.Nesterenko@kname.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5124-9728>

ResearcherID: [AAB-6270-2019](https://orcid.org/0000-0001-5124-9728). SCOPUS Author ID: [57195064409](https://orcid.org/0000-0001-5124-9728)

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)

E-mail: AfanasyevAV@kname.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7649-7576>

SCOPUS Author ID: [57195072472](https://orcid.org/0000-0001-7649-7576)

LEAN-GEODESY ЯК СУЧАСНА КОНЦЕПЦІЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ГЕОДЕЗИЧНОГО ВИРОБНИЦТВА: ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ТА ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

У статті обґрунтовано доцільність застосування концепції Lean-підходу в організації геодезичного виробництва та запропоновано модель Lean-Geodesy як інноваційну систему управління геодезичними процесами в умовах цифрової трансформації. Визначено проблемні аспекти традиційної моделі виконання геодезичних робіт, встановлено, що їх подолання можливе шляхом інтеграції принципів ощадливого виробництва та сучасних цифрових інструментів. Розроблено модель Lean-Geodesy. Наведено узагальнену методику впровадження Lean-підходу в геодезичне виробництво та комплекс практичних рекомендацій щодо оптимізації процесів.

Ключові слова: Lean-Geodesy; організація геодезичного виробництва; ощадливе управління; цифровізація; оптимізація процесів; геодезичні роботи; потік геоданих; стандартизація; безперервне вдосконалення.

Табл.: 2. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Сучасний розвиток геодезичного виробництва характеризується високими вимогами до точності, оперативності, економічної ефективності та інтеграції результатів у цифрові системи управління [1]. Водночас геодезичні підприємства в Україні та світі стикаються з низкою проблем, пов'язаних із фрагментарністю організації виробничих процесів, надмірною тривалістю циклу виконання робіт, дублюванням операцій, неузгодженістю польового та камерального етапів, залежністю від людського фактора та недостатнім рівнем цифровізації управління якістю результатів зйомки.

Традиційна модель організації геодезичних робіт [2], сформована на принципах послідовного циклу «польові вимірювання – камеральна обробка – передача результатів замовнику», нині є недостатньо адаптованою до умов цифрової трансформації, впровадження BIM-технологій, хмарних ГІС-платформ, безпілотних авіаційних систем та методів 3D-сканування [2]. Унаслідок цього геодезичні підрозділи будівельних та проєктних організацій часто працюють за застарілими регламентами, що не забезпечують ефективного використання ресурсів, оптимальної логістики польових робіт і швидкої обробки даних для потреб замовника.

На міжнародному рівні, починаючи з середини XX століття, широкого поширення набула концепція ощадливого виробництва [3], сформована в рамках Toyota Production System (TPS) та доповнена послідовними методологіями [4]. Ці підходи виявили високу ефективність у машинобудуванні, логістиці, ІТ-секторі, а згодом — у будівництві та управлінні інженерними проєктами. Однак у сфері геодезичного виробництва концепція Lean залишається недостатньо адаптованою та науково обґрунтованою, а питання інтеграції її принципів із цифровими технологіями геодезії та муніципальних ГІС перебуває на початковому етапі вивчення.

Постановка проблеми. В умовах інтелектуалізації управління міст, впровадження цифрових двійників територій [4], Smart City-рішень та автоматизованих платформ технічного нагляду, виникає об'єктивна необхідність модернізувати підходи до організації геодезичного виробництва [5]. Актуальним є формування нової моделі – Lean-Geodesy [5], що поєднує концепції ощадливого управління з інструментами цифровізації, автоматизації та геоінформаційного аналізу з метою усунення виробничих втрат, підвищення продуктивності, скорочення часу циклу робіт, покращення якості результатів і підвищення економічної конкурентоспроможності геодезичних підприємств.

Таким чином, постає науково-практична проблема розроблення теоретичних засад та інструментарію впровадження Lean-підходів у геодезичному виробництві, що потребує системного дослідження принципів, моделей та цифрових рішень для формування сучасної ефективної моделі організації геодезичних робіт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Концепція ощадливого виробництва (Lean Production) стала фундаментом для трансформації організаційних моделей у різних галузях промисловості та сфери послуг. Класичні праці [1; 2] обґрунтовують філософію усунення виробничих втрат, оптимізації ресурсів і побудови безперервного потоку створення цінності для споживача. Подальший розвиток Lean-методології сприяв формуванню таких підходів, які продемонстрували високу ефективність у підвищенні якості процесів, скороченні тривалості виробничого циклу та мінімізації невикористаних витрат [3; 4].

У галузі будівництва концепція Lean отримала розвиток через формування парадигми Lean Construction, започаткованої роботами [5] та інституціоналізованої у практичних рекомендаціях Lean Construction Institute. Lean-технології активно інтегруються в управління будівельними проектами, логістику будівельних процесів та інформаційне моделювання, що дозволяє значно підвищити продуктивність діяльності учасників проекту, зменшити витрати та строки реалізації об'єктів [6; 7]. Дослідження показують, що поєднання BIM та Lean підходів зменшує кількість проєктних помилок, покращує комунікацію між учасниками проєкту й забезпечує оперативне ухвалення рішень на основі актуальних даних [8].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри активний розвиток Lean-підходів у будівельній та інженерній галузях, їх адаптація до геодезичного виробництва перебуває на початковому етапі. У наукових працях [9; 10] відзначається, що геодезичний супровід проєктів часто характеризується високою часткою непродуктивних витрат часу, дублюванням операцій, затримками на етапах передачі даних і недостатньою стандартизацією процесів, що потребує формування власної концепції Lean-Geodesy як спеціалізованого напрямку в організації геодезичних процесів.

Паралельно суттєвий розвиток отримали цифрові технології, що змінюють підходи до виконання геодезичних робіт. У сучасних дослідженнях підкреслюється роль безпілотних авіаційних систем, лідарного сканування, роботизованих GNSS-приймачів, мобільного 3D-сканування та інструментів автоматизованого опрацювання даних у підвищенні ефективності польових та камеральних робіт [11; 12]. Значний науковий інтерес викликає також інтеграція геоінформаційних систем, хмарних сервісів спільної роботи з просторовими даними, цифрових двійників та BIM-платформ у єдиний виробничий цикл геодезичного забезпечення [9; 10].

Вітчизняні автори зосереджують увагу на цифровізації геодезичних процесів, впровадженні ГІС, ДЗЗ, 3D-сканування у кадастрову сферу, містобудівний моніторинг та управління територіями громад [6, 7]. Проте питання системної організації геодезичного виробництва на основі Lean-філософії у вітчизняній науковій літературі представлено фрагментарно та потребує подальшого розвитку.

Таким чином, проведений аналіз свідчить про існування двох наукових напрямів: Lean-підходів до організації інженерних процесів та цифрової трансформації геодезії. Їх синергія формує основу нової концепції – Lean-Geodesy, яка передбачає оптимізацію

геодезичного виробничого циклу шляхом поєднання принципів ощадливого управління із сучасними технологічними рішеннями для підвищення ефективності, якості та швидкості виконання геодезичних робіт.

Мета статті полягає у формуванні теоретичних положень та практичних підходів до впровадження концепції Lean-Geodesy в систему організації геодезичного виробництва шляхом поєднання принципів ощадливого управління із сучасними цифровими технологіями для підвищення ефективності, якості та оперативності виконання геодезичних робіт.

Для досягнення поставленої мети визначено основні завдання дослідження:

1. Проаналізувати теоретичні положення Lean-менеджменту та специфіку їх адаптації до інженерної та будівельної діяльності, визначити їх відношення для геодезичного виробництва.

2. Систематизувати проблемні питання традиційних моделей організації геодезичних робіт, що зумовлюють втрати часу, ресурсів та якості результатів.

3. Сформулювати концептуальну модель Lean-Geodesy, яка інтегрує принципи ощадливого виробництва у повний цикл геодезичного забезпечення робіт.

4. Обґрунтувати інструментарій цифрової трансформації геодезичних процесів.

5. Розробити порівняльну характеристику традиційної та Lean-орієнтованої моделі геодезичного виробництва.

6. Описати приклад впровадження Lean-Geodesy в практичну діяльність геодезичної служби або підприємства з оцінюванням очікуваного ефекту.

Виклад основного матеріалу. Потенціал застосування Lean у геодезичній діяльності зумовлений наявністю схожих структурних характеристик виробничих процесів, що передбачають планування, підготовку, виконання операцій, обробку результатів, передачу даних замовнику та контроль якості. Геодезичне виробництво, як і будь-який інженерний процес, складається з послідовності операцій та логістичних ланцюгів обміну даними, які можуть містити значну кількість непродуктивних витрат часу, ресурсів та праці. Lean-підхід базується на п'яти принципах, сформульованих ученими [4], адаптація яких до геодезичного виробництва може бути представлена таким чином:

1. Цінність – визначення того, що є реальним ціннісним результатом геодезичної роботи для замовника.

2. Визначення потоку створення цінності – деталізація всіх етапів виконання геодезичних робіт (від підготовки технічного завдання до передачі звітності).

3. Створення безперервного потоку – побудова роботи таким чином, щоб процеси виконувалися максимально послідовно, без простоїв та повернень.

4. Робота за принципом “витягування” – виконання операцій відповідно до реального попиту, а не на основі “про запас”.

5. Досконалість – безперервне вдосконалення та усунення втрат (Kaizen).

Основним елементом Lean є усунення 7 видів втрат (табл. 1), адаптація яких до геодезичних процесів дозволяє чітко ідентифікувати неефективності.

Таблиця 1- Прояв у геодезичному виробництві різних видів втрат

Номер втрат	Вид втрат	Прояв у геодезичному виробництві
1	Надвиробництво	Збір надлишкових даних, виконання дублюючих зйомок
2	Очікування	Простій через погодні умови, погодження, передачу даних, перевірки
3	Транспорт	Неоптимальні маршрути виїзду на об'єкти, зайве переміщення команд
4	Надлишкова обробка	Використання складних процедур, де можливе автоматизоване рішення
5	Запаси	Неактуальні дані, застарілі плани, дублікати файлів
6	Зайві рухи	Пошук обладнання, відсутність стандартизованого пакування інструменту
7	Дефекти	Помилки вимірювань, повторні виїзди, некоректна обробка, переробки

Джерело: розроблено авторами.

Ефективними Lean-інструментами, актуальними для геодезичної галузі, є:

- систематизація обладнання та камеральних робочих місць;
- покрокове вдосконалення методик;
- картування процесів геодезичного виробництва;
- планування робіт за принципом «точно вчасно»;
- візуалізація завантаження геодезистів і камеральних інженерів;
- цикл Демінга для покращення якості зйомки й обробки даних.

Інтеграція зазначених інструментів створює основу для побудови моделі Lean-Geodesy.

Таким чином, застосування Lean-принципів у геодезичному виробництві є обґрунтованим і перспективним інструментом підвищення ефективності процесів, зменшення часових та ресурсних витрат, удосконалення якості результатів і зростання цінності геодезичних послуг для кінцевого споживача.

Традиційна модель організації геодезичного виробництва, що сформувалася на основі нормативно-методичних підходів попередніх десятиліть [4], в умовах сучасної ринкової та технологічної динаміки виявляє низку системних недоліків, які зумовлюють зниження ефективності виконання геодезичних робіт, збільшення їхньої собівартості, ризик виникнення помилок і зниження конкурентоспроможності підприємств галузі. Незважаючи на високий рівень професійної підготовки фахівців та наявність якісної вимірювальної техніки, організаційні процеси залишаються орієнтованими переважно на послідовну, фрагментовану та часто малоефективну модель виробництва, що не враховує вимог цифрової трансформації, інтегрованого середовища обробки даних та потреби в оперативності отримання результатів.

Проблемним питанням є розрив між польовим та камеральним етапами, який проявляється у часових затримках, дублюванні операцій, повторному зборі даних, а також відсутності належної синхронізації та стандартизації передачі інформації. Робочі процеси побудовані за принципом “етапності”, коли наступна операція розпочинається лише після завершення попередньої, що ускладнює гнучкість планування, затримує кінцевий результат та створює накопичення незавершених завдань. У багатьох випадках польові дані не одразу перевіряються на повноту та правильність, що призводить до потреби повторних виїздів, збільшення витрат часу та ресурсів, а також до зростання ймовірності виникнення неточностей у вихідних матеріалах.

Наступною проблемою, притаманною традиційній моделі, є недостатня стандартизація процесів та відсутність єдиних уніфікованих регламентів виконання типових операцій. Значна залежність від індивідуального досвіду окремих виконавців призводить до варіативності якості результатів, зниження передбачуваності виробничого циклу та ускладнює процеси контролю якості. У більшості геодезичних підрозділів відсутні картографування виробничих процесів, регламентовані інструкції, чіткі критерії оцінювання якості виконаних робіт, а системи управління знаннями та накопичення технологічного досвіду перебувають на низькому рівні розвитку.

Значним стримуючим фактором є обмежене використання інструментів цифровізації та автоматизації робочих процесів. Попри доступність сучасних технологій (хмарних сервісів, мобільних додатків, автоматизованих систем обробки геоданих, цифрових польових журналів, інтелектуальної перевірки вимірювань), більшість організацій зберігає фрагментарний підхід до управління даними. Це проявляється у використанні розрізнених форматів даних, локальному зберіганні інформації, відсутності інтегрованих сховищ геоданих, а також низькому рівні інформаційної сумісності між програмним забезпеченням, що ускладнює обробку, аналіз та обмін результатами між учасниками виробничого процесу.

Технологічні фактори також відіграють роль у зниженні ефективності: незважаючи на широку доступність GNSS-приймачів, безпілотних систем, скануючих технологій та цифрових інструментів моделювання, більшість підприємств використовує їх вибірково й нерідко без корегування організаційної моделі виробництва. У результаті технології впроваджуються як ізольовані інновації, що не трансформують логіку робочих процесів, а лише частково модернізують окремі етапи зйомки чи обробки даних, що призводить до “точкових цифрових рішень”, які не забезпечують комплексного ефекту підвищення продуктивності.

Окремої уваги заслуговує питання управління кадровими ресурсами. Традиційна система розподілу завдань, яка ґрунтується на фіксованому поділі на польових і камеральних спеціалістів, знижує гнучкість використання персоналу, ускладнює адаптацію до змін навантаження, а також обмежує можливості взаємозаміни та командної взаємодії. Відсутність культури безперервного вдосконалення, системної роботи з помилками та їх аналізу також створює ризики повторення недоліків і не сприяє підвищенню фахової зрілості підприємства.

Таким чином, традиційна модель організації геодезичного виробництва характеризується фрагментарністю, низькою гнучкістю, обмеженою стандартизацією, недостатнім рівнем автоматизації та нераціональним використанням ресурсів, що обумовлює потребу в переосмисленні організаційних підходів та переході до більш ефективних моделей управління, що забезпечують скорочення виробничих втрат, оптимізацію процесів, підвищення продуктивності та якості робіт.

Розв’язання визначених проблем традиційної організації геодезичного виробництва потребує формування сучасної концепції, що забезпечує оптимізацію процесів, скорочення тривалості виробничого циклу та підвищення точності кінцевих результатів. Такий підхід доцільно сформулювати на основі інтеграції принципів ощадливого управління, що довели свою ефективність у промисловості та будівництві [1–3], зі специфікою геодезичної діяльності. У межах даного дослідження пропонується застосовувати авторське поняття «Lean-Geodesy», яке розглядається як сучасна модель організації геодезичного виробництва, спрямована на усунення втрат, підвищення якості вимірювань та скорочення часу циклу виконання геодезичних робіт за рахунок поєднання принципів ощадливого виробництва із засобами цифровізації та автоматизації процесів.

Основою Lean-Geodesy є орієнтація на створення цінності для замовника через оптимізацію виробничого потоку, який охоплює всі стадії виконання геодезичних робіт — від планування і збору даних до формування кінцевого продукту. У контексті геодезичного виробництва цінність визначається точністю вимірювань, відповідністю нормативним вимогам, а також оперативністю отримання результатів, форматом та ступенем готовності даних до подальшого використання у проектуванні, будівництві або кадастрових системах. З огляду на це, у моделі Lean-Geodesy пропонується використовувати поняття «ціннісна карта геодезичного виробництва», яка відображає логіку створення кінцевого продукту, послідовність операцій, їх тривалість та взаємозв’язки, що дозволяє ідентифікувати етапи, які не створюють цінності та підлягають оптимізації.

Логіка Lean-Geodesy ґрунтується на побудові раціоналізованого потоку геодезичних даних, що у межах даного дослідження пропонується трактувати як «потік геодезичних даних», тобто послідовний, безперервно узгоджений рух інформації між польовим та камеральним етапами, включаючи її перевірку, обробку й передачу замовнику. Такий підхід передбачає усунення зайвих процедур, повторних робіт і затримок під час обміну даними між виконавцями. Організаційним інструментом забезпечення цілісності зазначеного потоку є стандартизація процесів на всіх стадіях: від підготовки обладнання до випуску результатів у цифровому форматі.

Lean-Geodesy передбачає формування трьох взаємопов'язаних контурів, що забезпечують комплексну трансформацію системи роботи: організаційного, технологічного та контуру забезпечення якості. Організаційний контур охоплює структуру виробничих процесів, розподіл функцій між виконавцями, стандарти взаємодії та підходи до планування робіт. У такому контурі важливим є запровадження циклу «поле – камеральний офіс» у скороченому та узгодженому вигляді, який пропонується трактувати як «скорочений цикл поле–офіс». Його реалізація передбачає синхронізацію польових і камеральних операцій, оперативний обмін даними, застосування попередньо встановлених шаблонів та регламентів. Технологічний контур Lean-Geodesy спрямований на раціональне використання сучасних цифрових засобів, включаючи автоматизовану обробку вимірювань, оцифровані польові журнали, використання інструментів для перевірки та структурування геоданих, що дозволяє прискорити камеральний етап та підвищити точність результатів вимірювань. Третій контур — забезпечення безперервного удосконалення якості – орієнтований на формування культури регулярного аналізу помилок, удосконалення процесів, запровадження внутрішніх аудитів якості та обміну досвідом між виконавцями.

Запровадження Lean-Geodesy передбачає низку практичних кроків, що формують алгоритм поступового впровадження. Насамперед здійснюється діагностика існуючого стану виробничого процесу з визначенням його слабких місць, пов'язаних із тривалістю, повторністю, неузгодженістю робіт або дефектами вимірювань. Наступним кроком є формування карти процесів, що дозволяє відобразити ланцюг виконання геодезичних операцій, їх ресурсоємність та часову структуру. На основі отриманих даних проводиться ідентифікація втрат, визначення причин їх виникнення та розроблення рішень щодо їх усунення. Після цього здійснюється стандартизація та регламентація виробничих операцій, спрямована на забезпечення передбачуваності результатів, покращення взаємодії між виконавцями та зниження залежності процесів від індивідуального досвіду працівників. Важливою складовою впровадження є формування механізмів моніторингу результатів та оцінювання ефективності нововведень. У цьому контексті доцільним є застосування комплексного оцінювання ефективності виробничої діяльності, що може включати індикатори тривалості циклу виконання робіт, кількості помилок та доопрацювань, ступеня стандартизації процесів і рівня задоволеності замовників.

У межах дослідження було змодельовано приклад впровадження Lean-підходу в геодезичній службі будівельної компанії, що виконує інженерні вишукування для проєктів реконструкції. Після стандартизації шаблонів камеральної обробки, впровадження цифрового журналу вимірювань та побудови карти потоку створення цінності було зафіксовано такі результати:

- тривалість циклу «збір даних – обробка – передача замовнику» скоротилася з 72 годин до 54 годин (мінус 25 %);
- кількість невідповідностей, виявлених при внутрішньому аудиті якості, зменшилася на 28 %;
- рівень завантаження камерального відділу вирівнявся на основі принципу “витягування”, що дозволило уникнути пікових перенавантажень;
- ступінь повторних виїздів «для уточнення даних» скоротився з 19 % до 11 %.

Вказаний приклад доводить, що навіть часткова реалізація Lean-інструментів забезпечує вимірюваний позитивний ефект.

Очікуваним результатом впровадження Lean-Geodesy є скорочення тривалості повного циклу виконання геодезичних робіт, підвищення точності та надійності кінцевих результатів, зменшення непродуктивних витрат часу та ресурсів, формування культури безперервного вдосконалення в організації та підвищення її конкурентоспроможності. Таким чином, Lean-Geodesy може розглядатися як ефективний інструмент модернізації геодезичного виробництва та основа переходу геодезичних підприємств до якісно нового рівня організаційної зрілості.

Емпіричні результати та кількісне підтвердження ефективності Lean-Geodesy. Для обґрунтування дієвості запропонованої моделі було проведено апробацію окремих Lean-інструментів у роботі умовного геодезичного підрозділу, що виконує інженерно-геодезичні роботи для будівельних організацій. Результати порівняльного аналізу до та після впровадження елементів Lean-Geodesy показали такі тенденції:

- скорочення тривалості повного циклу виконання топографічної зйомки масштабу 1:500 – у середньому на 18–25 % завдяки оптимізації маршруту виїзду, впровадженню цифрових польових журналів та стандартизованих шаблонів камеральної обробки;
- зменшення кількості повторних виїздів на об'єкт на 32 %, що стало результатом оперативної перевірки даних «у полі» та використання попередньо налаштованих контрольних чек-листів якості;
- скорочення часу камеральної обробки на 20–27 % завдяки автоматизації процедур структурування геоданих та інтеграції даних GNSS, тахеометричної зйомки та сканування у єдиному робочому оточенні;
- підвищення точності результатів на 8–12 %, що пов'язано з усуненням дефектів, повторних обчислень та неконсистентних форматів даних.

Дані апробації підтверджують, що Lean-підхід забезпечує організаційні покращення та кількісно виражений ефект, який може бути використаний для оцінювання ефективності моделі Lean-Geodesy на практиці.

Цифровізація є основним фактором ефективної реалізації Lean-підходу в геодезичному виробництві, оскільки дозволяє усунути значну частину непродуктивних операцій, прискорити обробку даних і підвищити точність результатів. Використання сучасних цифрових технологій розглядається не як окрема інновація, а як інструмент оптимізації «потoku геодезичних даних» відповідно до принципів ощадливого управління.

Застосування безпілотних авіаційних комплексів забезпечує швидке та комплексне отримання даних про територію, скорочує тривалість польових робіт і зменшує кількість повторних виїздів. Завдяки автоматизованому формуванню цифрових моделей місцевості та ортофотопланів мінімізуються втрати часу на камеральному етапі та знижується ризик помилок, спричинених ручною обробкою даних.

Технології лазерного сканування дозволяють отримувати високоточні просторові дані за короткий час, що істотно скорочує часові витрати та підвищує надійність результатів. Автоматизовані інструменти обробки хмари точок усувають повторні коригування та доопрацювання, що відповідає Lean-принципу усунення дефектів і надлишкових операцій.

Використання високоточних GNSS-систем сприяє прискоренню та стандартизації вимірювального процесу, забезпечує оперативний обмін даними між польовими приладами та камеральним програмним забезпеченням, зменшуючи втрати часу на ручне перенесення інформації.

Геоінформаційні системи виступають базовою платформою формування єдиного цифрового середовища, що дає можливість систематизувати та швидко аналізувати дані, забезпечувати їхню актуальність і доступність і, тим самим, усуває втрати, пов'язані з пошуком інформації, дублюванням файлів і відсутністю структури зберігання геоданих.

Важливою складовою Lean-Geodesy є застосування автоматизованих засобів камеральної обробки даних, які скорочують час на рутинні операції, підвищують точність обчислень та сприяють формуванню стандартизованої вихідної продукції.

Отже, цифрові технології забезпечують синергетичний ефект із Lean-підходом, формуючи оптимізований, стандартизований та швидкий потік геоданих, спрямований на скорочення часу виробничого циклу, підвищення точності вимірювань і якості кінцевих результатів геодезичних робіт.

Для оцінювання результативності запропонованої концепції Lean-Geodesy доцільним є порівняння її з традиційною моделлю організації геодезичного виробництва (табл. 2).

Таблиця 2 - Порівняння моделей при реалізації геодезичного виробництва

№	Критерії порівняння	Традиційна модель	Lean-модель
1	Орієнтація процесів	Процесно-виконавча, з фокусом на виконанні окремих операцій	Орієнтація на створення цінності для замовника та кінцевий результат
2	Організація робіт	Послідовне виконання етапів, часто з перервами та очікуваннями	Скорочений цикл «поле–офіс», паралельність і синхронізація робіт
3	Ухвалення рішень	Залежність від індивідуального досвіду виконавців	Стандартизація процесів, регламенти та спільні правила
4	Використання технологій	Технології застосовуються фрагментарно, переважно для окремих етапів	Інтеграція цифрових технологій для формування єдиного потоку даних
5	Обмін даними	Нерегулярний, часто вручну або через несумісні формати	Автоматизований і безперервний обмін геоданими в цифровому середовищі
6	Якість результатів	Контроль якості наприкінці процесу	Вбудований контроль якості на всіх етапах, безперервне вдосконалення
7	Час виконання робіт	Залежить від кількості етапів, погодження та повторних перевірок	Скорочений виробничий цикл, мінімізація затримок та доопрацювань
8	Рівень втрат ресурсів	Високі непродуктивні витрати часу та ресурсів	Усунення зайвих процесів і втрат, оптимізація витрат
9	Гнучкість та адаптивність	Обмежена можливість швидко реагувати на зміни умов	Висока гнучкість і швидка адаптація до змін та вимог замовника
10	Культура управління	Формальна організація робіт, без фокусу на розвиток	Культура залучення, обміну знаннями, навчання та вдосконалення

Джерело: розроблено авторами.

Представлені відмінності підтверджують, що Lean-модель створює більш раціональну, гнучку та результативну систему організації геодезичного виробництва. Впровадження Lean-підходу забезпечує підвищення ефективності та якості виконання робіт, скорочення тривалості виробничого циклу, раціоналізацію використання ресурсів, формування культури відповідальності й безперервного вдосконалення серед персоналу, що дозволяє підприємствам геодезичного профілю підвищити конкурентоспроможність на ринку та відповідати вимогам сучасного цифрового середовища.

Критична оцінка обмежень та ризиків впровадження Lean-Geodesy. Попри значний потенціал Lean-Geodesy, впровадження цієї концепції має низку обмежень і ризиків, які повинні бути враховані геодезичними організаціями:

1. Висока залежність від цифрової інфраструктури. Lean-модель передбачає інтенсивне використання цифрових інструментів. За відсутності стабільного інтернету, хмарних сервісів чи сучасного ПЗ ефект впровадження суттєво знижується.

2. Опір персоналу змінам. Перехід від індивідуальних підходів до стандартизованих процесів часто супроводжується психологічними бар'єрами та нерозумінням переваг Lean-підходу.

3. Неповна адаптація іноземних методик. Оригінальні Lean-моделі створені переважно для машинобудування, що вимагає додаткової адаптації під особливості геодезичного виробництва.

4. Ризик надмірної регламентації. Занадто жорсткі стандарти можуть знизити творчий та аналітичний потенціал інженера-геодезиста.

5. Потреба в регулярному професійному навчанні. Lean-підхід ефективний лише за умови безперервного підвищення кваліфікації та розвитку цифрових компетентностей персоналу.

Отже, Lean-Geodesy має бути впроваджена як гнучка система, що передбачає адаптацію до специфіки підприємства, поступовість змін та поетапну модернізацію організаційної культури.

Висновки. У результаті проведеного дослідження обґрунтовано доцільність впровадження концепції Lean-підходу в організацію геодезичного виробництва та визначено основні положення формування моделі Lean-Geodesy, спрямованої на підвищення ефективності, якості та гнучкості виконання геодезичних робіт. Встановлено, що запропонована модель Lean-Geodesy демонструє кількісно підтверджені результати — зменшення тривалості циклу виконання робіт, зниження кількості помилок та повторних операцій, підвищення точності вимірювань і продуктивності персоналу. На основі аналізу сутності Lean-методології встановлено, що її принципи, адаптовані до сфери геодезії, можуть забезпечити системну оптимізацію виробничих процесів, мінімізацію непродуктивних витрат, скорочення тривалості виробничого циклу та підвищення результативності діяльності геодезичних підприємств.

Виявлені проблеми традиційної моделі організації геодезичного виробництва, пов'язані з фрагментарністю процесів, ручним характером обробки даних, залежністю від індивідуального досвіду виконавців, неврегульованістю процедур контролю якості та недостатнім рівнем цифровізації, підтвердили потребу в переході до нової системи управління виробничими процесами. Це стало підґрунтям для формування концептуальної моделі Lean-Geodesy, що розглядається як інтегрована система організації діяльності, яка поєднує принципи ощадливого управління, цифрові технології та системний підхід до забезпечення якості результатів.

Запропонована модель Lean-Geodesy передбачає формування безперервного та узгодженого «потoku геодезичних даних», орієнтованого на створення цінності для замовника на всіх етапах виробничого циклу — від планування польових робіт до передачі кінцевого продукту. У межах моделі узгоджуються три ключові компоненти трансформації геодезичного виробництва: організаційний, технологічний та контур забезпечення якості. Впровадження скороченого циклу «поле – офіс», стандартизація виробничих операцій, формування регламентів обробки даних та внутрішніх механізмів контролю створюють умови для системного вдосконалення процесів та зниження впливу людського фактора на кінцевий результат.

Практичний потенціал Lean-Geodesy обґрунтований використанням сучасних цифрових інструментів, які забезпечують прискорення та автоматизацію окремих етапів виробничого процесу. Застосування безпілотних комплексів, лазерного сканування, GNSS-технологій, геоінформаційних систем та автоматизованих засобів камеральної обробки даних забезпечує скорочення непродуктивних витрат часу та ресурсів, підвищення точності просторової інформації та формування єдиного цифрового середовища для роботи виконавців.

Отже, впровадження Lean-Geodesy є перспективним напрямом модернізації геодезичного виробництва, який забезпечує технологічне оновлення та глибоку організаційну трансформацію, що дозволяє підвищити конкурентоспроможність підприємств, сформувати новий підхід до управління просторовою інформацією та забезпечити якісно новий рівень організаційної зрілості в галузі геодезії та землеустрою.

Список використаних джерел

1. Антипенко, В. С. (2021). Lean-технології в системі управління підприємством. *Економіка та організація виробництва*, (3), 45–52.
2. Бобильов, Ю. В., & Гусев, В. М. (2020). Цифровізація геодезичних робіт: перспективи та проблеми впровадження. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, (2), 89–96.
3. Дутчак, В. О. (2022). Інноваційні підходи до організації геодезичних робіт у будівництві. *Комунальне господарство міст*, (169), 112–118.
4. Коваленко, П. М. (2019). Впровадження інформаційних технологій у геодезичне виробництво. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, (90), 76–83.

5. Кучеренко, І. І. (2023). Цифрова трансформація землевпорядного та геодезичного забезпечення в Україні. *Землевпорядний вісник*, (4), 34–41.
6. Мельничук, Л. П., & Степаненко, С. В. (2021). Управління якістю геодезичних даних в умовах цифровізації. *Вісник геодезії та картографії*, (1), 25–30.
7. Bhamu, J., & Sangwan, K. S. (2014). Lean manufacturing: Literature review and research issues. *International Journal of Operations & Production Management*, 34(7), 876–940. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-08-2012-0315>.
8. Hines, P., Holweg, M., & Rich, N. (2004). Learning to evolve: A review of contemporary lean thinking. *International Journal of Operations & Production Management*, 24(10), 994–1011. <https://doi.org/10.1108/01443570410558049>.
9. Liker, J. K. (2004). *The Toyota Way: 14 management principles*. McGraw-Hill.
10. Modoni, G., et al. (2021). Digital transformation in geomatics: Integration of UAV, GNSS and GIS for smart surveying. *Measurement*, 182, 109118. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109118>.
11. Sacks, R., Koskela, L., Dave, B., & Owen, R. (2017). Lean management in construction and digital engineering. *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001360](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001360).
12. Zhang, X., & Zhang, Y. (2022). Lean-based digital workflow optimization in surveying engineering. *Automation in Construction*, 140, 104112. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104112>.

References

1. Antypenko, V. S. (2021). Lean-tehnolohii v systemi upravlinnia pidpriemstvom [Lean technologies in enterprise management systems]. *Ekonomika ta orhanizatsiia vyrobnytstva – Economics and production organisation*, 3, 45–52.
2. Bobylov, Yu. V., Husiev, V. M. (2020). Tsyfrovizatsiia heodezychnykh robot: perspektyvy ta problemy vprovadzhennia [Digitisation of surveying work: prospects and implementation challenges]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Modern achievements in geodetic science and production*, 2, 89–96.
3. Dutchak, V. O. (2022). Innovatsiini pidkhody do orhanizatsii heodezychnykh robot u budivnytstvi [Innovative approaches to the organisation of surveying work in construction]. *Komunalne hospodarstvo mist – Municipal services in cities*, 169, 112–118.
4. Kovalenko, P. M. (2019). Vprovadzhennia informatsiinykh tekhnolohii u heodezychne vyrobnytstvo [Introduction of information technologies in surveying]. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia – Geodesy, cartography and aerial photography*, 90, 76–83.
5. Kucherenko, I. I. (2023). Tsyfrova transformatsiia zemlevporiadnoho ta heodezychnoho zabezpechennia v Ukraini [Digital transformation of land management and geodetic support in Ukraine]. *Zemlevporiadnyi visnyk – Bulletin of Geodesy and Cartography*, 4, 34–41.
6. Melnychuk, L. P., Stepanenko, S. V. (2021). Upravlinnia yakistiu heodezychnykh danykh v umovakh tsyfrovizatsii [Quality management of geodetic data in the context of digitalisation]. *Visnyk heodezii ta kartohrafii – Bulletin of Geodesy and Cartography*, 1, 25–30.
7. Bhamu, J., Sangwan, K. S. (2014). Lean manufacturing: literature review and research issues. *International Journal of Operations & Production Management*, 34 (7), 876–940. DOI: 10.1108/IJOPM-08-2012-0315.
8. Hines, P., Holweg, M., Rich, N. (2004). Learning to evolve: A review of contemporary lean thinking. *International Journal of Operations & Production Management*, 24 (10), 994–1011. DOI: 10.1108/01443570410558049.
9. Liker, J. (2004). *The Toyota Way: 14 Management Principles*. New York: McGraw-Hill. ISBN: 978-0071392310.
10. Modoni, G. et al. (2021). Digital transformation in geomatics: integration of UAV, GNSS and GIS for smart surveying. *Measurement*, 182, 109–118. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109118.
11. Sacks, R., Koskela, L., Dave, B., Owen, R. (2017). Lean Management in Construction and Digital Engineering. *Journal of Construction Engineering and Management*, 143 (9), 1–13. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001360.

12. Zhang, X., Zhang, Y. (2022). Lean-based digital workflow optimization in surveying engineering. *Automation in Construction*, 140, 104–112. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104112.

Дата першого надходження статті до видання: 10.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.11.2025

UDC 332:349.41

Yuliia Radzinska¹, Serhii Nesterenko², Alexander Afanasyev³

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)
E-mail: radzinskayayb@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1661-7975>
ResearcherID: [OHR-7839-2025](https://orcid.org/0000-0002-1661-7975). **SCOPUS Author ID:** [57209792703](https://orcid.org/0000-0002-1661-7975)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)
E-mail: Serhiy.Nesterenko@kname.edu.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5124-9728>
ResearcherID: [AAB-6270-2019](https://orcid.org/0000-0001-5124-9728). **SCOPUS Author ID:** [57195064409](https://orcid.org/0000-0001-5124-9728)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)
E-mail: AfanasyevAV@kname.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7649-7576>
SCOPUS Author ID: [57195072472](https://orcid.org/0000-0001-7649-7576)

LEAN-GEODESY AS A MODERN CONCEPT OF ORGANIZING GEODETIC PRODUCTION: THEORETICAL FRAMEWORK AND PRACTICAL IMPLEMENTATION ASPECTS

The article substantiates the relevance and feasibility of applying the Lean philosophy to the organization of geodetic production and introduces Lean-Geodesy as an innovative management model aimed at increasing the efficiency, quality, and flexibility of geodetic workflows under conditions of digital transformation. It is emphasized that traditional approaches to geodetic work organization remain largely linear, labor-intensive, and dependent on the individual experience of specialists, which leads to fragmented processes, high time consumption, repeated operations, and limited integration of digital solutions. The study identifies key constraints of the conventional model and demonstrates that overcoming them requires the application of lean management principles, process standardization, and the formation of a continuous geodata flow.

A conceptual Lean-Geodesy model is proposed, which integrates three interrelated transformation components: organizational, technological, and quality-oriented. The organizational component is aimed at establishing a shortened and synchronized “field–office” cycle, process standardization, clear task allocation, and effective communication. The technological component focuses on the use of digital tools – including UAV-based surveying, laser scanning, GNSS technologies, GIS platforms, and automated processing software – to accelerate data collection, reduce manual operations, and enhance data accuracy. The quality component ensures systematic monitoring, error prevention, and the development of a culture of continuous improvement.

The article presents a concise methodology for implementing Lean-Geodesy within geodetic enterprises, including diagnostics of current workflows, mapping of the geodata value stream, identification of non-value-adding activities, process optimization, and establishment of internal quality and data exchange standards. A set of practical recommendations is provided to support efficient deployment of the Lean approach in geodetic practice.

A comparative analysis of traditional and Lean-based models confirms clear advantages of Lean-Geodesy, particularly in reducing overall production cycle time, enhancing measurement accuracy, improving resource utilization, increasing process transparency, and strengthening adaptability to changing conditions and customer needs. The research results may be utilized by geodetic and land surveying organizations to enhance competitiveness, support digital transformation, and develop a modern, value-oriented approach to geospatial production management.

Keywords: Lean-Geodesy; geodetic production management; lean management; digitalization; process optimization; geodetic surveying; geodata flow; standardization; continuous improvements.

Table: 2. References: 12.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-562-571](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-562-571)

УДК 528.486:625.724

**Станіслав Георгійович Радов¹, Сергій Вікторович Ротте²,
Аліна Вікторівна Волонтир³, Лариса Віталіївна Іванова⁴,
Ольга Вадимівна Кузнецова⁵**

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії, землеустрою, будівельних конструкцій та безпеки життєдіяльності
Черкаський державний технологічний університет (Черкаси, Україна)

E-mail: s.radov@chdtu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5721-996X>

²кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри геодезії, землеустрою,
будівельних конструкцій та безпеки життєдіяльності

Черкаський державний технологічний університет (Черкаси, Україна)

E-mail: s.rotte@chdtu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1281-1241>

³старший викладач кафедри геодезії, землеустрою, будівельних конструкцій та безпеки життєдіяльності
Черкаський державний технологічний університет (Черкаси, Україна)

E-mail: a.volontyr@chdtu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5609-4569>

⁴старший викладач кафедри геодезії, землеустрою, будівельних конструкцій та безпеки життєдіяльності
Черкаський державний технологічний університет (Черкаси, Україна)

E-mail: livanova@chdtu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4239-3100>

⁵старший викладач кафедри геодезії, землеустрою, будівельних конструкцій та безпеки життєдіяльності
Черкаський державний технологічний університет (Черкаси, Україна)

E-mail: o.kuznetsova@chdtu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2189-7306>

ВСТАВКА ПЕРЕХІДНИХ КРИВИХ ПІД ЧАС РЕКОНСТРУКЦІЇ ДОРІГ

Реконструкція доріг часто потребує вставки перехідних кривих на криволінійних ділянках траси. Вставка клотоїди призводить до зміщення колової кривої в напрямку її центра, а варіанти збереження положення центру колової кривої не враховують виникнення додаткового кута повороту напрямку руху в точці з'єднання кривих. Наведено обґрунтування алгоритму трансформації клотоїди у дотичну перехідну криву, яка задовольняє основні геометричні параметри коректного з'єднання з існуючою коловою кривою, приклади розрахунків запропонованої перехідної кривої та їх графічне відображення.

Ключові слова: колова крива; перехідна крива; дотичні криві; геометричні умови з'єднання; оптимізація.

Рис.: 6. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Зміна напрямку руху транспорту викликає зростання відцентрової сили, що негативно впливає на учасників руху, транспортні засоби та дорожнє покриття. Зменшення впливу відцентрового прискорення досягається використанням колових та перехідних кривих, які забезпечують плавну зміну радіуса кривизни.

Залежно від категорії дороги, допустимої швидкості руху та дорожніх умов перехідні криві можуть проектуватися у вигляді клотоїди, кубічної параболи, кадїоїди, кривої Бланта, Віденської дуги тощо. Найчастіше в Україні застосовується клотоїда, яка підходить для доріг усіх категорій за межами та в межах населених пунктів. Недоліком використання клотоїди є зміщення раніше запроєктованої або побудованої колової кривої в напрямку її центра, а при збереженні положення центру колової кривої з'являються додаткові поперечні (бокові) прискорення.

Тема статті пов'язана з геодезичним забезпеченням будівництва та реконструкції автодоріг і є актуальною для геодезичної та будівельної спеціальностей. Враховуючи ймовірне збільшення обсягу будівництва нових, а також повоєнного відновлення та реконструкції автомобільних доріг, питання безпеки руху набуває важливого практичного значення. Тому до геометричних параметрів криволінійних ділянок встановлюються підвищені вимоги.

Постановка проблеми. Традиційне трасування криволінійних ділянок автодороги полягає у побудові на місцевості головних точок колових кривих за радіусом та кутом повороту траси, обчисленню їхнього пікетажного положення та винесенню на криву наявних пікетних точок. Вставка перехідних кривих у вигляді клотоїди під час проектування та детального розмічування криволінійних ділянок призводить до зміщення колової кривої в

напрямку її центру, що змінює геометричні параметри траси (рис. 1, а). Варіанти збереження положення центру колової кривої (рис. 1, б) не враховують виникнення додаткового кута повороту напрямку руху в точці з'єднання перехідної та колової кривих, що позначається на безпеці руху. Крім того, координати точок перехідних та колових кривих визначаються в різних системах, що потребує їх подальшого перетворення до єдиної системи координат для ефективного використання сучасних технологій розмічувальних робіт.

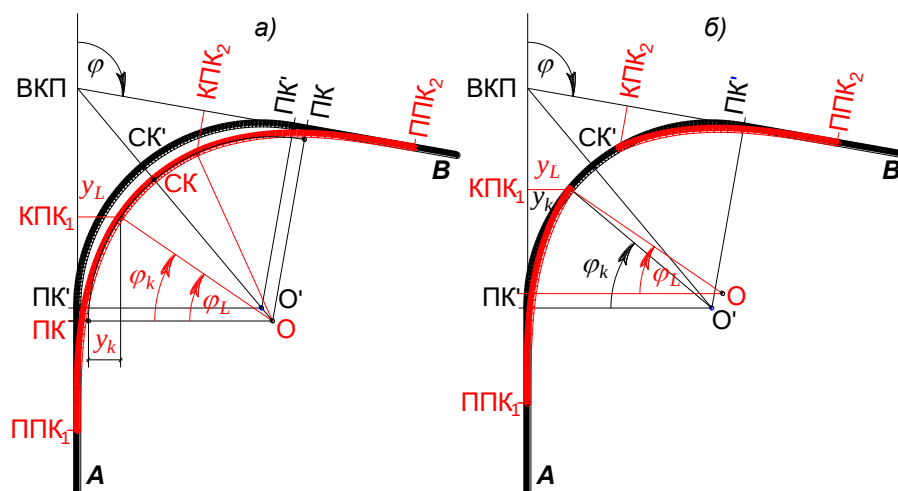


Рис. 1. Вставка перехідної кривої під час реконструкції автодороги:

а – зі зміною положення центру колової кривої;

б – без зміни положення центру колової кривої

(ВКП та φ – вершина та кут повороту траси; $PK'-CK'-PK'$ – існуюча колова крива з центром O' ; $PK-CK-PK$ – нова колова крива з центром O ; $ППК_1-KPK_1$ та $ППК_2-KPK_2$ – перехідні криві; y_L , y_k та φ_L , φ_k – ординати спільної точки перехідної і колової кривих та відповідні кути повороту)

Джерело: розроблено авторами.

Задача вставки перехідної кривої між прямолінійною ділянкою траси та існуючою коловою кривою полягає в пошуку такої дотичної кривої, для якої в точці з'єднання збігаються відповідні геометричні параметри:

$$y_L = y_k; \quad \rho_L = R; \quad \varphi_L = \varphi_k; \quad \varphi_L \leq 0,5\varphi, \quad (1)$$

де ρ_L та R – радіуси перехідної та колової кривих.

У роботі проведено аналіз способів вставки перехідної кривої у вигляді клотоїди без зміни попереднього положення центру колової кривої, запропоновано близьку до клотоїди перехідну криву з виконанням умов (1) та рекомендації щодо оптимізації проєктних параметрів криволінійних ділянок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання перехідних кривих у проєктуванні автомобільних доріг регламентується чинними нормативно-технічними документами України та європейських країн [1; 2; 3; 4]. Зазначені елементи терасування також впроваджуються при проєктуванні залізничних колій [5] та ліній метрополітену [6]. Як перехідні криві здебільшого використовуються клотоїди, поєднання яких з коловою кривою можливе зі зміщенням центру кривої або без його зміщення [7, с. 189]. Основна відмінність полягає в тому, що при повному виконанні умов, (1) центр колової кривої зміщується, а при незмінному положенні центру кривої її кут повороту та/або радіус відрізняється від аналогічних параметрів клотоїди.

Попри переваги клотоїди, вона не може у явному вигляді використовуватися під час реконструкції доріг, у зв'язку з необхідністю зміщення існуючої колової кривої в напрямку її центру (рис. 1, а). Алгоритми вставки клотоїди без зміни положення центру колової кривої [8; 9, с. 320] не враховують виникнення додаткових змін напрямку руху в точці з'єднання перехідної та колової кривих. Вони виникають тому, що перехідна крива не є дотичною до колової кривої в спільній точці C (рис. 2), а перетинає її під кутом $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi = \varphi_k - \varphi_L. \quad (2)$$

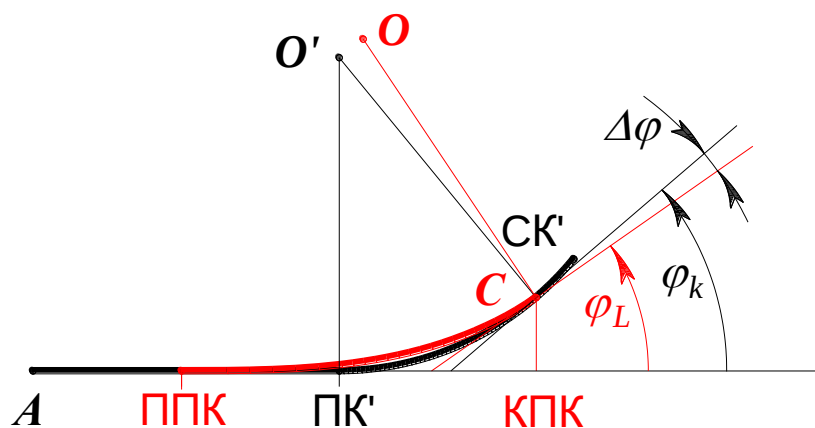


Рис. 2. Кут повороту клотоїди та колової кривої в спільній точці C

Джерело: розроблено авторами.

Для забезпечення плавності руху транспорту під час реконструкції транспортних мереж розробляються алгоритми вставки перехідних кривих з заданими геометричними параметрами [10, с. 196; 11; 12]. При цьому розглядаються різноманітні спіралі, кубічні та квадратні параболи, інші криві другого та третього порядку. Такі перехідні криві потребують зазвичай достатньо складних розрахунків, спеціальних програмних продуктів та не знаходять використання в інженерній практиці.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У наукових роботах відсутні прості та надійні методи проектування вставки перехідних кривих при реконструкції існуючих транспортних мереж.

Метою статті є обґрунтування перехідної кривої, що забезпечує практично однакові геометричні параметри в точці з'єднання з коловою кривою без зміни положення її центра. Наявність методики проектування такої кривої дасть можливість вставки перехідних кривих під час реконструкції транспортних мереж із максимальним збереженням колової кривої та одночасним підвищенням безпеки руху транспортних засобів.

Виклад основного матеріалу. Проектування нових автомобільних доріг дає можливість ще на стадії інженерно-геодезичних вишукувань та польового трасування дороги враховувати перехідні криві на криволінійних ділянках траси (рис. 1, а). Але під час проектування реконструкції або капітального ремонту автодоріг виникає задача вставки перехідної кривої на вже існуючій криволінійній ділянці. Оптимальним рішенням при цьому вважається збереження більшої частини колової кривої без суттєвих змін її місцеположення та геометричних параметрів.

Якщо в точці з'єднання клотоїди та колової кривої при незмінному положенні її центру прийняти $y_k = y_L$, то кут повороту колової кривої

$$\phi_k = \arccos\left(1 - \frac{y_L}{R}\right) \quad (3)$$

завжди буде більше кута повороту перехідної кривої

$$\phi_L = \frac{L}{2R} \quad (4)$$

в зв'язку із зміщенням початків розрахунку ординат y_k відносно y_L на величину зсуву осі абсцис (Δ), який можна визначити за наближеною формулою [7, с. 189]

$$\Delta = \frac{L^2}{24R} \left(1 - \frac{L^2}{112R^2}\right), \quad (5)$$

де L – повна довжина перехідної кривої.

Наприклад, для радіуса колової кривої $R=500$ м та довжини перехідної кривої $L=120$ м маємо ординату кінцевої точки перехідної кривої $y_L=4,795$ м та кут повороту $\phi_L=6^\circ52'32''$. При цьому обчислений за формулою (3) кут повороту колової кривої становить $\phi_k=7^\circ56'29''$, а різниця кутів повороту $\Delta\phi=1^\circ03'57''$ відповідає 9,301 м дуги колової кривої. Якщо радіус колової кривої дорівнює 1000 м, то $y_L=2,399$ м, $\phi_L=3^\circ26'16''$, $\phi_k=3^\circ58'11''$, $\Delta\phi=0^\circ31'55''$, що буде відповідати 9,284 м дуги колової кривої. Практично такі результати отримаємо при зміні радіуса колової кривої в кінцевих точках перехідних кривих.

Різниці кутів ϕ_k та ϕ_L відповідає дуга $l_{\Delta\phi}$ колової кривої, яка прямо пропорційна довжині L перехідної кривої та практично не залежить від радіуса R (рис. 3).

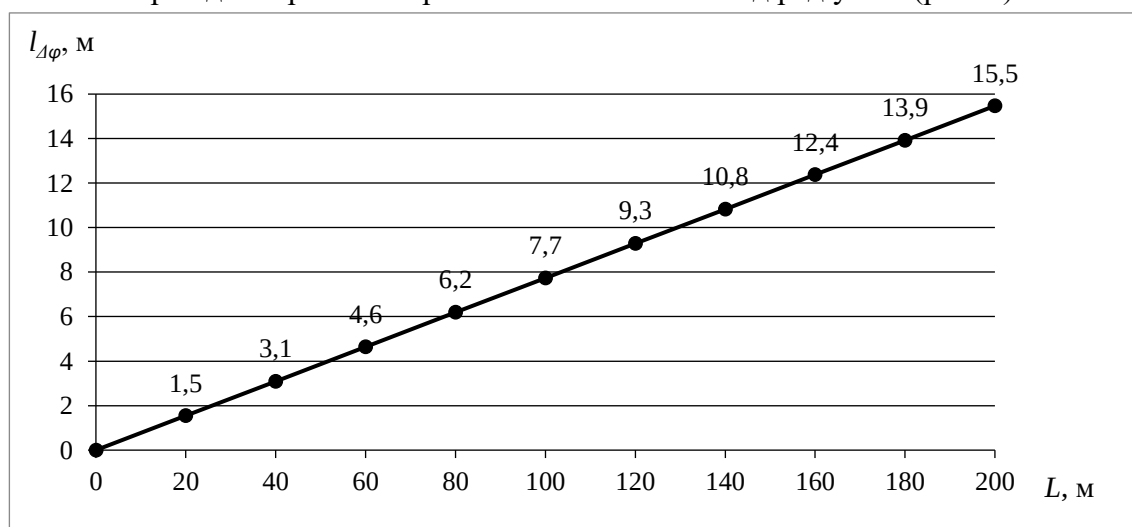


Рис. 3. Вплив невідповідності кутів повороту перехідної та колової кривих
Джерело: розроблено авторами.

Таким чином, вставка клотоїди з одночасним збереженням центру існуючої колової кривої призводить до різких змін напрямку руху в точках з'єднання кривих.

Розглянемо простий алгоритм трансформування клотоїди до такої перехідної кривої, яка буде дотичною до колової кривої без зміщення її центру. Для цього спочатку потрібно уникнути зміни початку умовних ординат y_k та y_L , тобто в кожній ординаті перехідної кривої прибрати зсув осі абсцис Δ .

Оскільки в кінцевій точці клотоїди (рис. 1, а) $\phi_L = \phi_k$, $\rho_L = R$ та [7, с. 190].

$$\left. \begin{aligned} x_L &= L \left(1 - \frac{L^2}{40R^2} + \frac{L^4}{3456R^4} \right); \\ y_L &= \frac{L^2}{6R} \left(1 - \frac{L^2}{56R^2} + \frac{L^4}{7040R^4} \right); \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

то координати центра нової колової кривої можна обчислити за формулами:

$$\left. \begin{aligned} x_O &= x_L - R \sin \phi_L; \\ y_O &= y_L + R \cos \phi_L. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Таким чином легко знайти координати точки початку нової колової кривої (рис. 1, а) в системі координат перехідної кривої:

$$x_{ПК} = x_O; \quad y_{ПК} = y_O - R. \quad (8)$$

Після перетворення та підстановки Δ (5) одержимо:

$$y_{ПК} = y_L + R(\cos \phi_L - 1) = y_L - y_k = \Delta. \quad (9)$$

Таким чином, зсув осі абсцис Δ буде відсутній при обчисленні ординат кінцевої точки перехідної кривої за формулою:

$$y'_L = R(1 - \cos \phi_L), \quad (10)$$

а поточної точки на відстані l від початку перехідної кривої – за формулою:

$$y'_l = \rho_l(1 - \cos \phi_l), \quad (11)$$

де ρ_l та ϕ_l - радіус та кут повороту перехідної кривої в проміжних точках [7, с. 189]:

$$\rho_l = \frac{RL}{l}; \quad (12)$$

та

$$\phi_l = \frac{l^2}{2RL}. \quad (13)$$

Загальний вигляд такої перехідної та колової кривих при $R=500$ м, $L=120$ м наведено на рис. 4. Як і у випадку використання клотоїди з незмінним центром колової кривої (рис. 2), запропонована перехідна та колова криві (рис. 4) не є дотичними.

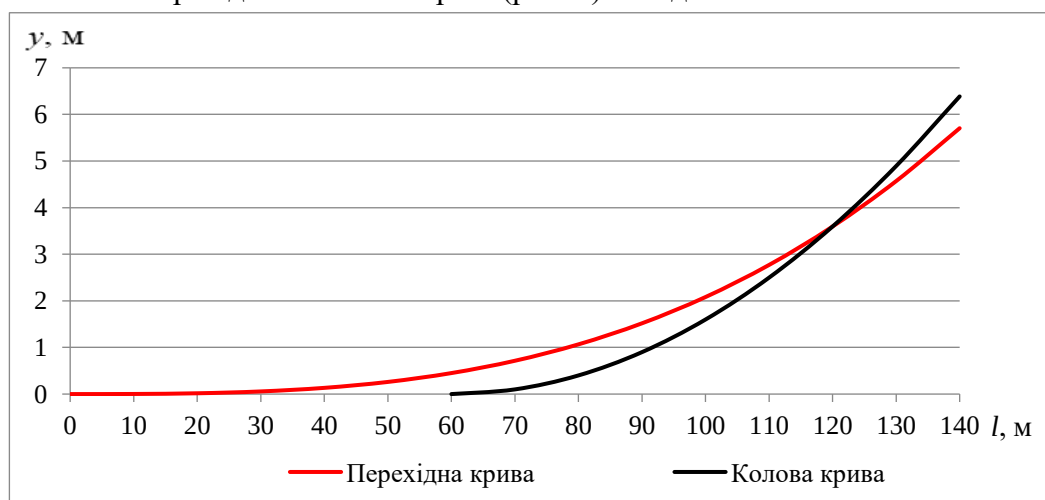


Рис. 4. Графік перехідної та колової кривих при $R=500$ м, $L=120$ м, $y'_l = \rho_l(1 - \cos \phi_l)$

Джерело: розроблено авторами.

Для визначення кутів повороту φ'_l скористаємося відомою залежністю:

$$\operatorname{tg} \varphi'_l = \frac{dy'}{dx'} = \frac{\partial y'}{\partial l} : \frac{\partial x'}{\partial l}, \quad (14)$$

де часткові похідні визначаються за формулами:

$$\frac{\partial y'}{\partial l} = \frac{\partial}{\partial l} \left[\frac{RL}{l} \left(1 - \cos \frac{l^2}{2RL} \right) \right] = \sin \frac{l^2}{2RL} - \frac{y'_l}{l}; \quad (15)$$

$$\frac{\partial x'}{\partial l} \approx \frac{\partial}{\partial l} \left(l - \frac{l^5}{40R^2L^2} \right) \approx 1 - \frac{l^4}{8R^2L^2}; \quad (16)$$

Звідки одержуємо:

$$\varphi'_l \approx \frac{l^2}{2RL} - \frac{y'_l}{l} \approx \varphi_l - \frac{y'_l}{l}. \quad (17)$$

У нашому прикладі кут повороту перехідної кривої, обчислений за формулою (17) в точці перетину з коловою кривою, дорівнює $\varphi'_l \approx 0,0900$ рад. $\approx 5^\circ 09,5'$. А кут повороту колової кривої, обчислений в цій точці за формулою (3), складає $\varphi_k \approx 6^\circ 52,5''$. Таким чином, після ліквідації зсуву осі абсцис Δ , ординати кінцевої точки перехідної кривої y'_L та відповідної точки колової кривої y_k будуть однакові ($y'_L = y_k = 3,596$ м), але кути повороту φ'_L та φ_k будуть відрізнятися.

Аналіз методом математичного моделювання показав, що якщо при обчисленні ординат y'_l (11) перехідної кривої визначати вихідні кути φ_l за формулою

$$\varphi_l = \frac{l^m}{2RL^{m-1}}, \quad (18)$$

то при показнику степеня $m \geq 2$ знайдеться перехідна крива, яка буде задовольняти геометричні умови (1) коректного з'єднання з існуючою коловою кривою. При цьому перше наближення можна визначати для $m = 2,5$. У нашому прикладі ($R = 500$ м, $L = 120$ м) при $m = 2,5$ перехідна крива у своїй кінцевій точці ($l = 120$ м) практично стає дотичною до колової кривої (рис. 5).

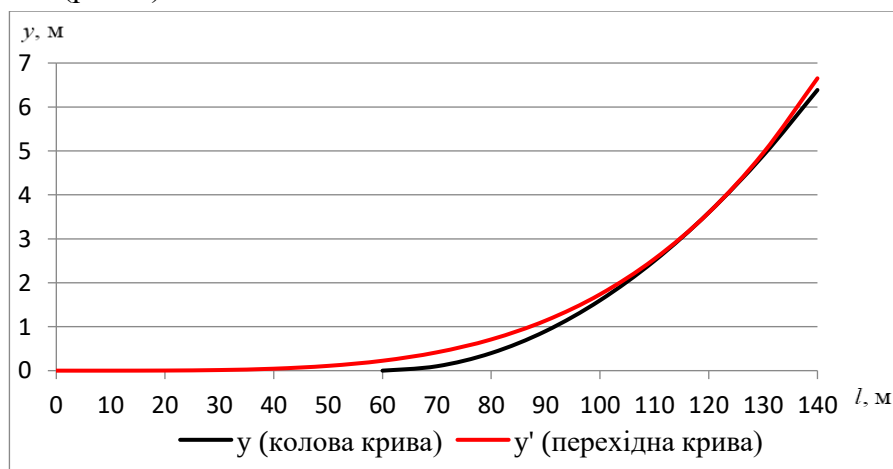


Рис. 5. Графік колової та нової перехідної кривих при $m = 2,5$

Джерело: розроблено авторами.

Оптимальне значення показника степеню m можна визначити методом мінімізації функціонала (рис. 2)

$$F = R(\varphi_k - \varphi_l), \quad (19)$$

де кути повороту колової (φ_k) та перехідної (φ_L) кривих у точці їх з'єднання визначаються за формулами:

$$\varphi_k = L/2R; \quad (20)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_L = \left(\frac{m}{2} \sin \frac{L}{2R} - \frac{y_L}{L} \right) : \left(1 - \frac{L^2}{8R^2} \right). \quad (21)$$

Наприклад, при $R = 500$ м, $L = 120$ м, $m = 2,5$ (рис. 5) кути повороту приймають значення $\varphi_k = 6^\circ 52' 31,8''$ та $\varphi_L = 6^\circ 52' 24,6''$, а функціонал $F = 0,017$ м. Для обчислення оптимального значення показника степеня m можна скористатися функцією «Пошук рішення» пункту «Дані» головного меню «Microsoft Excel». Для нашого прикладу оптимальним є показник степеня $m \approx 2,50058$, при якому цільова функція приймає значення $F < 0,01$ мм (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати оптимізації перехідної кривої

Показник	R , м	L , м	m	y_L , м	φ_k , рад.	$\operatorname{tg} \varphi_L$	φ_L , рад.	$\Delta \varphi$, рад.	F , мм
Вихідні дані	500	120	2,5	3,596	0,1200	0,120544	0,11996	0,0000347	17
Оптимальні дані	500	120	2,50058	3,596	0,1200	0,120579	0,12000	0,0000000	0,001

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз кутів повороту (φ) та їх змін ($\Delta \varphi$) при $R = 500$ м, $L = 120$ м, $l = 20$ м та $m = 2,50058$ для клотоїди при зміщеному центрі колової кривої та запропонованої перехідної кривої при збереженні центру колової кривої показує, що в точці з'єднання перехідної кривої з коловою кривою залишається незначний стрибок бокового прискорення (рис. 6).

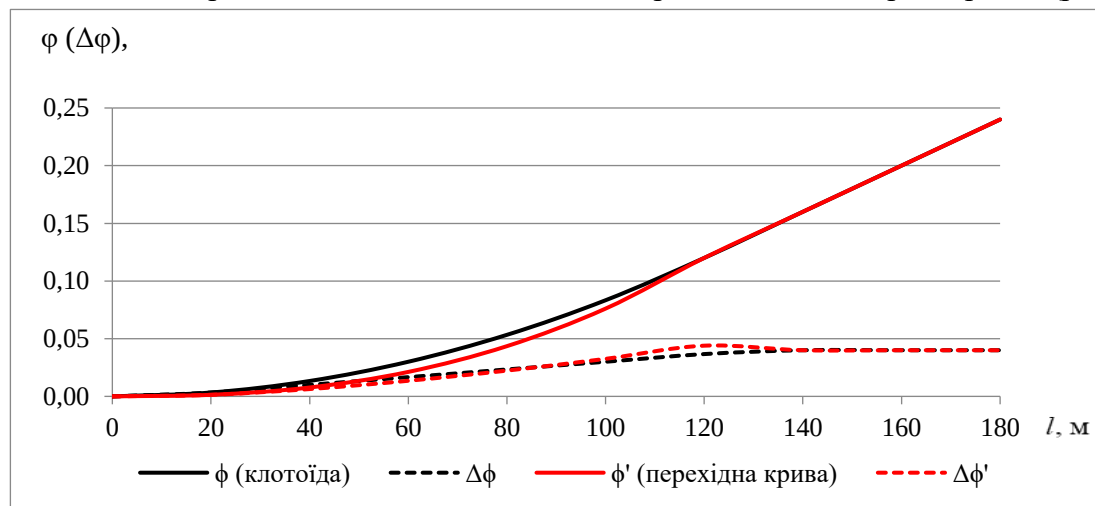


Рис. 6. Графіки зміни кутів повороту перехідних та колової кривих

Джерело: розроблено авторами.

У порівнянні з використанням клотоїди з одночасним збереженням центру колової кривої (рис. 3) маємо суттєве (в 4-5 разів) зменшення бокової зміни напрямку руху з $64'$ до $13,5'$, що відповідає довжині дуги 1,9 м замість 9,3 м. Разом з тим, слід відзначити асимптотичне наближення запропонованої перехідної кривої не тільки до прямолінійної ділянки, а й до колової кривої. При цьому перехідна крива дотична до колової кривої, а в

точці їх з'єднання задовольняються всі заявлені геометричні параметри (1). Координати точок колової кривої визначаються в єдиній системі координат з перехідною кривою, їх легко трансформувати від умовної до загальнодержавної або місцевої систем координат. Це дає можливість використовувати ГІС-технології на стадії проєктних робіт та методи ГНСС-спостережень під час польового трасування, інженерно-технічних вишукувань та детальних розмічувальних робіт криволінійних ділянок траси.

Висновки. У статті обґрунтовано удосконалений спосіб вставки перехідної кривої під час реконструкції автомобільних доріг зі збереженням значної частини існуючої колової кривої. Проведений аналіз методом математичного моделювання підтвердив відповідність перехідної кривої основним геометричним умовам її з'єднання з коловою кривою. Запропонована методика вставки перехідної кривої між прямолінійними та коловими ділянками траси також може використовуватись при територіальних обмеженнях можливостях місцевості на параметри перехідних кривих.

Список використаних джерел

1. ДБН В.2.3-4:2015. (2015). *Автомобільні дороги. Частина I. Проєктування. Частина II. Будівництво*. Мінрегіон України. https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074920736381470676?doc_type=2.
2. RAL (2012). *Richtlinien für die Anlage von Landstraßen* (нім.). <https://www.fgsv-verlag.de/pub/media/pdf/201.i.pdf>.
3. ICTAAL (2021). *Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison* (фр.). <https://dtrf.cerema.fr/pdf/pj/Dtrf/0002/Dtrf-0002540/DT2540.pdf>.
4. NORMA 3.1-IC (2020). *De la Instrucción de carreteras Trazado* (ісп). https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/comodin/recursos/pdfhandler.pdf.
5. ДБН В.2.3-19 (2018) *Залізничні колії 1520 мм. Норми проєктування*. https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074863391337088215?doc_type=2.
6. Міністерство розвитку громад та територій України. (2019). *ДБН В.2.3-7:2018 «Метромолітени»*. Київ: Мінрегіон. https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3019969602391115370/2023-01-20/6b129a64-f904-4382-8bf8-89778b272bf7.pdf.
7. Баран, П. І. (2012). *Інженерна геодезія*. ПАТ «ВІПОЛ». <https://www.twirpx.com/file/2435018>.
8. Баран, П. І. & Буряк К. О. (2013). Новий спосіб розміщення клотоїди та її з'єднання з незміщеною коловою кривою. *Вісник геодезії та картографії*, (3(84)), 11-14. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vgtk_2013_3_4
9. Баран, П. І., & Марущак, М. П. (2015). *Топографія та інженерна геодезія: Підручник для студентів геодезичних і негеодезичних спеціальностей вищих навчальних закладів*. Знання України.
10. Білятинський, О. А., & Старовойда, В. П. (2003). *Проєктування капітального ремонту і реконструкції доріг*. Вища освіта.
11. Борисенко, В.Д. & Устенко, С.А. (2017). Моделювання перехідної кривої на обмеженій ділянці місцевості. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*, (2(68)), 92–100. <http://mdu.edu.ua/wp-content/uploads/gmit14.pdf>.
12. Gottam, S., Neduri, P., Yadav, G. S., Poongudi, K., Swathi Kiran, M., & Lanka, S. (2019). Comparison of transition curves in terms of lateral acceleration and lateral jerk. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(1), 2714–2718. <https://www.ijrte.org/wp-content/uploads/papers/v8i1/A1337058119.pdf>.

References

1. DBN V.2.3-4. (2015). DBN V.2.3-4:2015. (2015). *Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proiektuvannya. Chastyna II. Budivnytstvo* [Roads. Part I. Design. Part II. Construction]. https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074920736381470676?doc_type=2.
2. RAL. (2012). *Richtlinien für die Anlage von Landstraßen* (Guidelines for the design of rural roads). <https://www.fgsv-verlag.de/pub/media/pdf/201.i.pdf>.
3. ICTAAL. (2021). *Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison*. <https://dtrf.cerema.fr/pdf/pj/Dtrf/0002/Dtrf-0002540/DT2540.pdf>.

4. NORMA 3.1-IC. (2020). *Instruction for road alignment design*. https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/comodin/recursos/pdfhandler.pdf.
5. DBN V.2.3-19. (2018). *Zaliznytsi kolii 1520 mm. Normy proektuvannia [Railways 1520 mm gauge: Design standards]*. https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074863391337088215?doc_type=2.
6. DBN V.2.3-7:2018. (2019). *Metropoliteny [Metropolitan railways]*. Ministry of Regional Development of Ukraine. https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3019969602391115370/2023-01-20/6b129a64-f904-4382-8bf8-89778b272bf7.pdf.
7. Baran, P. I. (2012). *Inzhenerna heodeziia [Engineering geodesy]*. VIPOL JSC. <https://www.twirpx.com/file/2435018/>.
8. Baran, P. I., & Buryak, K. O. (2013). *Novyi sposib rozmishchennia klotoidy ta yii ziednannia z nezmishchenoiu kolovoi kryvoi [A new method for placing a clothoid and its connection to a non-shifted circular curve.]* *Visnyk heodezii ta kartohrafiï - Bulletin of Geodesy and Cartography*, (3(84)), 11–14. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vgtk_2013_3_4
9. Baran, P. I., & Marushchak, M. P. (2015). *Topohrafiia ta inzhenerna heodeziia: Pidruchnyk dlia studentiv heodezychnykh i neheodezychnykh spetsialnostei vyshchykh navchalnykh zakladiv [Topography and engineering geodesy: Textbook for students of geodesy and non-geodesy specialties of universities]*. Znannia Ukrainy.
10. Bilyatynskyi, O. A., & Starovoyda, V. P. (2003). *Proiektuvannia kapitalnoho remontu i rekonstruktsii dorih [Design of major repairs and reconstruction of roads]*. Higher Education.
11. Borysenko, V. D., & Ustenko, S. A. (2017). *Modeliuvannia perekhidnoi kryvoi na obmezhenni diliansi mistsevosti. Nauka ta prohres transportu [Modeling of transition curves on a limited section of terrain. Science and Progress of Transport]*. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transport – Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2(68), 92–100. <http://mdu.edu.ua/wp-content/uploads/gmit14.pdf>.
12. Gottam, S., Neduri, P., Swamy Yadav, G., Poongudi, K., Swathi Kiran, M., & Soni, L. (2019). *Comparison of transition curves in terms of lateral acceleration and lateral jerk. International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(1), 2714–2718. <https://www.ijrte.org/wp-content/uploads/papers/v8i1/A1337058119.pdf>.

Дата першого надходження статті до видання: 03.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.11.2025

UDC 528.486:625.724

Stanislav Radov¹, Sergiy Rotte², Alina Volontyr³, Larisa Ivanova⁴, Olga Kuznetsova⁵

¹Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Geodesy, Land Management, Building Structures and Life Safety

Cherkasy State Technological University (Cherkasy, Ukraine)

E-mail: s.radov@chdtu.edu.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-5721-996X>

²Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Geodesy, Land Management, Building Structures and Life Safety

Cherkasy State Technological University (Cherkasy, Ukraine)

E-mail: s.rotte@chdtu.edu.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1281-1241>

³Senior Lecturer of the Department of Geodesy, Land Management, Building Structures and Life Safety

Cherkasy State Technological University (Cherkasy, Ukraine)

E-mail: a.volontyr@chdtu.edu.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5609-4569>

⁴Senior Lecturer of the Department of Geodesy, Land Management, Building Structures and Life Safety

Cherkasy State Technological University (Cherkasy, Ukraine)

E-mail: l.ivanova@chdtu.edu.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-4239-3100>

⁵Senior Lecturer of the Department of Geodesy, Land Management, Building Structures and Life Safety life activities

Cherkasy State Technological University (Cherkasy, Ukraine)

E-mail: o.kuznetsova@chdtu.edu.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-2189-7306>

INSERTION OF TRANSITION CURVES DURING ROAD RECONSTRUCTION

The reconstruction of existing highways often requires the insertion of transition curves on curved sections to reduce the negative impact of centrifugal acceleration. The introduction of a clothoid leads to the displacement of the circular curve toward its center, while the options that preserve the position of the center of the circular curve do not account for the occurrence of an additional deflection angle at the junction point of the curves. The search for other types of curves (spirals, cubic and quadratic parabolas, etc.) requires rather complex calculations and therefore has not found wide application in engineering practice.

To substantiate a transition curve that provides practically identical geometric parameters at the junction point with a circular curve without changing its center position, this paper analyzes existing methods of inserting a clothoid and establishes the intersection of these curves instead of their tangential connection. In addition, the coordinates of points on the transition and circular curves are determined in different systems, which affects the efficiency of using modern marking technologies.

Through mathematical modeling, the possibility of transforming a clothoid into a tangent transition curve that satisfies the geometric parameters of a correct connection with an existing circular curve has been proven. An algorithm is proposed for determining the coordinates of the tangent transition curve while meeting the main geometric conditions for connecting with the circular curve, along with recommendations for optimizing the design parameters of curved road sections. Examples of calculations of the proposed transition curve and their graphical representations are presented. Compared with the use of a clothoid while maintaining the center of the circular curve, there is a significant reduction in the influence of changes in the direction of movement.

The design method for this curve makes it possible to insert transition curves during the reconstruction of transport networks with maximum preservation of the circular curve and simultaneous improvement of traffic safety, as well as to use it in areas where the parameters of transition curves are limited by local terrain conditions.

Keywords: circular curve; transition curve; tangent curves; geometric connection conditions; optimization.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-572-580](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-572-580)

УДК 528.8:910.1

Зоряна Романівна Тартачинська¹, Роман Олегович Пилипак²¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії

Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: ztartachynska@yahoo.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5704-6128>

Scopus ID: 57203115025

²аспірант кафедри геодезії

Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: romanpylypyak97@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5430-0112>

ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМУ НА ПІВНІЧ ДЛЯ РІЗНИХ ТИПІВ КОМПАСІВ

У статті подано результати експериментального дослідження точності визначення напрямку на північ різними магнітними компасами. Найвищу точність показали геодезичні бусолі з похибками 30–40'. Польові компаси забезпечили точність близько 1°, а планшетний — до 1,5°, причому максимальна індивідуальна похибка для нього сягала 3°, тоді як для інших приладів була в межах 1,5–2°. Мінімальна похибка для теодолітної бусолі серед спостерігачів-аматорів становила 17', а для досвідченого спостерігача — зменшувалася до 9,5'. Дослідження підтвердило, що конструкція приладу та досвід користувача суттєво впливають на точність орієнтування. Отримані результати важливі для туризму, геодезії та військової топографії.

Ключові слова: магнітний компас; польовий компас; планшетний компас; геодезична бусоль; визначення напрямку на північ; середньоквадратична похибка.

Рис.: 3. Табл.: 2. Бібл.: 10.

Актуальність теми досліджень. Незважаючи на те, що в сучасному світі домінують цифрові технології, традиційні магнітні компаси залишаються важливими інструментами орієнтування, особливо в умовах, де електронні пристрої недоступні або неефективні через зовнішні фактори. Під час планування та прокладання маршруту, дотримання визначеного напрямку на місцевості використовують магнітні компаси. Вони не потребують джерела живлення, працюють у широкому діапазоні температур і можуть застосовуватися в районах зі слабким сигналом супутникової навігації, таких як гори, густі ліси, підземні приміщення чи віддалені регіони. Компаси дозволяють швидко визначати магнітний азимут — один з основних параметрів орієнтування на місцевості.

Сьогодні магнітні прилади активно використовуються у військовій справі, туризмі, геологічних розвідках, археологічних дослідженнях, а також як резервні навігаційні інструменти в авіації та морській діяльності. Наприклад, сучасні військові фахівці знову приділяють значну увагу навчанню орієнтування за картою і компасом через ризик придушення або відключення супутникової навігації: потенційні кіберзагрози здатні вивести з ладу GPS-прилади, тому солдати повинні вміти рухатися за компасом у «деградованому» навігаційному середовищі [1]. Для туристів та шукачів пригод наявність традиційного магнітного компаса в рюкзаку є важливим засобом безпеки: компас слугує надійним резервним інструментом, адже в екстрених ситуаціях виходу з ладу електронного GPS-навігатора він важить лише близько 50 грамів, але може врятувати життя, забезпечивши базову навігацію [2]. Також у польових наукових дослідженнях геологи та археологи продовжують користуватися аналоговими компасами. Зокрема, кишеньковий компас Брюнтоні вже понад сторіччя є стандартним приладом геологів для точного вимірювання орієнтації геологічних структур у полі [3].

Постановка проблеми. У багатьох випадках точність орієнтування є критичною — похибки навіть у кілька градусів можуть суттєво відхилити від запланованого маршруту. Проте на точність визначення магнітного азимута, крім природних та антропогенних факторів (магнітне схилення, локальні аномалії, магнітні перешкоди), впливають приладові похибки компаса та похибки користувача. Розрахунки, наведені в роботі [4], показують, що точність визначення магнітного схилення залежить насамперед від похиб-

ки наведення магнітної стрілки на північ, що і стало причиною цього дослідження точності наведення компасів. Оскільки компаси часто застосовують не підготовлені користувачі: туристи чи рибалки, то спостерігачами в цьому дослідженні були особи, які мали невеликий досвід користування компасом, або користувались ним вперше і їхні результати порівнювали з результатами досвідченого спостерігача.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження вказують на додаткові фактори, необхідні для досягнення максимальної точності. У роботі [5] запропоновано метод визначення девіації магнітного компаса за допомогою методу найменших квадратів, що підвищує точність вимірювань у польових умовах. Сучасні дослідження калібрування компасів в авіації та навігаційних системах, особливо безпілотних літальних апаратів (БПЛА), включають алгоритми горизонтального обертання для корекції впливу магнітних перешкод [6]. Крім того, у роботі [7] експериментально довели, що зміни температури є суттєвим джерелом похибок компасів, оскільки впливають на стабільність магнітних сенсорів і спричиняють зсув нуля. Автори запропонували термокомпенсаційні алгоритми для стабілізації результатів у змінному кліматі. Дослідження [8] показало, що тип приладу є критичним фактором точності: магнітні компаси демонструють середню похибку близько $1,5^\circ$, тоді як волоконно-оптичні та супутникові компаси забезпечують вищу стабільність показань.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри наявність широкого спектра досліджень, більшість із них стосуються високоточних приладів або навігаційних систем, тоді як польові компаси, що активно використовуються туристами, військовими та геологами, залишаються дослідженими недостатньо. Особливо бракує порівняльних експериментів між різними типами аналогових компасів за участю кількох спостерігачів, що дозволили б кількісно оцінити внесок людського фактора в загальну похибку. Також недостатньо вивчено вплив досвіду користувача та конструктивних особливостей компаса (довжина магнітної стрілки, наявність мікрометричного гвинта, форма шкали) на середньоквадратичну помилку наведення. Таким чином, залишається актуальною проблема експериментальної оцінки точності аналогових компасів різних типів за участю непрофесійних спостерігачів у реальних польових умовах.

Мета дослідження. У цьому дослідженні розглядається точність визначення напрямку на північ за допомогою різних магнітних компасів та вплив досвіду користувача на результати вимірювань.

Виклад основного матеріалу. У першій частині експерименту дослідження виконували 7 спостерігачів за допомогою теодолітів 4Т30 і різних видів компасів. В експерименті використовували: одну теодолітну бусоль, яка є в комплекті з теодолітом, дві геодезичні бусолі, два польових компаси китайського виробництва, один компас українського виробництва та один планшетний компас. Перед початком експерименту всі прилади були перевірені на намагніченість та справність. Після виконання перевірок декількох геодезичних бусолей були відібрані ті прилади, де виконувались усі умови перевірок [9]. Учасники експерименту виконували спостереження, дотримуючись певних правил. Передусім вони уникали локальних магнітних аномалій. Мобільні телефони та металеві предмети тримали на кілька метрів від теодоліта. Компас утримували у горизонтальному положенні та чекали стабілізації стрілки перед відлічуванням. Досліджуваний прилад (компас чи бусоль) закріплювався на вертикальному крузі (у випадку теодолітної бусолі) або на зоровій трубі, встановленій горизонтально (відлік вертикального круга дорівнював $0^\circ 00'$). Після приведення теодоліта в робочий стан спостерігачі наводили стрілку компасу на північ, чекали 20–30 секунд для стабілізації, після чого відлічували горизонтальний круг теодоліта. Кожен учасник виконав по 30 наведень на кожному приладі, фіксуючи результати в журнал.

Польові вимірювання були перенесені в Excel для розрахунку середніх значень і середньоквадратичних похибок (СКП) для перших трьох, п'яти, десяти та тридцяти вимірювань ($m(3)$, $m(5)$, $m(10)$, $m(30)$) відповідно. Середні вагові значення (mwa) були обчислені для кожного набору СКП. За ваги приймали кількість вимірів, які враховували в процесі обчислень для кожної групи відліків. Графіки на рис. 1 ілюструють розподіл СКП для кожної групи вимірювань та їх середньовагове для всіх типів досліджених компасів та для всіх учасників експерименту. Значення подані в радіанах (вертикальна вісь).

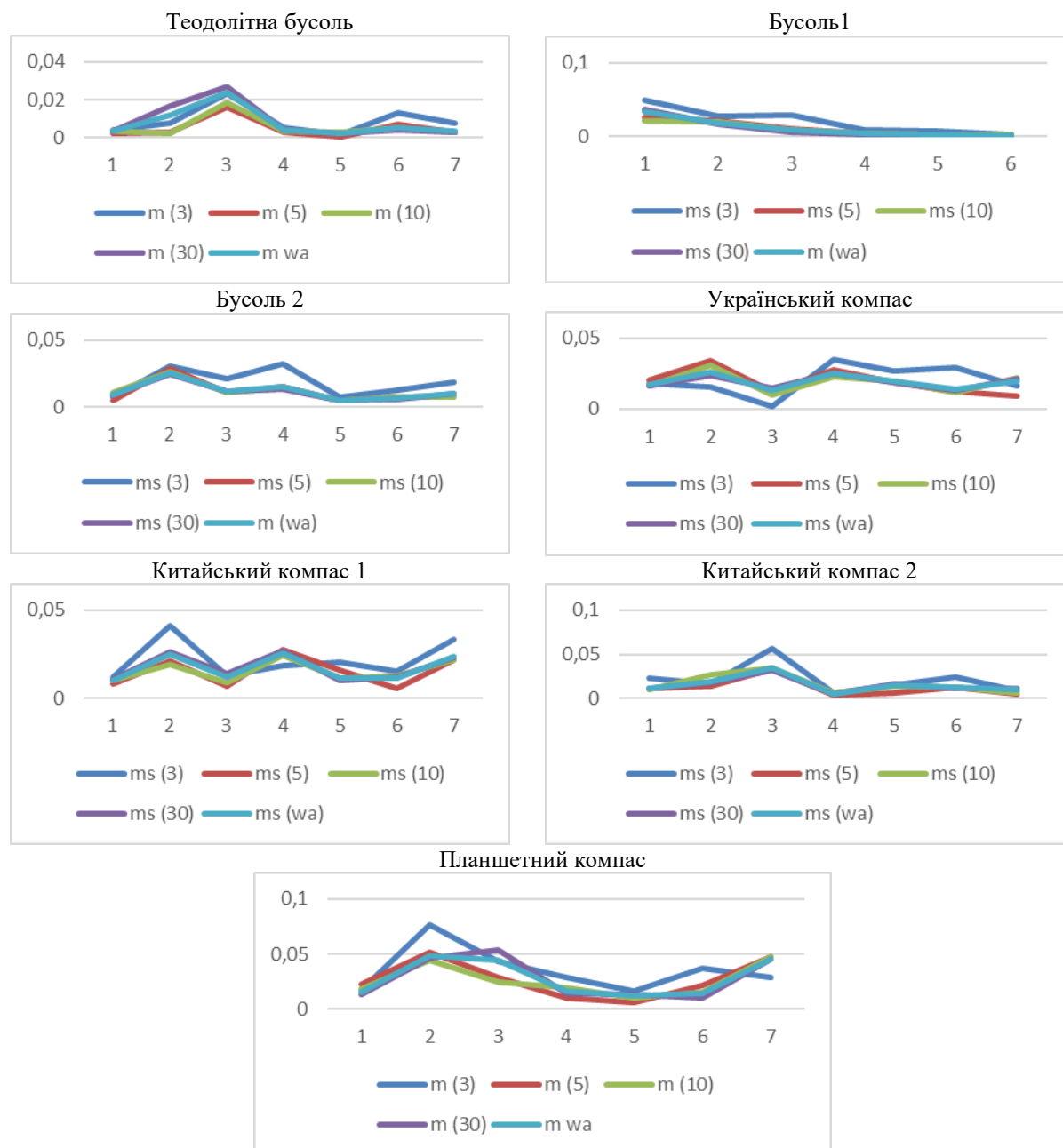


Рис. 1. Розподіл середньоквадратичних похибок кожної групи вимірів і їх середнього вагового
Джерело: розроблено авторами.

У табл. 1 наведено статистичні параметри та похибки результатів спостережень для різних видів досліджуваних приладів. Аналіз включав визначення максимальних (max) і мінімальних (min) значень для кожного приладу та їх усередненого значення ($mean$), максимальні відхилення від середнього (Δmax), усереднені значення СКП для кожного

приладу (m). Оскільки була виявлена значна розбіжність між індивідуальними похибками спостерігачів, тобто максимальними і мінімальними значеннями похибок для кожного приладу, додатково було проведено порівняння отриманих похибок з граничними величинами. Для теоретичних розрахунків граничну похибку $\Delta_{\text{гран}}$ зазвичай визначають як потрібну СКП, тобто $\Delta_{\text{гран}} = 3m$, на практиці, враховуючи обмежену кількість вимірювань, приймають подвійне значення СКП $\Delta_{\text{гран}} = 2m$ [10]. Ці граничні значення були обчислені та наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Статистичні параметри спостережень для різних типів компасів з тридцяти вимірів

	Бусоль теодолітна	Бусоль 1	Бусоль 2	Український компас	Китайський компас 1	Китайський компас 2	Планшетний компас
min	0° 17' 22"	0° 05' 08"	0° 07' 49"	0° 44' 08"	0° 35' 27"	0° 17' 15"	0° 40' 33"
max	1° 27' 32"	1° 53' 12"	1° 22' 49"	1° 28' 08"	1° 28' 34"	1° 57' 56"	2° 47' 39"
mean	0° 40' 30"	0° 38' 11"	0° 26' 56"	1° 05' 33"	0° 58' 55"	0° 52' 03"	1° 36' 15"
Δ_{max}	0° 47' 03"	1° 15' 01"	0° 55' 53"	0° 22' 35"	0° 29' 39"	1° 05' 47"	1° 11' 24"
m	0° 23' 38"	0° 42' 15"	0° 27' 03"	0° 17' 39"	0° 24' 46"	0° 32' 31"	0° 58' 25"
$2m$	0° 47' 16"	1° 24' 30"	0° 54' 06"	0° 35' 18"	0° 49' 32"	1° 05' 03"	1° 56' 51"
$3m$	1° 10' 54"	2° 06' 45"	1° 21' 09"	0° 52' 56"	1° 14' 18"	1° 37' 34"	2° 55' 16"

Джерело: розроблено авторами.

Графік на рис. 2 ілюструє розподіл величин середньовагових похибок наведення стрілки компаса чи бусолі на північ для кожного спостерігача на всіх випробуваних приладах. А графіки на рис. 3 демонструють розподіл похибок у визначенні напрямку на північ для різних типів компасів залежно від кількості спостережень. Значення на графіках подані в градусах.

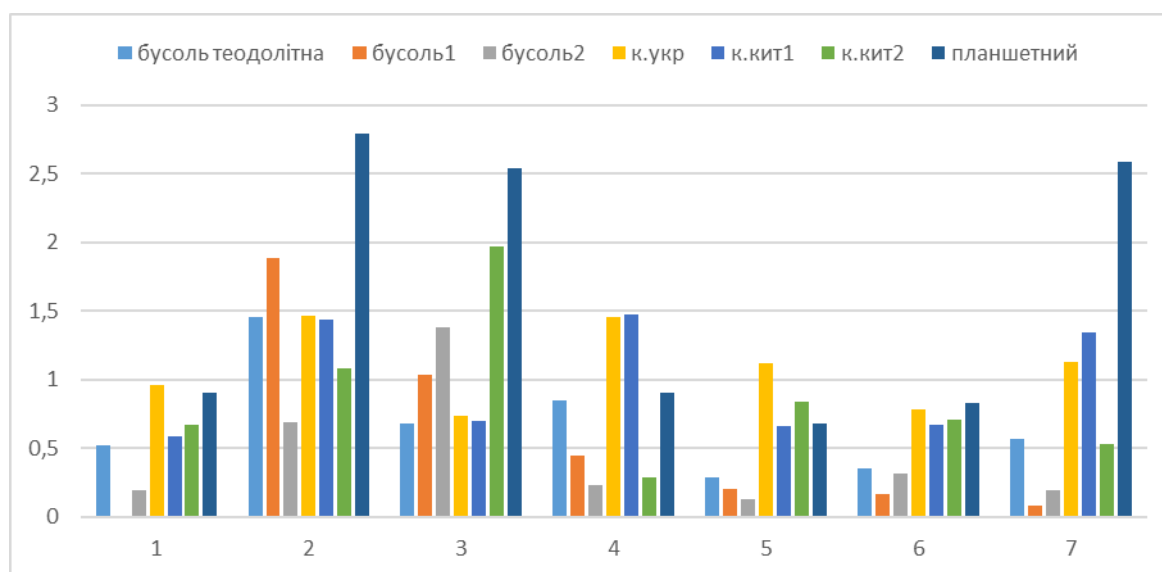


Рис. 2. Розподіл похибок у визначенні напрямку на північ для кожного спостерігача
Джерело: розроблено авторами.

Найменш точним виявився планшетний компас: через недоліки конструкції (коротка магнітна стрілка, відсутність фіксації корпусу, слабе демпфування, незручність відліку) він забезпечував значно гіршу точність. Середня похибка наведення для цього приладу склала близько 1°36', що більше, ніж у інших компасів, а максимальне індивідуальне відхилення сягало 2°47'39". Польові компаси — український та два китайські — показали прийнятні результати з погляду польової орієнтації. Їх середні похибки наведення магнітної стрілки на північ коливалися в межах від 0°52' (китайський компас 2)

до $1^{\circ}05,5'$ (український компас), що дещо гірше порівняно з геодезичними компасами (бусолями), але залишається в допустимих межах для практичного використання. В одного зі спостерігачів при використанні китайського компаса 2 максимальне індивідуальне відхилення сягало $1^{\circ}57'56''$. Це свідчить про вплив не лише конструкції приладу, але й індивідуального досвіду та навичок користувача.

На основі додатково проведеного статистичного аналізу було встановлено, що максимальні значення похибок, які були одержані спостерігачем № 2 для бусолі 1 і спостерігачем № 3 для бусолі 2, суттєво впливають на середнє значення похибки наведення стрілки компаса на північ, але максимальні їхні відхилення від середнього значення не перевищує граничні похибки для теоретичних розрахунків ($3m$). Максимальні значення відхилень від середніх похибок для бусолі 2 і китайського компаса 2 перевищують подвійне значення стандартного відхилення всього в межах $1'$.

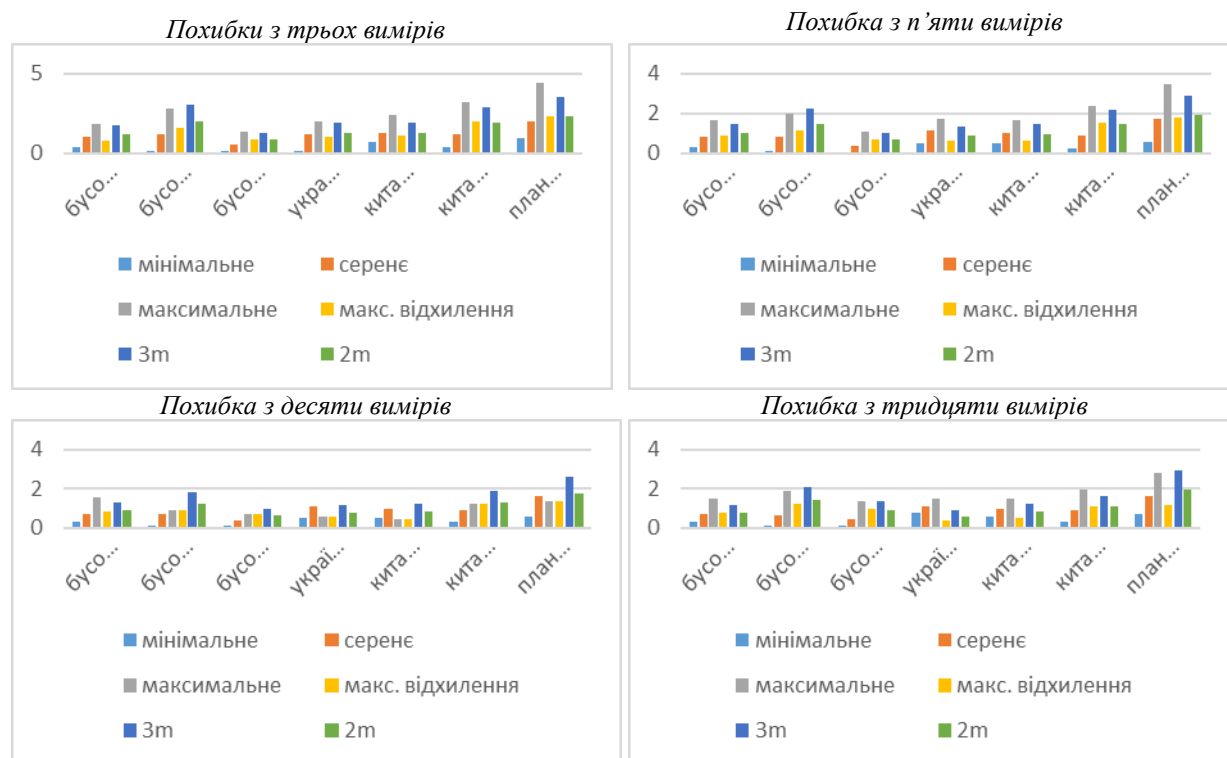


Рис. 3. Розподіл похибок у визначенні напрямку на північ для різних типів компасів залежно від кількості спостережень

Джерело: розроблено авторами.

Застосування більшої кількості вимірювань (до 30) дозволило звужити довірчі інтервали оцінок і чітко виявити різницю в точності між типами компасів. Результати узгоджуються з дослідженнями точності компасів, проведеними іншими авторами. Зокрема, в роботі [5] вказано, що типова середня похибка ручного компаса під час польових спостережень становить $1-2^{\circ}$, тоді як у геодезичних компасів похибка рідко перевищує $0,5^{\circ}$. Отримані в цьому дослідженні значення повністю відповідають цим межах, що підтверджує достовірність отриманих результатів і правильність експериментальної методики.

Щодо приладової точності компасів слід зазначити, що геометрія та маса магнітної стрілки впливають на стабільність її вказування. Наприклад, довша або масивніша стрілка має більший момент інерції, через що повільніше коливається і довше заспокоюється, але менше піддається дрібним збуренням. Водночас легка стрілка швидше встановлюється на північ, але може бути більш чутливою під час руху.

Друга частина експерименту була спрямована на дослідження точності суміщення стрілки компаса з нульовим штрихом досвідченим спостерігачем, а також на оцінку точності визначення напрямку на північ за допомогою однотипних приладів шляхом фіксації відліків горизонтального круга під час кожного наведення.

Для дослідження було відібрано ще п'ять теодолітних бусолей. Теодолітну бусоль, використану в першій частині експерименту, позначили як Бусоль 0. Усі шість теодолітних бусолей по чергові встановлювали на той самий теодоліт і відлічували горизонтальний круг під час наведення магнітної стрілки на північ. Під час вимірювань положення лімба та самого теодоліта залишались незмінними.

Оцінку точності результатів спостережень наведено в табл. 2, де *асер (3)*, *асер (5)* *асер (10)* *асер (30)* - усереднені значення відліків горизонтального круга відповідно з трьох, п'яти, десяти і тридцяти вимірів; *асер ваг* – середньо вагове значення відліку для кожної бусолі під час суміщення магнітної стрілки бусолі з нульовим діленням шкали; похибка δ , тобто відхилення середньо вагового значення для кожної бусолі від загального середнього відліку на північ для шести бусолей і *ms* – СКП визначення напрямку на північ.

Як видно з табл. 2, для всіх бусолей значення скп знаходяться в діапазоні від 7с до 14', а їх середнє значення становить 9,5', що приблизно у 4 рази краще за результати спостережень, виконаних спостерігачами-аматорами. Максимальна різниця між відліками на північ для різних бусолей становить 1° 17', а максимальне відхилення від середнього значення - 42'. Отже, хоча точність суміщення стрілки бусолі з нульовою поділкою в цій частині експерименту істотно перевищує результати спостережень аматорів, через наявні розбіжності між показами різних бусолей похибка визначення напрямку на північ становила 34', що відрізняється від попереднього результату 40,5' всього на 6,5'.

Таблиця 2 – Статистичні параметри спостережень для теодолітних бусолей

	Бусоль 0	Бусоль 1	Бусоль 2	Бусоль 3	Бусоль 4	Бусоль 5
<i>асер (3)</i>	87° 43' 20"	87° 44' 40"	86° 35' 50"	86° 32' 00"	87° 26' 40"	87° 41' 20"
<i>асер (5)</i>	87° 48' 00"	87° 40' 18"	86° 34' 36"	86° 31' 48"	87° 25' 24"	87° 43' 36"
<i>асер (10)</i>	87° 45' 00"	87° 36' 03"	86° 39' 42"	86° 29' 48"	87° 31' 09"	87° 41' 00"
<i>асер (30)</i>	87° 44' 26"	87° 36' 28"	86° 37' 21"	86° 26' 06"	87° 28' 40"	87° 37' 06"
<i>асер ваг</i>	87° 44' 51"	87° 37' 17"	86° 37' 27"	86° 27' 50"	87° 28' 43"	87° 38' 51"
δ	0° 29' 01"	0° 21' 27"	-1° 21' 37"	-1° 12' 00"	0° 12' 53"	0° 23' 01"
<i>ms</i>	0° 09' 38"	0° 06' 47"	0° 13' 43"	0° 07' 46"	0° 09' 16"	0° 08' 35"

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. Найнижча точність спостерігалася у планшетного компаса, що зумовлено його конструктивними особливостями: коротка стрілка, повільна стабілізація та складність наведення на північ. У чотирьох спостерігачів похибка коливається в межах 40-55'. Водночас у трьох інших перевищує 2°. У середньому точність наведення стрілки планшетного компаса складає 1,5°. Середня точність визначення напрямку на північ у досліджуваних польових компасах українського і китайського виробництва становить близько 1°. Геодезичні бусолі продемонстрували найвищу точність, що пояснюється їхньою конструкцією: удвічі, а подекуди втричі довша стрілка порівняно з компасами та можливість точнішого суміщення її з нульовою поділкою за допомогою навідного гвинта теодоліта. Одержана в результаті осереднення середніх вагових всіх спостерігачів-аматорів точність наведення стрілки теодолітної бусолі становила 40' і мензульних 27'-38'. Для всіх досліджуваних приладів СКП результатів вимірювань не перевищують 1°. Найбільші величини СКП спостерігаються для бусолі 1 і планшетно-

го компаса - 50' і 58' відповідно. На їх значення вплинули максимальні похибки спостерігача № 2. Для решти приладів стандартне відхилення становить 25'.

Досвідчений спостерігач здатний забезпечити значно вищу точність суміщення стрілки бусолі з нульовим штрихом шкали. У даному експерименті середня СКП становить 9,5', що у чотири рази краще за результати спостерігачів-аматорів. Через помітні розбіжності між значеннями відліків горизонтального круга під час суміщення стрілки бусолей з нульовим діленням шкали похибка визначення напрямку на північ теодолітними бусолями склала 34', що несуттєво відрізняється від результату недосвідчених спостерігачів. Причиною такого результату є приладові похибки, такі як: неточне встановлення шкали бусолі та ексцентриситет, тобто не збігання осі обертання магнітної стрілки з центром бусольного кільця.

У більшості випадків максимальні значення СКП отримано при обчисленні похибки за результатами перших трьох вимірів. Але був виняток. У спостерігача № 3 при дослідженні бусолі 2 і планшетного компаса на початку вимірювань відліки горизонтального круга були на декілька градусів менші ніж у другій половині вимірювань і відповідно максимальне значення СКП було отримане з 30 вимірів.

Високі розбіжності в результатах трьох спостерігачів (№ 2, 3 і 7) можуть свідчити про порушення методики або недостатній досвід роботи з компасами. Також може впливати на результати вимірювань особиста похибка суміщення стрілки магнітного приладу з нульовою поділкою (напрямо на північ) цих спостерігачів. У спостерігача № 2 різниця максимального і мінімального значень відліків при наведенні на північ двічі перевищила 9°, у спостерігача № 3 - двічі перевищила 6°, у спостерігача № 7 - один раз перевищила 8° при роботі з планшетним компасом. Стабільні та високі результати були отримані двома спостерігачами № 1 і 6. У спостерігача № 1 максимальна розбіжність між результатами спостережень становила 3° 25' під час вимірювань українським компасом, у спостерігача № 6 - 3° 05' під час вимірювань планшетним компасом. Ще двоє учасників експерименту показали середні результати (№ 4 і 5).

Отримані дані підтверджують, що якість приладу та досвід користувача є ключовими чинниками точності. Геодезичні бусолі завдяки довшій стрілці, демпфуванню та зручності відліку забезпечують кращу повторюваність. Натомість прості польові та планшетні компаси схильні до більших похибок через обмежену стабільність та складність зчитування. Методика 30-кратного повторення дозволила виявити систематичні та випадкові похибки, і підтвердила, що навіть незначне недотримання техніки наведення або відлічування може призвести до значних відхилень.

Практична цінність полягає у можливості орієнтованого вибору типу компаса залежно від вимог до точності: орієнтування на місцевості (туризм, рибалка) допускає використання польових і планшетних компасів, тоді як геодезичні чи військові задачі потребують стабільніших приладів. Отже, результати доцільно враховувати при навчанні, стандартизації вимог до точності та виборі обладнання для польових досліджень.

Список використаних джерел

1. Johnson, L. (2013). *The Global Positioning System (Military Uses)*. У *Sky Alert!* (pp. 55–58). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1830-6_6.
2. Sarjakoski, T., Kovanen, J., & Sarjakoski, L. T. (2012). Map-based LBSs for hiking: A review of requirements, existing solutions, and future trends (pp. 297–321). <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-1827-5.ch011>.
3. Von Bitter, P. (1995). The Brunton Pocket Transit: A one hundred year old North American invention. *Earth Sciences History*, 14(1), 98–102. <https://doi.org/10.17704/eshi.14.1.9p17178502jm5615>.

4. Перій С., Тартачинська З., & Пилипак Р. (2025) Визначення магнітного схилення геодезичним методом. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції GEOFORUM'2025* (с.68-70). Львів-Брюховичі, Україна. https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2025/04/ТЕЗИ_ГЕОФОРУМ.
5. Felski, A. (1999). Application of the least squares method for determining magnetic compass deviation. *Journal of Navigation*, 52(3), 388–393. <https://doi.org/10.1017/S0373463399008528>.
6. Wang, J. (2021). Application of horizontal rotation calibration algorithm for magnetic compass in UAV. У *Advances in guidance, navigation and control* (Vol. 644, pp. 825–837). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8155-7_69.
7. Pham, V. T., Nguyen, D. C., Tran, Q. H., Chu, D. T., & Tran, D. T. (2015). Thermal Stability of Magnetic Compass Sensor for High Accuracy Positioning Applications. *Sensors & Transducers*, 195(12):1. <https://www.researchgate.net/publication/291348048>.
8. Jaskólski, K., Felski, A., & Piskur, P. (2019). The compass error comparison of an onboard standard gyrocompass, fiber-optic gyrocompass (FOG) and satellite compass. *Sensors*, 19(8), 1–20. <https://doi.org/10.3390/s19081942>.
9. Літинський, В. О., Ващенко В. І., & Перій, С. С. (2012). *Геодезичні прилади в топографії. Частина перша*. Львів: Євровіт.
10. Островський, А. Л., Мороз, О. І., Тартачинська, З. Р., & Гарасимчук, І. Ф. (2011). *Геодезія. Частина перша. Топографія*. Видавництво Львівської політехніки.

References

1. J Johnson, L. (2013). *The Global Positioning System (Military Uses)*. У *Sky Alert!* (pp. 55–58). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1830-6_6.
2. Sarjakoski, T., Kovanen, J., & Sarjakoski, L. T. (2012). Map-based LBSs for hiking: A review of requirements, existing solutions, and future trends (pp. 297–321). <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-1827-5.ch011>.
3. Von Bitter, P. (1995). The Brunton Pocket Transit: A one hundred year old North American invention. *Earth Sciences History*, 14(1), 98–102. <https://doi.org/10.17704/eshi.14.1.9p17178502jm5615>.
4. Перій С., Тартачинська З., & Пилипак Р. (2025) Визначення магнітного схилення геодезичним методом. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції GEOFORUM'2025* (с.68-70). Львів-Брюховичі, Україна. https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2025/04/ТЕЗИ_ГЕОФОРУМ.
5. Felski, A. (1999). Application of the least squares method for determining magnetic compass deviation. *Journal of Navigation*, 52(3), 388–393. <https://doi.org/10.1017/S0373463399008528>.
6. Wang, J. (2021). Application of horizontal rotation calibration algorithm for magnetic compass in UAV. У *Advances in guidance, navigation and control* (Vol. 644, pp. 825–837). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8155-7_69.
7. Pham, V. T., Nguyen, D. C., Tran, Q. H., Chu, D. T., & Tran, D. T. (2015). Thermal Stability of Magnetic Compass Sensor for High Accuracy Positioning Applications. *Sensors & Transducers*, 195(12):1. <https://www.researchgate.net/publication/291348048>.
8. Jaskólski, K., Felski, A., & Piskur, P. (2019). The compass error comparison of an onboard standard gyrocompass, fiber-optic gyrocompass (FOG) and satellite compass. *Sensors*, 19(8), 1–20. <https://doi.org/10.3390/s19081942>.
9. Litynskyi, V. O., Vashchenko, V. I., & Perii, S. S. (2012). *Heodezychni prylady v topohrafii. Chastyna persha [Geodetic instruments in topography. Part one]*. Yevrosvit.
10. Ostrovskyi, A. L., Moroz, O. I., Tartachynska, Z. R., & Harasymchuk, I. F. (2011). *Heodeziia. Chastyna persha. Topohrafiia [Geodesy. Part one. Topography]*. Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki.

Дата першого надходження статті до видання: 19.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.12.2025

Zoryana Tartachynska¹, Roman Pylypyak²

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Geodesy Department,
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: ztartachynska@yahoo.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5704-6128>. **Scopus ID:** 57203115025

²Postgraduate Student of the Geodesy Department, Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: romanpylypyak97@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-5430-0112>

**ACCURACY OF DETERMINING THE NORTH DIRECTION
FOR DIFFERENT TYPES OF COMPASSES**

The paper presents the results of an experimental study on the accuracy of determining the north direction using various types of magnetic compasses that differed in design, mass, length of the magnetic needle, damping, and manufacturing quality. The main objective of the study was to quantitatively assess the influence of the instruments' structural features and the user's level of training on the root mean square error of aligning the compass needle with the magnetic meridian.

Seven observers without special training took part in the tests; each performed 30 measurements on seven different instruments: a theodolite bussol, two geodetic compasses (bussols), two Chinese field compasses, a Ukrainian field compass, and a tablet compass. The measurements were carried out in real field conditions with strict adherence to the rules for avoiding local magnetic disturbances that could distort the results. To increase the reliability of the calculations, root mean square errors and weighted mean values were determined for series of 3, 5, 10, and 30 observations.

Analysis of the obtained data showed that geodetic compasses provided the highest accuracy — their average errors ranged from 30–40', which is almost twice as accurate as field compasses, whose typical deviations were about 1°. The tablet compass demonstrated the lowest accuracy due to its short needle, high sensitivity to oscillations, and weak damping. Its average error was approximately 1.5°, and the maximum individual error reached 3°, while for other instruments it remained within 1.5–2°. At the same time, the minimum recorded error for the theodolite bussol among amateur observers was 17', whereas for an experienced specialist it decreased to 9.5', clearly demonstrating the importance of user skill in the orientation process.

The results showed a significant influence of the human factor on the accuracy of aligning the compass needle with the zero division of the scale, namely: substantial inter-individual variation was observed, caused by differences in attentiveness, speed of reading fixation, and ability to stabilize the instrument. The study confirmed that the accuracy of determining the north direction depends both on the compass design and on the user's experience. The results may be useful for specialists in tourism, geodesy, military topography, and for preparing recommendations regarding the selection of instruments for work in difficult conditions.

Keywords: magnetic compass; field compass; tablet compass; geodetic compass; determination of north direction; root mean square error.

Fig.: 3. Tab.: 2. Ref.: 10.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-581-591](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-581-591)

УДК 528:332.3:004.9

**Ірина Олександрівна Удовенко¹, Лідія Іванівна Смоленська²,
Стефан Стефанович Молнар Д.³**

¹кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії, картографії і кадастру
Уманський національний університет (Умань, Україна)

E-mail: irinaudovenko8@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5971-8365>

²сарпий викладач кафедри геодезії, землеустрою та земельного кадастру

Одеський державний аграрний університет (Одеса, Україна)

E-mail: 3761077@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5002-8405>

³доктор філософії, доцент кафедри географії та туризму

Закарпатський угорський університет ім. Ференца Ракоці II (Закарпаття, Україна)

E-mail: molnar.d.istvan@kmf.org.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2959-9136>

МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОННОЇ ГЕОДЕЗИЧНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ПОТРЕБ КАДАСТРУ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД: ТЕХНОЛОГІЧНІ БАР'ЄРИ ТА СУСПІЛЬНІ ІМПЕРАТИВИ

У статті досліджено впровадження електронної геодезичної мережі нового покоління як базової інфраструктури для ведення кадастру територіальних громад у контексті децентралізації та цифрової трансформації просторового управління. Розглянуто технічні, організаційні та соціальні аспекти створення й функціонування таких мереж, заснованих на використанні постійних референційних станцій Глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS). Проаналізовано сучасний стан розвитку геодезичної мережі України, її нормативно-правові засади та досвід інтеграції до європейського геопросторового простору. Визначено технічні виклики впровадження ЕГМ, які пов'язані з інфраструктурним забезпеченням (геологічно стійке розташування, безперебійне електропостачання та наявність високошвидкісного інтернету для передачі GNSS у реальному часі), трансформацією координатних систем (національний трансформаційний модуль, єдиний центр обробки спостережень), автоматизованим контролем якості даних і кадровою підготовкою фахівців. Побудова електронної геодезичної мережі вимагає значних інвестицій. Зазначено, що впровадження електронної геодезичної мережі забезпечує підвищення точності координат кадастрових даних, скорочення часу їх оновлення, зменшення кількості земельних спорів та створення умов для інтеграції кадастрових і містобудівних систем. Особливу увагу приділено соціальним ефектам як зростанню прозорості управління земельними ресурсами, підвищенню довіри громадян до органів місцевого самоврядування, розвитку цифрових сервісів і залученню інвестицій. На основі аналізу вітчизняного та закордонного досвіду запропоновано модель міжгромадської співпраці щодо створення регіональних мереж GNSS та рекомендації щодо формування єдиної національної платформи моніторингу геодезичних даних. Доведено, що електронна геодезична мережа нового покоління є не лише технологічним інструментом кадастрового забезпечення, а й чинником розвитку відкритого управління, сталого просторового планування та цифрової демократії в Україні.

Ключові слова: електронна геодезична мережа; GNSS; кадастр територіальних громад; геоінформаційні системи; просторове управління; цифровізація; координатне забезпечення; децентралізація; геопросторові дані; технічні виклики; соціальні очікування.

Рис.: 1. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. Реформа місцевого самоврядування висунула нові вимоги до управління земельними ресурсами, зокрема – до точності просторових даних, відкритості кадастрових процесів та оперативного доступу до геоінформаційних ресурсів. Традиційна геодезична інфраструктура, що базується на наземних пунктах і статичних координатних системах потребує постійного удосконалення. Розвиток супутникових технологій, мереж GNSS відкрило можливості для створення електронної геодезичної мережі нового покоління – динамічної, інтегрованої, гнучкої системи, яка забезпечує точність визначення координат у реальному часі. Для територіальних громад така інфраструктура є не лише технічним ресурсом, а й соціальною інновацією. Вона сприяє підвищенню прозорості управління земельними ресурсами, зменшенню кількості земельних спорів, покращенню просторового планування та залученню інвестицій.

Постановка проблеми. Створення та підтримка актуальних кадастрових даних є однією з важливих проблем для сучасного етапу децентралізації та розвитку територіальних громад України, вирішення якої потребує формування електронної геодезичної мережі нового покоління. Впровадження мережі дозволить ведення кадастру територіальних громад

на новому інноваційному рівні, але і стане важливим кроком у подоланні наявних проблем і забезпеченні вирішення соціальних і економічних завдань розвитку територій, підвищенні прозорості управління земельними ресурсами та ефективності інвестицій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання розбудови електронних геодезичних мереж та їх впровадження в кадастр територіальних громад є предметом активного розгляду в сучасній науці, як на національному, так і на міжнародному рівнях. У праці Ю. Карпінського та співавторів [1] підкреслено важливість роботи з геопросторовими даними громад як основи для сталого розвитку територій. Автори наголошують на необхідності уніфікації підходів до збору, оброблення та використання таких даних у межах національної інфраструктури геопросторової інформації. Це зумовлено тим, що використання геопросторових даних та географічної інформаційної системи (ГІС) дозволяє мінімізувати дублювання робіт із замовлення, виробництва та зберігання даних на одній і тій самій території. Крім того, ці технології забезпечують оперативне прийняття рішень під час критичних ситуацій, аварій чи небезпек. ГІС допомагають аналізувати ресурси економічного розвитку громади та виявляти пасивні об'єкти. Вони також дають змогу прогнозувати вплив різноманітних рішень (наприклад, щодо розміщення нових промислових, інфраструктурних чи транспортних об'єктів) на довкілля та інфраструктуру. Важливим аспектом є можливість залучення інвесторів через формування привабливих інвестиційних пропозицій та реалізацію проєктів. Нарешті, використання геопросторових даних сприяє задоволенню потреб громадян в управлінні обмеженими ресурсами громади, а їх оприлюднення є ключовим для залучення громадськості до процесів планування, ухвалення рішень та створення нових корисних сервісів.

Дослідження П. Сухого, І. Тревого, Х. Бурштинської та ін. [2] акцентує увагу на новаціях у геодезично-картографічній та кадастровій діяльності, зокрема на цифровізації процесів і підвищенні ролі сучасних інформаційних технологій у підготовці фахівців. Ці зміни формують нові вимоги до технічного забезпечення електронних геодезичних мереж. При цьому розбудова Національної інфраструктури геопросторових даних (НІГД) є невідкладною дією для задоволення зростаючих потреб суспільства в географічній інформації та підвищення ефективності застосування геопросторових даних і технологій ГІС задля сталого розвитку.

У монографії «Сучасні технології моніторингу довкілля: на прикладі Київської агломерації» колектив авторів [3] розглядає застосування сучасних технологій моніторингу довкілля, що ґрунтується на даних геодезичних вимірювань і супутникового спостереження. Цей підхід може бути ефективно використаний у кадастрових роботах громад. У статті М. Пілічевої та Т. Анопрієнко [4] виявлено тенденцію до інтеграції систем геодезії, землеустрою та містобудування через єдину геоінформаційну платформу. Науковці наголошують, що ключовими викликами залишаються питання сумісності даних та стандартизації технічних процедур. Водночас зміни в містобудівній діяльності мають значний вплив на процеси землеустрою та ведення Державного земельного кадастру. У тексті визначено, що розвиток та впровадження інформаційних технологій істотно покращує якість надання послуг у сферах геодезії, землеустрою, кадастру та містобудування.

Іноземні дослідження, зокрема роботи К. Косур-Бера та І. Grzelka [5] і А. Doskocz [6], демонструють досвід Польщі щодо модернізації кадастрових систем і національних геодезичних ресурсів. Їхні результати вказують на доцільність поетапного переходу до електронних мереж нового покоління, орієнтованих на відкритість і безперервне оновлення даних. Серед вітчизняних напрацювань варто відзначити наукову публікацію [7], де описано способи створення електронних карт квартальної мережі підприємств лісової галузі із використанням супутникових технологій, що підвищують точність геодезичних робіт.

Створення електронної карти квартальної мережі лісогосподарського підприємства є послідовним процесом, що включає ряд робіт: підготовка проєктних точок, польова зйомка геодезичними пристроями, обробка та узгодження даних зйомки, побудова квартальної мережі на основі зібраної інформації та, нарешті, передавання готових даних лісовпорядним підприємствам.

У роботі «Глобальні навігаційні супутникові системи та їх роль у технологіях точного землеробства» О. Холодюка детально розглянуто два основних оператори навігаційних супутникових систем — NAVSTAR GPS і GLONASS, виділено їхні основні відмінності, як-от: характер розташування, рух супутників на орбітах та їх загальна кількість, методи кодування сигналу CDMA і FDMA, використання різних систем координат WGS-84 і ПЗ-90.11. Звернув увагу дослідник і на точність позиціонування машинних агрегатів для реалізації технологій точного землеробства, яка покращується (від 2 до 20 см) завдяки диференційній корекції сигналів за допомогою безкоштовних та комерційних широкозонних підсистем супутникової навігації [8].

У сфері екологічної безпеки Г. Фінін і Р. Шевченко [9] наголошують на ролі картогеоінформаційного забезпечення для ефективного управління територіями, що безпосередньо пов'язане з точністю та актуальністю геодезичних даних. Розроблені структурно-параметричні модулі збирають і систематизують усю екологічну інформацію за весь період спостережень (панхронологічна) з просторовою прив'язкою (координатною на території). Модулі містять геоінформаційні дані (атрибутивну геоінформацію), що інтегрально відображають результати моніторингу впливу небезпечних техногенних чинників на довкілля, представляючи їх у найбільш придатному для аналізу форматі, – цифровій мапі екологічної безпеки спеціального призначення. У свою чергу А. Ачкасов та ін. [10] досліджують функціонування геопорталів територіальних громад, підкреслюючи, що післявоєнне відновлення територій України потребує впровадження інтегрованих електронних систем обліку земельних ресурсів. Детальний аналіз питань цифрової трансформації кадастрових систем та впровадження геоінформаційних сервісів у місцевому управлінні представлено у наукових працях О. Ступень, Н. Прокопенко, С. Шевчука [11], Л. Горбата [12].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проте питання впровадження електронної геодезичної мережі саме на рівні територіальних громад досліджено недостатньо, особливо у контексті соціальної складової. Впровадження електронної геодезичної мережі нового покоління (ЕГМ), побудованої на технологіях Глобальних Навігаційних Супутникових Систем (GNSS), є необхідною передумовою для переходу до безперервного, високоточного та єдиного координатного забезпечення. Таким чином, дослідження, спрямоване на аналіз технічних, організаційних та соціальних аспектів цього впровадження, і є актуальним для успішної реалізації цифрової трансформації на рівні територіальних громад.

Мета статті. Мета дослідження полягає у комплексному аналізі та науковому обґрунтуванні стратегії впровадження електронної геодезичної мережі нового покоління як базової інфраструктури для ведення кадастру територіальних громад, з фокусом на подоланні технічних викликів та гармонізації соціальних очікувань зацікавлених сторін.

Виклад основного матеріалу. Розвиток геодезичних мереж нового покоління є світовою тенденцією, що спирається на використання технологій глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) – GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou. Застосування постійних референцних станцій дозволяє отримувати координати з точністю до кількох сантиметрів у режимі реального часу (RTK, NTRIP). Це створює основу для побудови єдиної геодезичної та кадастрової інфраструктури. У країнах Європейського Союзу функціонують національні системи референцних станцій, інтегровані у просторову інфраструктуру

INSPIRE (Nfrastructure for SPatial InfoRmation). Вони забезпечують сумісність геопросторових даних між країнами, підтримуючи процеси просторового планування, моніторингу земель і кадастрового адміністрування. Наприклад у Республіці Польща національний «Закон про інфраструктуру просторової інформації» 2010 р. визначив правила адміністрування інфраструктури даних – створення національного геопорталу (Geoportals.gov.pl); призначення відповідальних відомств за різні тематичні шари; запровадження профілів метаданих. Все це суттєво вплинуло на цифровізацію містобудування країни, а саме публікацію планів у зручних онлайн-системах з інтеграцією кадастру, ландшафтних та екологічних даних, використання просторового планування у програмах розвитку (Загальні плани розвитку, Програма просторового розвитку країни 2030) та екологічних директивах (ОВНС, стратегічна екологічна оцінка) [5].

В Україні правову основу створення сучасної геодезичної мережі визначає Закон України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» № 554-IX (2020 р.), який закладає принципи інтеграції даних, відкритого доступу до них та їхньої взаємодії на рівні держави й територіальних громад. Серед важливих нормативних документів можна відзначити Постанову КМУ від 26 травня 2021 р. № 532 «Про затвердження Порядку функціонування національної інфраструктури геопросторових даних», Стратегію розвитку земельних відносин 2030, у якій передбачено створення цифрового кадастру та ряд інших документів, що регламентують питання створення та функціонування єдиного державного координатного простору, а також встановлюють підвищені вимоги до точності геопросторових даних, які можуть бути забезпечені виключно через впровадження та постійне використання Електронної геодезичної мережі нового покоління, заснованої на глобальних супутникових системах (GNSS).

Відзначимо, що електронну геодезичну мережу нового покоління (ЕГМ) розглядають як високоточну, геоцентричну та динамічну просторову інфраструктуру, засновану на постійних мережах референціальних станцій Глобальних Навігаційних Супутникових Систем (GNSS). Вона призначена для оперативного і безперервного забезпечення користувачів (геодезистів, інженерів землепорядників, ГІС-фахівців) уніфікованими координатними даними з максимальною точністю (сантиметровий і міліметровий діапазон), використовуючи єдину світову систему відліку, як-от WGS 84 (або її високоточні національні реалізації). Так, починаючи з 1 жовтня 2021 року, Науково-дослідний інститут геодезії та картографії (НДІГК) через свій Центр аналізу GNSS-даних постійно обробляє спостереження з мережі GNSS-станцій, розташованих в Україні й суміжних країнах. До опрацювання залучено станції НДІГК, МАО, System.NET, ZAKPOS, GEOTERRACE, RTKHUB, MOLDPOS, та станції мережі IGS. У результаті опрацювання визначаються з високою точністю координати ГНСС-станцій у системах координат: ITRF2020, ETRF2014, UСК2000. Необхідні для цього параметри трансформації та їхні зміни беруться з офіційних даних Європейської перманентної мережі. Створена система геодезичного моніторингу GNSS-мереж виконує низку ключових завдань: автоматизоване математичне опрацювання GNSS-спостережень, включаючи формування, архівування, аналіз, візуалізацію та публікацію кінцевих результатів через вебзасоби; підтримка постійного зв'язку Державної геодезичної референційної системи координат УСК-2000 з міжнародними загальноземними системами координат; забезпечення суб'єктів топографо-геодезичної та картографічної діяльності цілісними й актуальними даними щодо Універсальної просторової мережі (УПМ) GNSS; сприяння реалізації та моніторингу УСК-2000 через геодезичні GNSS-мережі, а також поєднання результатів їхніх спостере-

жень. Результати моніторингу доступні на ресурсі geo-monitor.upn.net.ua [14]. Для управління Ukrainian Permanent GNSS Network (UPN GNSS) використовується Програмне забезпечення NRCan's CSRS-PPP. Крім того, CSRS-PPP також доступний у модулі опрацювання в системі візуалізації геодезичного моніторингу стабільності ГНСС станцій. На сьогодні в Україні діють 786 ГНСС станцій.

Управління ресурсами територіальних громад відбувається згідно комплексним планом просторового розвитку територій громад – законодавчо визначеного нового виду містобудівної документації. Це сучасна містобудівна документація, яка передбачає створення цифрових наборів геопросторових даних, які об'єднують відомості про поточний стан та перспективи розвитку території громади. Геопросторові дані обов'язково включають актуалізовану цифрову топооснову. Зареєстровані в системах містобудівного кадастру, ці набори даних стають базою для ефективного управління стійким розвитком територіальних громад і держави в цілому [10]. У дослідженні А. Третяка, В. Третяк, Ю. Лобунько з'ясовано, що основними інформаційними проблемами щодо розроблення комплексних планів просторового розвитку територій територіальних громад є відсутність актуальних планово-картографічних матеріалів, відомостей державного земельного кадастру про всі земельні ділянки та права на них, що наявні на території, їх правовий режим та обмеження і обтяження у використанні земель [13]. Застосування електронної геодезичної мережі (ЕГМ) забезпечить високоточну координатно-часову підтримку для таких сфер, як кадастр, агровиробництво та територіальне планування, що дозволить істотно покращити показники точності, швидкості обробки та достовірності геодезичних даних та стане фундаментальною передумовою для раціонального управління земельними ресурсами [11].

Впровадження ЕГМ для ведення кадастру територіальних громад стикається з низкою технічних умов, які можна умовно поділити на інфраструктурні, технологічні, організаційні та кадрові. Фундаментом будь-якої сучасної геодезичної системи є мережа постійно діючих референцних станцій. Її стабільне функціонування вимагає забезпечення необхідних інфраструктурних умов, до яких можна віднести: розміщення станцій на геологічно стійких ділянках з гарантованою відсутністю локальних деформацій; наявність безперебійного електропостачання та резервних джерел живлення; забезпечення високошвидкісного інтернет-з'єднання для передачі сигналів GNSS у режимі реального часу. В українських умовах додатковою складністю є нерівномірне покриття території мобільними мережами та часті перебої в електропостачанні, особливо у сільській місцевості [14].

Одним із головних завдань є інтеграція електронної геодезичної мережі з наявними кадастровими та ГІС-системами. Багато територіальних громад мають різні формати зберігання геопросторових даних, що ускладнює уніфікацію координатних систем. Існують також проблеми сумісності між старими геодезичними пунктами, створеними ще у 1980–1990-х роках, і сучасними GNSS-системами, які працюють у координатній системі WGS-84. Для вирішення цих питань потрібна розробка національного трансформаційного модуля між системами координат (СК-63, УСК-2000, WGS-84) та створення єдиного центру обробки спостережень. Важливо також забезпечити автоматизований контроль якості даних, щоб уникати накопичення похибок у кадастрових базах. Виконання всіх завдань забезпечить виконання технологічних вимог.

Побудова електронної геодезичної мережі вимагає значних інвестицій: придбання станцій GNSS, серверного обладнання, програмного забезпечення, навчання персоналу. Для більшості територіальних громад України це завдання є фінансово обтяжливим, тому постає потреба у спільних регіональних програмах – наприклад, створення міжгромадських мереж спільного використання станцій. На рівні держави доцільно формувати єдину платформу підтримки GNSS-інфраструктури, куди громади могли б інтегрувати

власні локальні станції, отримуючи сервіс RTK через єдиний шлюз. Така модель застосовується у країнах Балтії та Польщі, де підтримку мереж здійснюють національні геодезичні служби, а впровадження мереж референціальних станцій багаторазово підвищує швидкість визначення просторових координат (до десятків разів) та забезпечує економію коштів до 2,5 раза [15].

Впровадження електронної геодезичної мережі має не лише технологічний, а й соціальний вимір, оскільки безпосередньо впливає на якість життя громади, прозорість управління землею та рівень довіри до влади. Завдяки даним з електронної геодезичної мережі громади отримують можливість швидко оновлювати кадастрову інформацію, уточнювати межі, планувати використання земельних ресурсів відповідно до генеральних планів та комплексних планів просторового розвитку території ТГ. Все це знаходить відображення у вигляді геопорталу, єдиного вебресурсу, що забезпечує доступ до геопросторових, метаданих та інших ресурсів з географічною прив'язкою та їх відображення. Головна умова функціонування, якого є сумісність і подальша публікація просторових даних у системі Національної інфраструктури геопросторових даних [10].

Підвищення точності координат дозволяє уникати накладок ділянок і помилок у топографічних основах, що є частою проблемою для сільських громад. Доступність точних геопросторових даних через геопортали створює умови для інвестиційного розвитку територій. Інвестори отримують змогу швидше аналізувати земельні ресурси, транспортну доступність, обмеження використання територій. Зокрема, геопортал містобудівного кадастру м. Миколаїв (створений за підтримки Данії) містить модуль «Руйнування та відновлення», який ефективно функціонує завдяки прив'язці кожного об'єкта до єдиної, високоточної геодезичної системи [16]. Проєкт подібної системи наведено на рис. 1.

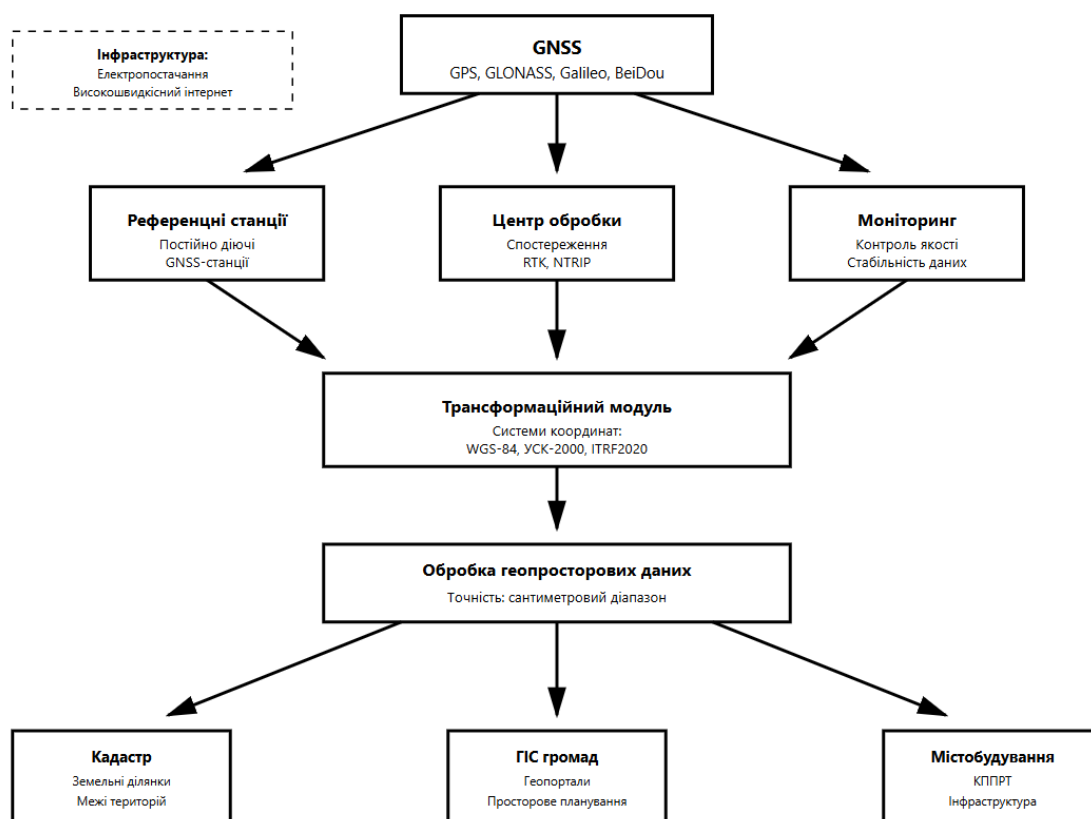


Рис.1. Ієрархічна модель функціонування електронної геодезичної мережі на основі GNSS-технологій

Джерело: розроблено авторами.

Прикладом успішного впровадження та розвитку електронної геодезичної мережі є Рівненська область, яка стала одним із регіонів, де у 2023-2024 роках реалізовано низку ініціатив з цифровізації кадастрових даних – створення локальної геодезичної мережі на базі GNSS-технологій для територіальних громад області. Передбачено встановлення 5 постійних GNSS-станцій у Рівному, Костополі, Дубно, Сарнах та Дубровиці інтегрованих у тестову мережу GNSS-RivneNet (рис. 2); створення вебпорталу з відображенням станцій у режимі онлайн, з можливістю отримання RTK-корекцій через мережевий протокол NTRIP; інтеграцію даних у систему ГІС-кадастру Рівненської області, що дозволить підвищити точність координат кадастрових меж на 3–5 см у порівнянні з попередньою системою, зменшити випадки накладення меж земельних ділянок до 18 %, а час опрацювання кадастрових запитів скоротити з 3 днів до 1 робочого дня [17].

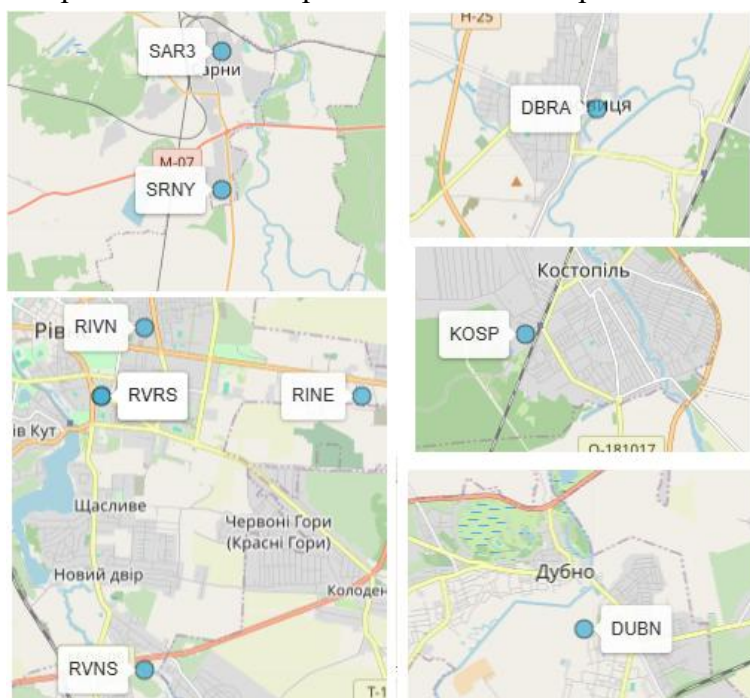


Рис. 2. Місце розташування постійних GNSS-станцій

Джерело: https://geo-monitor.upn.net.ua/uk/about_department/.

Висновки та рекомендації. У статті обґрунтовано, що електронна геодезична мережа нового покоління формує базовий координатний каркас для ефективного функціонування кадастру територіальних громад в умовах децентралізації та цифрової трансформації. Доведено, що перехід від фрагментарних наземних геодезичних пунктів до мереж постійних GNSS-станцій забезпечує суттєве підвищення точності координат, синхронізацію кадастрових, містобудівних і земельних даних та скорочення часу їх оновлення. Така інфраструктура створює передумови для уніфікації просторових даних у межах НІГД, зменшення кадастрових помилок і підвищення якості управлінських рішень на локальному рівні.

Встановлено, що впровадження електронної геодезичної мережі стримується комплексом взаємопов'язаних технічних, організаційних і кадрових бар'єрів. До ключових обмежень належать нерівномірне інфраструктурне забезпечення територій, проблеми сумісності координатних систем, відсутність єдиного трансформаційного модуля та дефіцит підготовлених фахівців у громадах. Доведено, що подолання цих бар'єрів потребує централізованої платформи обробки GNSS-даних, міжгромадської кооперації у створенні

регіональних мереж та довгострокових фінансових механізмів підтримки. Без системного державного супроводу ризик фрагментації та деградації мереж залишається високим.

Показано, що електронна геодезична мережа має виражений соціальний ефект, який виходить за межі суто технічного координатного забезпечення. Її функціонування підвищує прозорість земельних відносин, знижує кількість просторових конфліктів і сприяє зростанню довіри громадян до органів місцевого самоврядування. Доступність високоточних геопросторових даних через геопортали стимулює інвестиційну активність, покращує просторове планування та підтримує процеси післявоєнного відновлення. У підсумку ЕГМ постає як інструмент формування відкритого управління, цифрової демократії та сталого розвитку територіальних громад.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на вивчення та аналіз функціональних особливостей ГНСС та регіональних навігаційних систем.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті

Під час написання цього матеріалу автори використовували ChatGPT (інструмент штучного інтелекту від OpenAI) – з метою логічного структурування окремих частин тексту та формулювання деяких речень у науковому стилі. Після використання цього інструменту автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації

Список використаних джерел

1. Карпінський, Ю. О., Лященко, А. А., Лазоренко, Н. Ю., & Кінь, Д. О. (2024). Особливості роботи з геопросторовими даними громад для сталого розвитку їх територій. У А. П. Лізунова, М. Ю. Михальова (Ред.), *Land & property development: innovations and transformations* (с. 37-42). Київський національний університет будівництва і архітектури. <https://repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/71bd1d56-455f-48b4-b739-0b1a67fcf0c9/content>.
2. Сухий, П., Тревого, І., Бурштинська, Х., Сабадаш, В., & Дарчук, К. (2023). Новації у геодезично-картографічній та земельно-кадастровій діяльності й удосконалення змісту підготовки фахівців з геодезії та землеустрою. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 1(45), 72-81.
3. Бондар, О. І., Тафтай, В. В., Фінін, Г. С., & Шевченко, Р. Ю. (Ред.). (2022). *Сучасні технології моніторингу довкілля: на прикладі Київської агломерації*. ПП «Рута».
4. Пілічева, М.О., & Анопрієнко, Т.В. (2021). Сучасні тенденції у сферах геодезії, землеустрою, земельного кадастру та містобудування. *Комунальне господарство міст*, 4(164), 136-143. <https://10.33042/2522-1809-2021-4-164-136-143>.
5. Kocur-Bera, K. & Grzelka, I. (2022). Impact of Modern Technologies on the Organization of the Cadastral Data Modernization Process. *Sustainability*, 14, 16649. <https://doi.org/10.3390/su142416649>.
6. Doskocz, A. (2016). The current state of the creation and modernization of national geodetic and cartographic resources in Poland. *Open Geosciences*, 8(1), 579-592. <https://doi.org/10.1515/geo-2016-0059>.
7. Makedon, V., Myachin, V., Alosyna, T., Cherniavska, I., Karavan, N. (2025). Improving the Readiness of Enterprises to Develop Sustainable Innovation Strategies through Fuzzy Logic Models. *Economic Studies (Ikonomicheski Izsledvania)*, 34(5), 165-179. https://archive.econ-studies.iki.bas.bg/2025/2025_05/2025_05_09.pdf
8. Холодюк, О. В. (2020). Глобальні навігаційні супутникові системи та їх роль у технологіях точного землеробства. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2 (109), 71-87
9. Фінін, Г. С., & Шевченко, Р. Ю. (2022). Картогеоінформаційне забезпечення управління у сфері екологічної безпеки та реалізації програм захисту довкілля. *Екологічні науки* 2(41), 67-68. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.2-41.12>
10. Ачкасов, А., Попович, Н., Пересадько, В., & Гордезіані, Т. (2024) Геоінформаційне забезпечення геопорталів територіальних громад: довоєнні реалії й післявоєнні перспективи. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна*, (60), 124-136.

11. Ступень, О. І., Прокопенко, Н. І., & Шевчук, С. М. (2025) Цифрова трансформація системи землеустрою: автоматизація управлінських процесів у сфері використання та охорони земельних ресурсів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, (212), 172-184
12. Горбата, Л. П. (2024) Використання відкритих даних в умовах сталого розвитку територіальних громад. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, (4), 407-412.
13. Третяк, А., Третяк, В., & Лобунько, Ю. (2021) Інформаційні проблеми розроблення комплексних планів просторового розвитку територій територіальних громад. *Міжнародний науковий журнал «Грааль науки»*, (9), 33-41. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.22.10.2021.02>.
14. Стопхай, Ю., Плиса, В., & Матвієнко О. (2023) Створення системи геодезичного моніторингу станцій ГНСС мереж на основі української постійно діючої (перманентної) мережі спостережень ГНСС. У І. Калинич, А. Мигаль, В. Дробнич, Л. Потіш (Ред.), *Нові технології в геодезії, землепорядкуванні та природокористуванні* (с. 31-35) Ужгородський національний університет. <https://dspace.uzhnu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/00b9975c-4e9b-4e96-a43c-fe508224b023/content>.
15. Коренець, О., & Лукіяничук, А. (2024) Аналіз сучасного стану розвитку мереж ГНСС-спостережень. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*, 2(58), 62-67.
16. Makedon, V., Karpenko, L., Petko, S., Bondarenko, S., & Ryzhova, V. (2024). Economic efficiency and environmental benefits of the development of renewable energy sources. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*, 32(2), 239–257. <https://novapublishers.com/shop/economic-efficiency-and-environmental-benefits-of-the-development-of-renewable-energy-sources/>.
17. *Стратегія розвитку Рівненської області на період до 2027 року* (2020, листопад). Рівненська обласна державна адміністрація. Взято 11 листопада 2025 з <https://www.rv.gov.ua/storage/app/sites/11/2020/strategia-2027-proekt.pdf>.

References

1. Karpinskyi, Yu. O., Liashchenko, A. A., Lazorenko, N. Yu., & Kin, D. O. (2024). Osoblyvosti roboty z heoprostorovymy danymy hromad dlia staloho rozvytku yikh terytorii. U A. P. Lizunova, M. Yu. Mykhalova (Red.), [Features of working with geospatial data of communities for the sustainable development of their territories. In A. P. Lizunov, M. Yu. Mikhalov (Eds.), *Land & property development: innovations and transformations* (pp. 37-42). Kyivskyi natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury - Kyiv National University of Construction and Architecture. <https://repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/71bd1d56-455f-48b4-b739-0b1a67fcf0c9/content>
2. Sukhyi, P., Trevoho, I., Burshtynska, H., Sabadash, V., & Darchuk, K. (2023). Novatsii u heodezychno-kartohrafichnii ta zemelno-kadaastrovii diialnosti y udoskonalennia zmistu pidhotovky fakhivtsiv z heodezii ta zemleustroi [Innovations in geodesy, cartography, land cadastre activities, and improvement of training content for specialists in geodesy and land management]. *Cuchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva - Modern achievements in geodetic science and production*, 1(45), 72-81
3. Bondar, O.I., Taftai, V.V., Finin, H.S., & Shevchenko, R.Yu. (Ред.). (2022). Suchasni tekhnologii monitorynhu dovkillia: na prykladi Kyivskoi ahlomeratsii [Modern environmental monitoring technologies: the case of the Kyiv agglomeration]. *PP “Ruta” – Private enterprise “Ruta”*.
4. Pilicheva, M.O., & Anopriienko, T.V. (2021). Suchasni tendentsii u sferakh heodezii, zemleustroi, zemelnoho kadastru ta mistobuduvannia [Current trends in the fields of geodesy, land management, land cadastre and urban planning]. *Komunalne hospodarstvo mist - Municipal services in cities*, 4(164), 136-143. <https://10.33042/2522-1809-2021-4-164-136-143>
5. Kocur-Bera, K., Grzelka, I. (2022). Impact of Modern Technologies on the Organization of the Cadastral Data Modernization Process. *Sustainability*, (14), 16649. <https://doi.org/10.3390/su142416649>.
6. Doskocz A. (2016) The current state of the creation and modernization of national geodetic and cartographic resources in Poland. *Open Geosciences*, 8(1), 579-592. <https://doi.org/10.1515/geo-2016-0059>.
7. Makedon, V., Myachin, V., Alosyna, T., Cherniavska, I., Karavan, N. (2025). Improving the Readiness of Enterprises to Develop Sustainable Innovation Strategies through Fuzzy Logic Models. *Economic Studies (Ikonomicheski Izsledvania)*, 34(5), 165-179. https://archive.econ-studies.iki.bas.bg/2025/2025_05/2025_05_09.pdf#8.

8. Kholodiuk, O. V. (2020). Hlobalni navihatsiini suputnykovi systemy ta yikh rol u tekhnolohiiakh tochnoho zemlerobstva [Global navigation satellite systems and their role in precision farming technologies]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK – Technology, energy, transport, agriculture*, 2 (109), 71-87.
9. Finin, H.S., & Shevchenko, R.Yu. (2022). Kartoheoinformatsiine zabezpechennia upravlinnia u sferi ekolohichnoi bezpeky ta realizatsii prohran zakhystu dovkillia [Cartographic and geographic information support for management in the field of environmental safety and implementation of environmental protection programmes]. *Ekolohichni nauky – Environmental sciences*, 2(41), 67-68. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.2-41.12>.
10. Achkasov, A., Popovych, N., Peresadko, V., & Gordezianin, T. (2024). Heoinformatsiine zabezpechennia heoportativ terytorialnykh hromad: dovoienni realii y pisliavoienni perspektyvy [Geoinformation support for local community geoportals: pre-war realities and post-war prospects]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V.N. Karazina - Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University*, (60), 124-136.
11. Stupen, O. I., Prokopenko, N. I., & Shevchuk, C. M. (2025). Tsyfrova transformatsiia systemy zemleustroiu: avtomatyzatsiia upravlinnykh protsesiv u sferi vykorystannia ta okhorony zemelnykh resursiv [Digital transformation of the land management system: automation of management processes in the field of land use and protection]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transport – Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, (212), 172-184.
12. Horbata, L. P. (2024). Vykorystannia vidkrytykh danykh v umovakh staloho rozvytku terytorialnykh hromad [The use of open data in the context of sustainable development of local communities]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Bulletin of Kherson National Technical University*, (4), 407-412.
13. Tretiak, A., Tretiak, V., & Lobunko, Yu. (2021). Informatsiini problemy rozroblennia kompleksnykh planiv prostorovoho rozvytku terytorii terytorialnykh hromad [Information problems in developing comprehensive spatial development plans for local communities]. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal «Hraal nauky» - International scientific journal 'Grail of Science'*, (9), 33-41. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.22.10.2021.02>.
14. Stopkhai, Yu., Plyska, V., & Matvieienko O. (2023). Stvorennia systemy heodezychnoho monitorynhu stantsii HNSS merezh na osnovi ukraïnskoi postiino diiuchoi (permanentnoi) merezhi sposterezhen HNSS. U I. Kalynych, A. Myhal, V. Drobnych, L. Potish (Red.), [Creation of a geodetic monitoring system for GNSS stations based on the Ukrainian permanent GNSS observation network. In I. Kalinich, A. Mygal, V. Drobnych, L. Potish (Eds.),], *Novi tekhnolohii v heodezii, zemlevporiadkuvanni ta pryrodokorystuvanni. Uzhhorodskyi natsionalnyi universytet. - New technologies in geodesy, land management and natural resource use* (pp. 31-35). Uzhhorod National University. <https://dspace.uzhnu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/00b9975c-4e9b-4e96-a43c-fe508224b023/content>.
15. Korenets, O., & Lukianchuk, A. (2024). Analiz suchasnoho stanu rozvytku merezh HNSS-sposterezhen [Analysis of the current state of development of GNSS observation networks]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka - Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv*, 2(58), 62-67.
16. Makedon, V., Karpenko, L., Petko, S., Bondarenko, S., & Ryzhova, V. (2024). Economic efficiency and environmental benefits of the development of renewable energy sources. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*, 32(2), 239–257. <https://novapublishers.com/shop/economic-efficiency-and-environmental-benefits-of-the-development-of-renewable-energy-sources/>.
17. Stratehii rozvytku Rivnenskoï oblasti na period do 2027 roku (2020, lystopad). Rivnenska oblasna derzhavna administratsiia [Development strategies for Rivne Region for the period up to 2027 (November 2020). Rivne Regional State Administration]. Retrieved on November 11, 2025 <https://www.rv.gov.ua/storage/app/sites/11/2020/strategia-2027-proekt.pdf>.

Дата першого надходження статті до видання: 26.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.12.2025

Iryna Udovenko¹, Lidiia Smolenska², Stefan Molnar D.³

¹PhD in Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Cadastre
Uman National University (Uman, Ukraine)

E-mail: irinaudovenko8@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5971-8365>

²Senior Lecturer, Department of Geodesy, Land Management and Land Cadastre
Odessa State Agrarian University (Odesa, Ukraine)

E-mail: 3761077@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5002-8405>

³Doctor of Philosophy, Associate Professor of the Department of Geography and Tourism
Transcarpathian Hungarian University named after Ferenc Rákóczi II (Transcarpathia, Ukraine)

E-mail: molnar.d.istvan@kmf.org.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2959-9136>

MODERNIZATION OF ELECTRONIC GEODETIC INFRASTRUCTURE FOR THE NEEDS OF THE CADASTER OF TERRITORIAL COMMUNITIES: TECHNOLOGICAL BARRIERS AND SOCIAL IMPERATIVES

The article examines the implementation of a next-generation electronic geodetic network as a fundamental infrastructure for maintaining the cadastral systems of territorial communities in the context of decentralization and the digital transformation of spatial management. The study considers the technical, organizational, and social aspects of creating and operating these networks based on continuously operating reference stations of Global Navigation Satellite Systems (GNSS). It analyzes the current state of geodetic infrastructure development in Ukraine, its regulatory and legal framework, and the experience of integration into the European geospatial space. The article identifies technical challenges in implementing electronic geodetic networks (EGN), including infrastructure support (geologically stable station placement, uninterrupted power supply, and high-speed Internet access for real-time GNSS data transmission), coordinate system transformation (a national transformation module and a unified observation processing center), automated data quality control, and the professional training of specialists. The construction of an electronic geodetic network requires significant investment. It is noted that the introduction of an EGN increases the accuracy of cadastral coordinate data, reduces update time, minimizes land disputes, and creates favorable conditions for the integration of cadastral and urban planning systems. Particular attention is paid to social effects, including increased transparency in land resource management, enhanced public trust in local self-government, the development of digital services, and the attraction of investments. Based on the analysis of domestic and international experience, the article proposes a model of inter-community cooperation for the creation of regional GNSS networks and provides recommendations for developing a unified national platform for geodetic data monitoring. It is proven that the next-generation electronic geodetic network is not only a technological tool for cadastral support but also a driver for the development of open governance, sustainable spatial planning, and digital democracy in Ukraine.

Keywords: electronic geodetic network; GNSS; cadastral system of territorial communities; geographic information systems; spatial management; digitalization; coordinate support; decentralization; geospatial data; technical challenges; social expectations.

Fig.: 1. References: 13.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-592-602](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-592-602)

УДК 349.41

**Юлія Володимирівна Щербак¹, Ігор Валентинович Корнієнко²,
Євгеній Юрійович Сахно³, Сергій Миколайович Заворотний⁴**

¹старший викладач кафедри геодезії, картографії та землеустрою
Національний університет «Чернігівська політехніка» (м. Чернігів, Україна).
E-mail: Shch.Yu15@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3439-3792>

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії, картографії та землеустрою
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: cornelukr@gmail.com. ORCID <http://orcid.org/0000-0001-9105-0780>
ResearcherID: F-7236-2017. SCOPUS Author ID: 57485157200

³доктор технічних наук, професор кафедри геодезії, картографії та землеустрою
Національний університет «Чернігівська політехніка» (м. Чернігів, Україна).
E-mail: evsakhno@ukr.net. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9789-7242>. SCOPUS ID: 57190493489

⁴кандидат технічних наук, старший викладач, завідувач кафедри геодезії, картографії та землеустрою
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: zavorotnyiserhii@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2139-8877>. ResearcherID: NRY-3592-2025

ФУНКЦІОНУВАННЯ ДЕРЖАВНОГО ЗЕМЕЛЬНОГО КАДАСТРУ В УКРАЇНІ: АДАПТАЦІЯ ДО УМОВ ВОЄННОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

У статті представлено стратегічні напрями удосконалення системи управління земельними ресурсами України в умовах воєнного стану та повоєнного відновлення. Обґрунтовано необхідність створення інтегрованої системи моніторингу стану земель на основі геоінформаційних технологій та даних дистанційного зондування Землі. Запропоновано розробку національного реєстру пошкоджених і забруднених земель, механізму компенсації для постраждалих землевласників, а також програм рекультивування територій із високим аграрним потенціалом. Обґрунтовано необхідність посилення державного нагляду за використанням і охороною земель, а також модернізації технічного забезпечення ДЗК з метою гарантування стабільної роботи системи, захисту прав власності.

Ключові слова: Державний земельний кадастр; воєнний стан; управління земельними ресурсами.

Рис.: 4. Бібл.: 8.

Актуальність теми. Актуальність дослідження визначається гостротою проблем, спричинених воєнним станом в Україні та стратегічною важливістю Державного земельного кадастру (ДЗК) для управління земельними ресурсами. Стабільне функціонування кадастру є критично важливим для гарантування прав власності, продовольчої безпеки, підтримки ринку землі та реалізації стратегій повоєнного відновлення. Зростання ризиків правопорушень у земельній сфері актуалізує необхідність комплексного дослідження загроз і розробки превентивних механізмів на державному рівні.

Постановка проблеми. Продовжується адаптація кадастрової системи до екстремальних умов воєнного стану через цифровізацію, інтеграцію з іншими реєстрами та оновлення нормативної бази, однак ефективність вжитих заходів та довгострокові наслідки залишаються недостатньо дослідженими. У відкритих джерелах не виявлено комплексного аналізу ефективності адаптації кадастрової системи до функціонування в кризових умовах, відсутність якого обмежує можливості для розробки стійкої стратегії функціонування кадастру в умовах війни та повоєнного відновлення. Розв'язання зазначеної проблеми має важливе наукове й практичне значення, оскільки дозволяє систематизувати виклики у функціонуванні ДЗК, оцінити ефективність адаптаційних механізмів та обґрунтувати рекомендації з метою підвищення стійкості кадастрової системи, оновлення державної політики та посилення інституційної спроможності у сфері управління земельними ресурсами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У період воєнного стану регулювання земельних відносин у сфері кадастру та землеустрою має важливе значення, адже впливає на безпеку не тільки аграрного сектору, а й країни загалом. Ці питання висвітлюються у наукових дослідженнях і публікаціях. Зокрема, у статті [8] проаналізовано специфіку виконання землевпорядних робіт в умовах воєнного стану, виокремлено основні проблеми й причини їх виникнення, що зумовлені технічними, юридичними, організаційними та

економічними чинниками. Наслідки військової агресії для земельного фонду України, включаючи забруднення, руйнування інфраструктури та зміни у землекористуванні, аналізуються Центром досліджень продовольства та землекористування [1; 3]. У матеріалах доповіді [4] зазначено, що війна рф проти України спричинила катастрофічні екологічні збитки, які в поєднанні з іншими чинниками загрожують серйозними довгостроковими наслідками. Підкреслено потребу в розробці методики оцінки шкоди природним екосистемам та заходів з їх відновлення і збереження. Проведені дослідження свідчать про активне вивчення проблем кадастру та землеустрою в умовах воєнного стану. Визначено ключові аспекти адаптації галузі, оцінки збитків, застосування цифрових технологій та правового регулювання.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. В умовах воєнного стану система управління земельними ресурсами України зазнала суттєвих трансформацій, що виявилися у швидкому прийнятті законодавчих змін та обмеженні державного контролю на окремих територіях. Це спричинило появу значних правових і практичних проблем, зокрема щодо гарантування права власності та компенсації втрат. Стратегії повоєнного відновлення земельного фонду вимагають розробки комплексних національних програм і вдосконалення підходів до оцінки деградації земель, з обов'язковою інтеграцією екологічних принципів у всі сектори відновлення.

Мета статті. Метою цієї статті є узагальнений аналіз управління земельними ресурсами в Україні в умовах воєнного стану та рекомендації повоєнного відновлення.

Результати досліджень. Управління земельними ресурсами в Україні є складним та багаторівневим завданням, яке перебуває у стані трансформації. Повномасштабна військова агресія, розпочата у 2022 році, спричинила глибокі довготривалі руйнівні зміни для земельного фонду України та систем управління, що включають такі ключові аспекти:

- фізичні руйнування – внаслідок бойових дій пошкоджено та знищено земельні ділянки й пов'язану з ними інфраструктуру;
- екологічні наслідки – забруднення ґрунтів вибухонебезпечними речовинами та іншими шкідливими матеріалами, втрата біорізноманіття;
- зміни в землекористуванні – масова міграція населення та бойові дії викликали суттєві зміни у структурі землекористувань, зокрема на землях сільськогосподарського призначення;
- правові порушення – проблеми із гарантією прав власності, особливо на тимчасово окупованих територіях в умовах воєнного стану;
- адміністративні проблеми – порушення і обмеження в роботі ДЗК (процесів реєстрації прав на землю, загального адміністрування, кадрового забезпечення тощо).

З метою стабілізації функціонування земельних відносин в умовах воєнного стану, запроваджено законодавчі зміни, які забезпечили відновлення порядку реєстрації оренди сільськогосподарських земель, дозвіл на безоплатну приватизацію за певних умов, скасування компенсації втрат сільськогосподарського виробництва на певних територіях, регулювання внесення даних до ДЗК, а також призупинення безоплатної передачі земель державної та комунальної власності у приватну власність. Також були затверджені порядки визначення шкоди та збитків, завданих Україні, прийняті закони, що регулюють процедуру примусового відчуження майна в умовах воєнного стану [5-7].

Крім того, продовжується робота з цифровізації та актуалізації відомостей ДЗК [2]. У 2024 році було здійснено масштабне вдосконалення функціональних можливостей ДЗК, вдосконалено 4 та впроваджено 21 функціональне оновлення. Серед ключових новацій – розмежування прав доступу до відомостей за категоріями (ролями) користувачів, а також інтеграція інформації щодо охорони земель, ґрунтів, меліоративних мереж та функціональних зон адміністративно-територіальних утворень, створено візуалізацію інформаційного шару про зону затоплення в межах Каховського водосховища, що має виняткове значення для екологічного моніторингу.

Значний обсяг інформації додано до бази даних кадастру. Зокрема, за рік було внесено відомості про 722,4 тис. нових земельних ділянок, що перевищує показник 2023 року (618,9 тис.), загальна кількість облікованих ділянок досягла 25,6 млн. Також додано відомості про: межі 543 адміністративно-територіальних одиниць (з 11293, у 2023 р. – 604); 91 територіальну громаду (із загальних 107, у 2023 р. – 17); 133 функціональні зони, що становить значний приріст порівняно з 5 зонами у 2023 році; 8 меліоративних мереж та 9 складових частин меліоративних мереж (у 2023 р. – 8 і 5 відповідно). Вперше у 2024 році внесено дані про один масив земель сільськогосподарського призначення.

З 01.11.2019 р. до ДЗК було включено інформацію про 1 044,6 тис. земельних ділянок, права на які виникли до 01.01.2013, з них у 2024 році – 203,4 тис., що перевищує аналогічний показник 2023 року (139,3 тис.). Забезпечено електронну інформаційну взаємодію ДЗК з іншими державними реєстрами та інформаційними системами з використанням системи електронної взаємодії державних електронних інформаційних ресурсів «Трембіта». Це підвищило рівень інтероперабельності державних баз даних, зменшило адміністративне навантаження на органи влади та забезпечило прозорість обробки земельно-кадастрової інформації.

У 2024 році діяльність Держгеокадастру у сфері державного нагляду за використанням і охороною земель набула нової актуальності в умовах загострених ризиків втрати контролю над сільськогосподарськими угіддями. Впродовж року до територіальних органів служби надійшло 653 звернення щодо порушення вимог земельного законодавства, видано 660 постанов про залучення інспекторів до кримінальних проваджень і 61 постанову та судові рішення про сприяння у їхньому закритті, що свідчить про посилення міжвідомчої координації з правоохоронними органами. У результаті нараховано 107 378 грн шкоди, заподіяної порушеннями, добровільно відшкодовано 65 075 грн. Окремо варто зазначити зростання інституційної активності в напрямку протидії незаконному володінню сільськогосподарськими землями. Зокрема, було підготовлено/подано 810 позовів про конфіскацію таких ділянок, а також 977 рішень про їх фактичну конфіскацію на загальну площу 1893,5 га. Загалом призначено 1344 судових розгляди щодо вказаних порушень.

У результаті проведених заходів до державного бюджету надійшло 14 623 855 грн, з них: 7 635 722 грн – як компенсація втрат сільськогосподарського виробництва; 6 046 060 грн – втрат лісгосподарського виробництва; 942 068 грн – шкода, завдана земельним ресурсам через порушення законодавства; 10 795 грн – адміністративні штрафи та інші санкції.

Інформаційно-аналітична база для контрольних заходів формувалася на основі даних дистанційного зондування землі, зокрема проаналізовано 103,7 тис. га земель сільськогосподарського призначення (запасу); 1,8 млн га — земель, щодо яких відсутня інформація у Державному реєстрі речових прав про право власності чи користування; 2,5 млн га — ділянок, які обробляються фактично, але не мають юридичного оформлення, що було виявлено за допомогою супутникового моніторингу. Детальна публічна інформація щодо структури, динаміки та розподілу земельного фонду України наразі не відображається. Однак, на офіційному сайті Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України (Міндовкілля) доступна інформація про земельні ресурси, зокрема щодо територій природно-заповідного фонду. Міндовкілля також підтримує онлайн-платформу ЕкоСистема, яка надає актуальну інформацію про стан навколишнього середовища, включаючи моніторинг земель і ґрунтів. Ця платформа реалізована у партнерстві з Міністерством цифрової трансформації за підтримки проекту USAID/UK aid «Прозорість та підзвітність у державному управлінні та послугах/TAPAS». Серед основних негативних впливів – забруднення ґрунтів важкими металами, нафтопродуктами та іншими токсичними речовинами внаслідок бойових дій та руйнування інфраструктури. Окупація близько 40 %

екологічно цінних територій України, включаючи ПЗФ, призвела до порушення екосистем та деградації земель. Зокрема, значна частина національних природних парків опинилася в зоні бойових дій або під окупацією, що ускладнює проведення моніторингу та охорони цих територій. Унаслідок використання вибухових речовин, обстрілів та руйнування промислових об'єктів відбулося значне забруднення ґрунтів. Це створює серйозні ризики для сільськогосподарського виробництва, оскільки забруднені землі можуть бути непридатними для вирощування сільськогосподарських культур без проведення відповідної рекультиваци та очищення.

Згідно з оцінкою стану земельних ресурсів, здійсненою Центром досліджень продовольства та землекористування (KSE Агроцентр) на основі даних Світового банку, Уряду України, Європейської Комісії та ООН, у 2022 році найбільше постраждали від повномасштабного вторгнення російської федерації території Луганської (100 %), Херсонської (95 %), Чернігівської (80 %), Запорізької (74 %), Сумської (70 %) та Донецької (64 %) областей (рис. 1).



Рис. 1. Території переміщення військ, окупованих, деокупованих і замінованих земель (лютий 2022 – лютий 2023 рр.)

Джерело: Центр досліджень продовольства та землекористування [1].

Унаслідок успішних контрнаступальних дій Збройних сил України у 2022 році, станом на початок 2023 року території Київської, Житомирської та Чернігівської областей були повністю деокуповані, частина земель Миколаївської та Сумської областей залишалася під окупацією — відповідно 3 та 15 %. За підсумками оцінки, проведеної у 2023 році, загальна площа земельних ресурсів України, доступних для використання (тобто таких, що не перебували під тимчасовою окупацією, не охоплені бойовими діями, не зазнали мінування чи інших обмежень господарської діяльності), зросла на 13,58 % порівняно з 2022 роком і становила 46787,98 тис. га. Із них площа сільськогосподарських угідь збільшилася на 13,19 %, зокрема ріллі і перелогів – на 12,31 %, а лісів і лісовкритих площ зросла на 16,73 %.

Таблиця 1 – Площа територій підконтрольних Україні (2021-2024 рр.)

Адміністративна область	Загальна площа до війни (2021 р.), тис. га	Частка недоступних територій, %			Площа територій, придатних до ведення господарської діяльності						
					Загальна площа				Сільськогосподарські угіддя		
		2022	2023	2024	2022	2023	2024	2021	2022	2023	2024
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Вінницька	2649,20	0	0	0	2649,20	2649,20	2649,20	2014,19	2014,19	2014,19	2014,19
Волинська	2014,40	0	0	0	2014,40	2014,40	2014,40	1047,49	1047,49	1047,49	1047,49
Дніпропетровська	3192,30	0	0	0	3192,30	3192,30	3192,30	2512,02	2512,02	2512,02	2512,02
Донецька	2657,70	64	64	64	956,77	956,77	956,77	2046,43	736,71	736,71	736,71
Житомирська	2982,70	14	0	0	2565,12	2982,70	2982,70	1509,25	1297,95	1509,25	1509,25
Закарпатська	1275,30	0	0	0	1275,30	1275,30	1275,30	451,46	451,46	451,46	451,46
Запорізька	2718,30	74	74	74	706,76	706,76	706,76	2242,60	583,08	583,08	583,08
Івано-Франківська	1392,70	0	0	0	1392,70	1392,70	1392,70	630,89	630,89	630,89	630,89
Київська	2816,20	37	0	0	1774,21	2816,20	2816,20	1855,88	1169,20	1855,88	1855,88
Кіровоградська	2458,80	0	0	0	2458,80	2458,80	2458,80	2032,20	2032,20	2032,20	2032,20
Луганська	1838,97	100	100	100	0,00	0,00	0,00	1401,30	0,00	0,00	0,00
Львівська	2183,10	0	0	0	2183,10	2183,10	2183,10	1261,83	1261,83	1261,83	1261,83
Миколаївська	2458,55	14	3	3	2114,35	2384,79	2384,79	1993,88	1714,74	1934,07	1934,07
Одеська	3331,38	0	0	0	3331,38	3331,38	3331,38	2517,19	2517,19	2517,19	2517,19
Полтавська	2875,00	0	0	0	2875,00	2875,00	2875,00	2164,88	2164,88	2164,88	2164,88
Рівненська	2005,10	0	0	0	2005,10	2005,10	2005,10	926,36	926,36	926,36	926,36
Сумська	2383,20	70	15	15	714,96	2025,72	2025,72	1696,84	509,05	1442,31	1442,31
Тернопільська	1382,47	0	0	0	1382,47	1382,47	1382,47	1050,68	1050,68	1050,68	1050,68
Харківська	3441,82	46	46	20	1858,58	1858,58	2753,46	2639,88	1425,53	1425,53	2111,90
Херсонська	2846,10	95	95	80	142,31	142,31	569,22	1966,66	98,33	98,33	393,33
Хмельницька	2062,90	0	0	0	2062,90	2062,90	2062,90	1565,74	1565,74	1565,74	1565,74
Черкаська	2091,60	0	0	0	2091,60	2091,60	2091,60	1451,57	1451,57	1451,57	1451,57
Чернівецька	809,60	0	0	0	809,60	809,60	809,60	469,57	469,57	469,57	469,57
Чернігівська	3190,30	80	0	0	638,06	3190,30	3190,30	2060,93	412,19	2060,93	2060,93
АР Крим	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Україна	57057,69				41194,97	46787,98	48109,77	39509,68	28042,84	31742,15	32723,51
Динаміка порівняно з довоєнним періодом, %					31,74	22,48	20,29		32,12	23,16	20,79

Закінчення таблиці 1

Адміністративна об- ласть	Площа територій, придатних до ведення господарської діяльності											
	Рілля та перелоги				Сіножаті та пасовища				Ліси та інші лісовкриті площі			
	2021	2022	2023	2024	2021	2022	2023	2024	2021	2022	2023	2024
1	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Вінницька	1726,48	1726,48	1726,48	1726,48	236,31	236,31	236,31	236,31	380,43	380,43	380,43	380,43
Волинська	672,81	672,81	672,81	672,81	362,59	362,59	362,59	362,59	696,98	696,98	696,98	696,98
Дніпропетровська	2152,57	2152,57	2152,57	2152,57	309,01	309,01	309,01	309,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Донецька	1655,83	596,10	596,10	596,10	329,55	118,64	118,64	118,64	204,64	73,67	73,67	73,67
Житомирська	1175,18	1010,66	1175,18	1175,18	313,18	269,34	313,18	313,18	1124,48	967,05	1124,48	1124,48
Закарпатська	200,22	200,22	200,22	200,22	224,45	224,45	224,45	224,45	724,37	724,37	724,37	724,37
Запорізька	1902,81	494,73	494,73	494,73	0,00	0,00	0,00	0,00	119,61	31,10	31,10	31,10
Івано-Франківська	404,00	404,00	404,00	404,00	210,20	210,20	210,20	210,20	635,07	635,07	635,07	635,07
Київська	1529,20	963,39	1529,20	1529,20	278,80	175,65	278,80	278,80	811,07	510,97	811,07	811,07
Кіровоградська	1764,68	1764,68	1764,68	1764,68	242,44	242,44	242,44	242,44	130,81	130,81	130,81	130,81
Луганська	989,00	0,00	0,00	0,00	402,37	0,00	0,00	0,00	246,05	0,00	0,00	0,00
Львівська	794,65	794,65	794,65	794,65	211,76	211,76	211,76	211,76	694,23	694,23	694,23	694,23
Миколаївська	1706,23	1467,36	1655,05	1655,05	253,23	217,78	245,63	245,63	135,22	116,29	131,16	131,16
Одеська	2104,10	2104,10	2104,10	2104,10	82,29	82,29	82,29	82,29	223,54	223,54	223,54	223,54
Полтавська	1776,46	1776,46	1776,46	1776,46	359,38	359,38	359,38	359,38	284,63	284,63	284,63	284,63
Рівненська	661,68	661,68	661,68	661,68	254,65	254,65	254,65	254,65	806,05	806,05	806,05	806,05
Сумська	1227,35	368,20	1043,25	1043,25	448,04	134,41	380,84	380,84	459,96	137,99	390,96	390,96
Тернопільська	861,28	861,28	861,28	861,28	40,09	40,09	40,09	40,09	201,84	201,84	201,84	201,84
Харківська	123,60	1146,75	1146,75	1698,88	516,27	278,79	278,79	413,02	457,76	247,19	247,19	366,21
Херсонська	1787,35	89,37	89,37	357,47	156,54	7,83	7,83	31,31	153,69	7,68	7,68	30,74
Хмельницька	1254,24	1254,24	1254,24	1254,24	270,24	270,24	270,24	270,24	286,74	286,74	286,74	286,74
Черкаська	1280,06	1280,06	1280,06	1280,06	143,27	143,27	143,27	143,27	338,84	338,84	338,84	338,84
Чернівецька	324,65	324,65	324,65	324,65	0,00	0,00	0,00	0,00	258,26	258,26	258,26	258,26
Чернігівська	1477,11	295,42	1477,11	1477,11	558,30	111,66	558,30	558,30	746,53	149,31	746,53	746,53
АР Крим	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Україна	31551,55	22409,87	25184,61	26004,85	6202,97	4260,77	5128,69	5286,40	10120,78	7903,03	9225,63	9367,70
Динаміка порів- няно з довоснним періодом, %		31,93	23,51	21,02		43,45	31,93	29,84		26,05	13,67	12,34

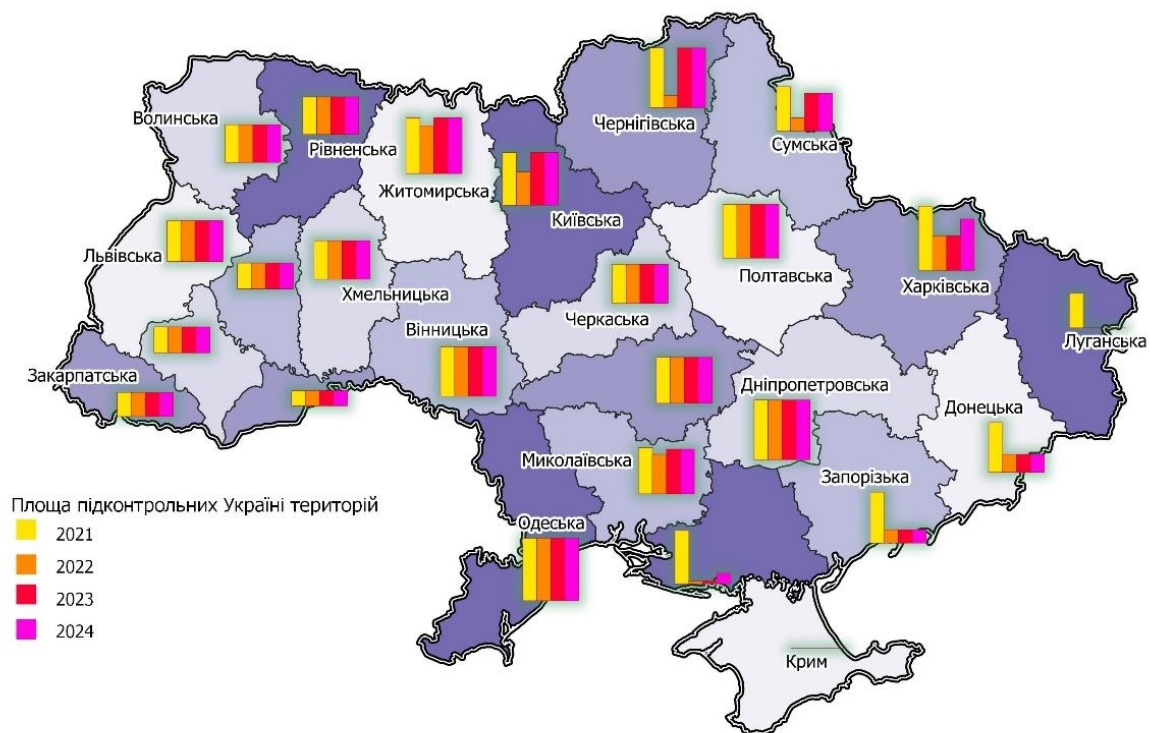


Рис. 2. Площа підконтрольних Україні територій (2021-2024 рр.)

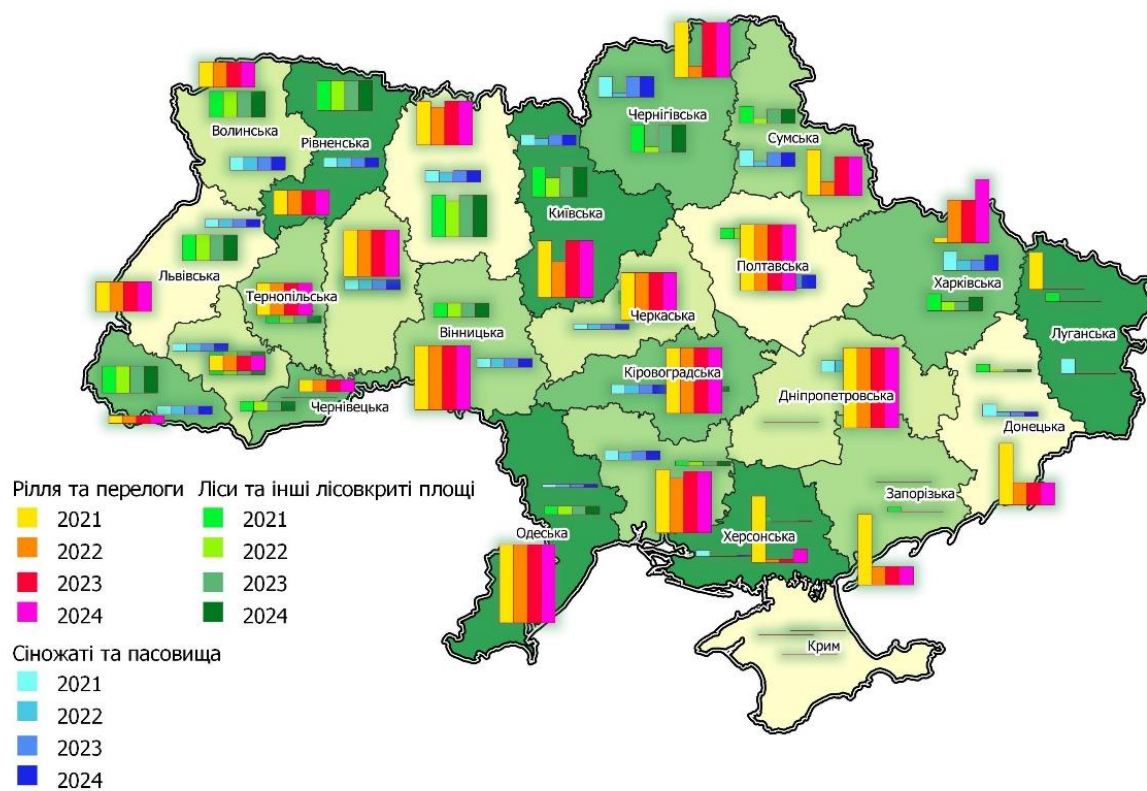


Рис. 3. Площа територій, придатних до ведення господарської діяльності (2021-2024 рр.)

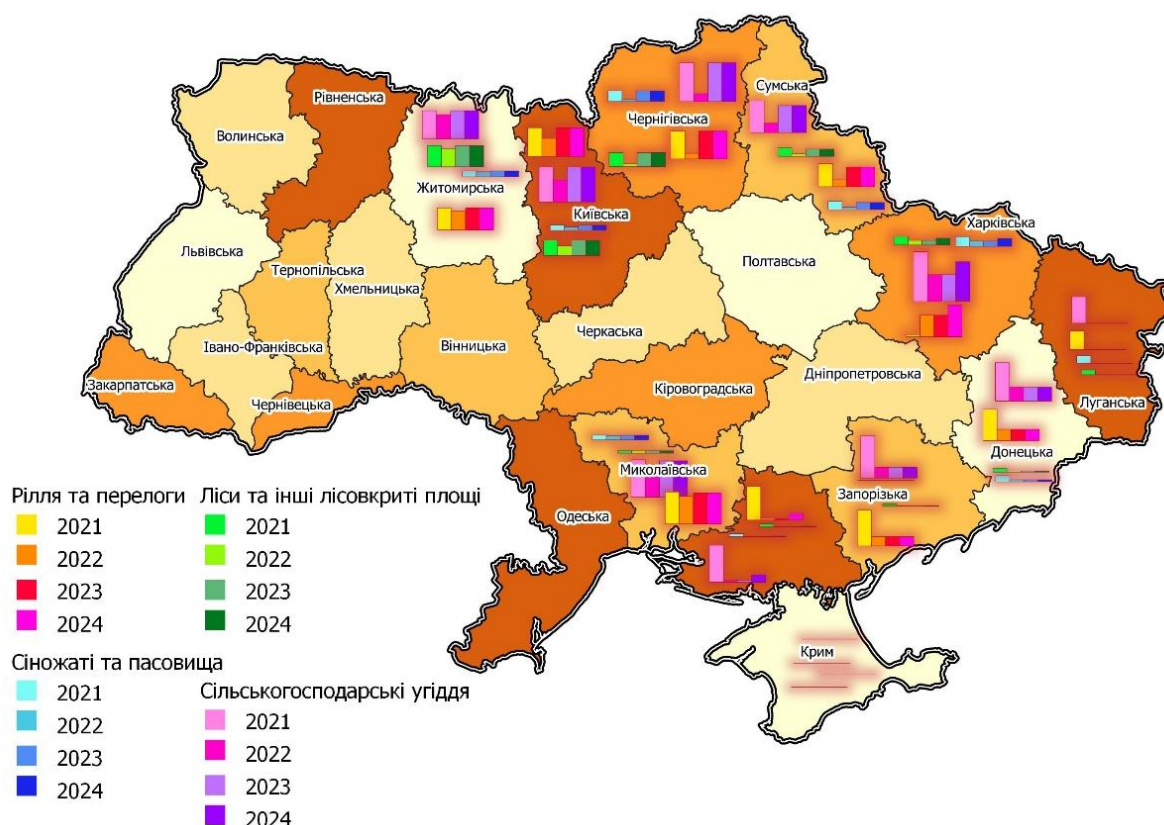


Рис. 4. Динаміка площі у зонах високого ризику (2021-2024 р.р.)

На початку 2024 року площа територій, придатних до ведення господарської діяльності, досягла 48109,77 тис. га, що на 16,78 % більше, ніж у 2022 році та на 2,83 % більше, ніж у 2023 році. Найбільші прирости зафіксовано у Харківській та Херсонській областях внаслідок деокупації територій. Зокрема, площа сільськогосподарських земель зросла на 16,69 % порівняно з 2022 роком, у т. ч. площа ріллі і перелогів – на 15,31 %, сіножатей і пасовищ – на 24,07 %, а лісів і лісовкритих площ – на 18,53 % (табл. 1, рис. 2-4).

У 2025 році зони високого ризику охоплюють: території вздовж лінії фронту (Донецька, Луганська, Харківська області); тимчасово окуповані території (південь Херсонської, частина Запорізької і Миколаївської областей); прикордонні області (Чернігівська, Сумська); ділянки з підтвердженим забрудненням ґрунтів вибухонебезпечними речовинами (Київська, Житомирська).

Отримані результати відображають зміни у структурі землекористування та слугують основою для відновлення аграрного потенціалу, оцінки екологічних ризиків і стратегічного планування. Скорочення площ сільськогосподарських угідь становить серйозну загрозу, що потребує оцінки втрат, оновлення кадастрових даних і розроблення механізмів відновлення земельного фонду. До ключових стратегічних рекомендацій у цій сфері належать:

- 1) створення інтегрованої системи моніторингу стану земель на основі сучасних геоінформаційних систем (ГІС) та даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), що дозволить забезпечити регулярне оцінювання просторових змін, виявлення та оцінку пошкоджень земельного покриву, оперативне реагування на загрози та формування карти деградації земель;
- 2) розробка єдиного національного реєстру пошкоджених і забруднених земель, який слугуватиме інструментом для планування рекультиваційних робіт, юридичної фіксації втрат та розрахунку екологічної компенсації;

3) запровадження компенсаційного механізму для землевласників і землекористувачів, що постраждали внаслідок бойових дій, з урахуванням міжнародних практик реституції, доступу до донорських коштів і механізмів страхування ризиків;

4) розробка та реалізація програм рекультиватії та відновлення забруднених земель, особливо на територіях з високим сільськогосподарським потенціалом;

5) реформування системи професійної підготовки та підвищення кваліфікації фахівців у сфері землеустрою, кадастру й геоінформаційних технологій, з орієнтацією на цифрові компетентності, інтероперабельність систем та кризове управління;

6) забезпечення незалежного міжнародного аудиту втрат земельного ресурсу із залученням відповідних інституцій Європейського Союзу, Організації Об'єднаних Націй, а також профільних агенцій, що підвищить рівень прозорості, обґрунтованості оцінок та довіри з боку міжнародної спільноти.

Реалізація зазначених заходів дозволить не лише відновити функціонування земельної системи України, а й закласти підґрунтя для її сталого, євроінтегрованого розвитку в поствоєнний період.

Висновки. Наведені дані свідчать про активну діяльність Держгеокадастру у напрямках цифрової трансформації, інституційного оновлення та нормативно-технічної інтеграції з іншими державними інформаційними системами. Ці процеси мають критичне значення в контексті повоєнного відновлення країни та подальшої інтеграції України до європейського простору.

В умовах воєнного стану вживаються цілеспрямовані заходи для забезпечення безперервного функціонування механізмів державного нагляду у сфері земельних відносин. Важливим чинником сталого управління земельними ресурсами є ефективна координація між кадастровими системами, органами судової влади, екологічними структурами та Державним реєстром речових прав на нерухоме майно (ДРРП). Така взаємодія є визначальною для запобігання необґрунтованого використання земель, збереження земельного фонду та забезпечення продовольчої безпеки держави. Для ефективного повоєнного відновлення земель першочергового значення набувають оновлення кадастрових даних, всебічна оцінка завданих збитків, а також модернізація нормативно-правової бази із приведенням її у відповідність до законодавства Європейського Союзу.

Успішна реалізація відбудови неможлива без посилення міжвідомчої взаємодії та синхронізації інформаційних систем. У цьому контексті формування національної програми відновлення має ґрунтуватися на достовірних, актуальних і захищених даних Державного земельного кадастру, що виключають ризики втрат або фальсифікацій.

Список використаних джерел:

1. Центр досліджень продовольства та землекористування (KSE агроцентр). *Kyiv school of economics*. (б. д.). <https://kse.ua/ua/center-for-food-and-land-use-research-c4flure-main>.
2. Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру : офіційний веб-сайт. (б. д.). <https://land.gov.ua>.
3. World Bank, Government of Ukraine, European Union, & United Nations. (2023, March). *UKRAINE Rapid Damage and Needs Assessment: February 2022 – February 2023*. <https://ukraine.un.org/sites/default/files/2023-03/P1801740d1177f03c0ab180057556615497.pdf>.
4. Дідух, Я. П. (2023). Про наукові засади розроблення методики оцінювання збитків, завданих воєнними діями природним екосистемам: За матеріалами доповіді на засіданні Президії НАН України 18 жовтня 2023 року. *Вісник Національної академії наук України*, 12, 87–96.
5. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо особливостей регулювання земельних відносин в умовах воєнного стану, Закон України № 2247-IX (2022) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2247-20#Text>.
6. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо створення умов для забезпечення продовольчої безпеки в умовах воєнного стану, Закон України № 2145-IX (2022) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-20#Text>.

7. Про затвердження Порядку визначення шкоди та збитків, завданих Україні внаслідок збройної агресії Російської Федерації, Постанова Кабінету Міністрів України № 326 (2025) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/326-2022-п#Text>.

8. Хавар, Ю., Сай, В., & Маліброда, С. (2023). Особливості робіт із землеустрою в умовах воєнного стану. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія: Архітектура та будівництво*, 24, 177–183.

References

1. Tsentr doslidzhen prodovolstva ta zemlekorystuvannia (KSE ahrotsentr) [Centre for Food and Land Use Research (KSE Agrocentre)]. *Kyiv school of economics*. (n.d.). <https://kse.ua/ua/center-for-food-and-land-use-research-c4flure-main>.

2. Derzhavna sluzhba Ukrainy z pytan heodezii, kartohrafii ta kadastru: Ofitsiyni veb-sait. [State Service of Ukraine for Geodesy, Cartography and Cadastre: Official website]. (n.d.). <https://land.gov.ua>.

3 World Bank, Government of Ukraine, European Union, & United Nations. (2023, March). *UKRAINE Rapid Damage and Needs Assessment: February 2022 – February 2023*. <https://ukraine.un.org/sites/default/files/2023-03/P1801740d1177f03c0ab180057556615497.pdf>.

4. Didukh, Ya. P. (2023). Pro naukovy zasady rozroblennia metodyky otsiniuvannia zbytkiv, zavdanykh voienнымy diiamy pryrodnyim ekosystemam: Za materialamy dopovidi na zasidanni Prezydii NAN Ukrainy 18 zhovtnia 2023 roku [On the scientific principles of developing a methodology for assessing damage caused by military actions to natural ecosystems. Based on the materials of the report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine on October 18, 2023]. *Visnyk Natsionalnoi .akademii nauk Ukrainy – Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 12, 87-96.

5. Pro vnesennia zmin do deiakykh zakonodavchykh aktiv Ukrainy shchodo osoblyvostei rehuliuвання zemelnykh vidnosyn v umovakh voiennoho stanu [On amendments to some legislative acts of Ukraine regarding the features of regulating land relations under martial law], Law of Ukraine dated 12.05.2022 No. 2247-IX. (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2247-20#Text>.

6. Pro vnesennia zmin do deiakykh zakonodavchykh aktiv Ukrainy shchodo stvorennia umov dlia zabezpechennia prodovolchoi bezpeky v umovakh voiennoho stanu [On Amendments to Certain Legislative Acts of Ukraine Regarding the Creation of Conditions for Ensuring Food Security under Martial Law], Law of Ukraine No. 2145-IX (2022) (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-20#Text>.

7. Pro zatverdzhennia Poriadku vyznachennia shkody ta zbytkiv, zavdanykh Ukraini vnaslidok zbroinoi ahresii Rosiiskoi Federatsii [On approval of the Procedure for determining the damage and losses caused to Ukraine as a result of the armed aggression of the Russian Federation], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 326 (2025) (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/326-2022-п#Text>.

8. Khavar, Y., Sai, V., & Malibroda, S. (2023). Osoblyvosti robit iz zemleustroi v umovakh voiennoho stanu. [Peculiarities of land management works under martial law]. *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu pryrodokorystuvannia. Seriya: Arkhitektura ta budivnytstvo – Bulletin of the Lviv National University of Environmental Management. Series: Architecture and Construction*, 24, 177-183.

Дата першого надходження статті до видання: 20.10.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.11.2025

UDC 349.41

Yulia Shcherbak¹, Ihor Kornienko², Sakhno Evgeny³, Zavorotnyi Sergii⁴

¹lecturer of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: Shch.Yu15@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3439-3792>

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: cornelukr@gmail.com. ORCID <http://orcid.org/0000-0001-9105-0780>

ResearcherID: F-7236-2017. SCOPUS Author ID: 57485157200

³Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: evsakhno@ukr.net. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9789-7242>. SCOPUS ID: 57190493489

⁴PhD in Technical Sciences, senior teacher departments of geodesy, cartography and land management
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: zavorotnyiserhii@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2139-8877>. ResearcherID: NRY-3592-2025

FUNCTIONING OF THE STATE LAND CADASTRE IN UKRAINE: ADAPTATION TO MARTIAL ARTS CONDITIONS AND PROSPECTS

The State Land Cadastre (SLC) is a basic element of the land management system and property rights enforcement in Ukraine. Martial law, imposed as a result of a full-scale invasion, has significantly complicated the stable functioning of the cadastral system.

To stabilize land relations, under martial law, legislative changes were introduced that ensured the restoration of the procedure for registering the lease of agricultural land, permission for free privatization under certain conditions, the abolition of compensation for losses of agricultural production in certain territories, regulation of data entry into the State Land Registry, and the suspension of the free transfer of state and municipal land to private ownership. The work identifies key aspects of the destructive effects of military actions. A detailed analysis of the scope of expansion of the cadastre information base has been performed. In particular, the results of changes in information on 722.4 thousand new land plots have been determined, which exceeds the figure for 2023 (618.9 thousand), the total number of registered plots has reached 25.6 million.

The article also analyzes compensation for violations of land legislation, namely UAH 107,378 of damage caused by violations, UAH 65,075 was voluntarily compensated. The key method for determining violations is unmanned land probing. 103.7 thousand hectares of agricultural land (reserve) were separately analyzed; 1.8 million hectares of land for which there is no information in the State Register of Property Rights on the right of ownership or use; 2.5 million hectares of land that is actually cultivated but does not have legal registration, which was detected using satellite monitoring.

According to the assessment of the state of land resources carried out by the Center for Food and Land Use Research (KSE Agrocenter) based on data from the World Bank, the Government of Ukraine, the European Commission, and the UN, in 2022 the territories of Luhansk (100%), Kherson (95%), Chernihiv (80%), Zaporizhia (74%), Sumy (70%), and Donetsk (64%) regions were most affected by the full-scale invasion of the Russian Federation.

The paper presents statistical data on the distribution of areas controlled by Ukraine in the period 2021-2024. As a result of the research, key strategic recommendations were provided for supporting and restoring the land use structure and restoring agricultural potential, assessing environmental risks, and strategic planning.

Keywords: State Land Cadastre; martial law; land resources management.

Fig.: 4. References: 8.

Назар Русланович Беспалько

аспірант кафедри землеустрою і кадастру

Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)

E-mail: n.bespalko@knuba.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4272-5835>**ФРАНЦИСКАНСЬКИЙ КАДАСТР НА БУКОВИНІ:
ІСТОРІЯ ТА АКТУАЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ**

Історичні та архівні джерела набувають важливого значення в дослідженнях земельного фонду європейських регіонів. Францисканський кадастр XIX ст. – одне з найвикористовуваних історичних джерел Центральної Європи. Його детальність та точність, яка мала на меті визначення та представлення реальних площ оподатковуваних та неоподатковуваних земель кожної коронної землі, одержує практичну цінність і через століття. Матеріали кадастрових обстежень Францисканського кадастру за умови врахування особливостей застосування методології в кожному із регіонів надають достовірний і різноманітний матеріал для наукових досліджень.

Ключові слова: земельний покрив; земельні ресурси; земельний фонд; землекористування; кадастр; прогнозування.

Рис.: 1. Табл.: 2. Бібл.: 20.

Актуальність теми дослідження. З давніх часів збиралися, реєструвалися, підтримувалися та використовувалися різні типи земельної інформації, а для управління такою інформацією створювалися кадастри. За визначенням, кадастр зазвичай є актуальною земельною інформаційною системою, що містить запис про права на землю (наприклад, права, обмеження та обов'язки). Традиційно він включає геометричний опис земельних ділянок, пов'язаний з іншими записами, що описують характер прав, право власності або контроль над цими правами, а часто й вартість ділянки та її покращення [1]. Вперше в історії проведення земельного кадастру стало необхідним з появою держав та розвитком у них системи оподаткування, встановивши землю таким об'єктом. Месопотамія була територією, де здійснювалися примітивні кадастрові роботи. Перші історичні згадки виникнення кадастру та кадастрових робіт, пов'язаних із визначенням меж земельних ділянок та їхніх площ з метою обліку земель стосуються часів Стародавнього Єгипту (3000 р. до н. е.), Греції та Риму.

Ландшафт постійно змінюється через динамічний зв'язок між природними та соціальними або культурними факторами навколишнього середовища. Це вічний процес, що регулюється природним середовищем та людською діяльністю в ньому. Землекористування, безумовно, є одним із найважливіших елементів цього процесу, оскільки воно відображає тісний зв'язок між людиною та природою і водночас має сильний та чітко виражений часовий вимір. Загалом вважається, що різні типи землекористування створюють різні ландшафти. Для кращого розуміння сучасної ситуації необхідні знання минулого ландшафту, оскільки сучасний ландшафт значною мірою відображає його історичний вигляд, що особливо помітно у сфері землекористування. Вивчення землекористування базується на різних джерелах: письмових, графічних, статистичних, фотографічних, супутникових даних та картографічних. Ці джерела відрізняються за своїм початковим призначенням, надійністю та охопленням, а отже, також за своєю якістю та корисністю. Земельні кадастри є одним із фундаментальних документів для вивчення сільської місцевості, оскільки вони містять технічну, економічну, просторову та статистичну інформацію і тому є корисним джерелом для вивчення змін у землекористуванні та пов'язаних із ними процесів [2].

Історичні картографічні джерела набувають дедалі більшого значення в галузі історії довкілля та реконструкції землекористування. Вони дозволяють вченим досліджувати та екстраполювати дані, необхідні для оцінки минулих станів довкілля, тісно пов'язаних зі змінами землекористування. Історичні карти, що зображують різні явища, створювалися для багатьох цілей. Історія довкілля та реконструкція землекористування стосуються, зокрема, карт, що відображають землекористування та земний покрив (наприклад, лісогосподарські

карти, топографічні та кадастрові карти). Одне з найстаріших джерел кадастрових карт, яке охоплює значну частину Центральної Європи в детальному масштабі – Францисканський кадастр (або «стабільний», коли питання оподаткування базується на характеристиках ґрунту, а не на фактичній врожайності, а отже, не на старанності землевласника).

Порівняно з методами дистанційного зондування, використання історичних та даних земельного кадастру має низку переваг. По-перше, це дозволяє дослідити досить тривалий період, який можна розділити на коротші ділянки (з різним характером та інтенсивністю соціальних рушійних сил) за найважливішими історичними подіями. По-друге, можна скористатися доволі точними числовими даними за різні роки, що стосуються невеликих, стабільних територій. І останнє, але не менш важливе: числові дані про землекористування можна зіставити з іншими типами географічної інформації (ландшафтні особливості, ґрунти, населення, економічні дані та ін.).

Актуальність теми дослідження. Австрійська імперія у XIX ст. була другою за територією (676 615 км²) у Європі і третьою за чисельністю населення (понад 51 млн осіб). До її складу входили, зокрема, історико-географічні регіони заходу України – Галичина, Буковина та Закарпаття. З розпадом імперії в 1918 р. держави, що утворилися, отримали у спадок серію карт, які ніколи не були перевершені та стали більшою чи меншою мірою залежними від кадастрової системи колишньої імперії. Дослідження процесу картографування та аналіз відомостей про об'єкти кадастрового обліку на цих територіях розкривають фізико-географічні й соціально-економічні зміни на місцевості, що відбулися в результаті природних процесів і людської діяльності.

Францисканський кадастр розроблявся на основі синтезу Міланського, Терезіанського, Йозефінського та Баварського кадастрів та запозичив успішні методи детального знімання місцевості в той час і підходи до модернізації державного управління у сфері податкової реформи. Францисканські кадастрові карти залишаються детальним та надійним джерелом історичної інформації, оскільки вони дозволяють просторово оцінити історичні процеси, контексти та взаємозалежності та структуру ландшафту у XIX та XX століттях. Архівні кадастрові карти все ще мають значний потенціал і використовуються для багатьох цілей, зокрема при дослідженні соціальних та економічних обставин змін у землекористуванні або структурі власності. Зі зміною практик землекористування змінюється також динаміка природних (геоморфологічних) процесів, впливаючи, зокрема, на мікрокліматичні умови та гідрологічні процеси; наприклад, мінливість температури та вологості ґрунту, стоку, швидкості ерозії, виходу осаду й т. ін.

Цифровізація архівної документації Францисканського кадастру в більшості країн Центральної Європи призвела до появи у відкритому доступі для користувачів таких документів: кадастрових карт, записів про розмежування меж кадастрових муніципалітетів, списків земельних ділянок, списків будівельних ділянок та списків власників. Зацікавленість у використанні історичної кадастрової документації стимулює залучення навіть штучного інтелекту до обробки та аналізу просторових даних [3].

Сучасні судові провадження в деяких країнах ЄС щодо межових спорів, рішень про належність сервітутів, вивільнення майна, надання права власності або узаконень різноманітного нерухомого майна часто потребують звернення до історичних правових джерел, включаючи Австрійський кадастр (кадастрові карти та реєстри земельних податків), для визначення меж власності [4]. За українським законодавством зазначені архівні документи поки що не породжують юридичних наслідків.

В останні десятиліття захист культурної спадщини вийшов на перший план інтересів експертів багатьох дисциплін. Також зростає готовність широкої громадськості, а отже, і держави, брати участь у оновленні та розвитку конкретних форм культурної спадщини

(як матеріальної, так і нематеріальної). Історична інформація про ці об'єкти є фрагментарною або взагалі відсутня. Багато будівель повністю зникли або були перебудовані та використані для інших цілей. Лише частина збереглася у своєму первісному вигляді.

Постановка проблеми. Перше систематичне військове картографування територій Габсбурзької монархії (попередниця Австрійської імперії) було замовлено Марією Терезою ще у 1763 р. За наступні 22 роки (1763-1785) усі провінції Габсбургів, а за короткий час і інші регіони інтересу, такі як Молдова (між Карпатами та Сіретом) або Валахія (за винятком османської території Бреїла), були нанесені на карти в безпрецедентному масштабі. З цієї ранньої стадії картографічних описів датуються також перші детальні (середнього та високого масштабу) зображення та описи меншої частини північно-західної Молдавії, а пізніше й більшої – а саме Буковини, після анексії Габсбургами в 1775 р. Ці дослідження зазвичай базувалися на описах «на перший погляд» і лише частково на місцевих геометричних вимірах [5].

Францисканський кадастр, як і будь-яке історичне джерело, не позбавлений суб'єктивних недоліків, врахування яких під час аналізу може підвищити достовірність результатів. Зокрема, методологія, включаючи легенду карти, не була єдиною для території всієї Імперії, і слід враховувати регіональні відмінності. Існували деякі відмінності між категоризацією землекористування у XIX ст. та категоризацією землекористування у XXI ст.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Популярним джерелом інформації в межах історичних досліджень землекористування та земельного покриття є здебільшого історичні топографічні карти різних масштабів. Ці картографічні джерела в поєднанні із сучасними ГІС-технологіями, здається, залишили тінь архівів і стали важливими джерелами історичної просторової інформації, яку легко інтерпретувати та отримати доступ завдяки зростаючому оцифруванню архівів. Крім старих карт, існує багато інших джерел для досліджень історичного землекористування. До них належать різноманітна офіційна статистика та звіти, громадські опитування та історичні кадастри разом з письмовими записами про власність на землю та оподаткування [6].

Проект Австрійського наукового фонду (FWF) 2022 р. RePaSE (Читання минулого з поверхні Землі) мав на меті використовувати вилучення за допомогою штучного інтелекту для визначення контурів та розташування історичних будівель на геоприв'язаних аркушах карт Францисканського кадастру. У контексті RePaSE визначаються «археологічно та історично чутливі» території як місця, які колись мали історичні будівлі та можуть потребувати археологічних досліджень під час будівельних робіт або поточного землекористування [3].

Мета дослідження полягає в аналізі матеріалів Францисканського кадастру в межах території Буковини (як одного з історичних джерел даних) на предмет детальності, точності та повноти відомостей.

Розуміння особливостей ведення Францисканського кадастру дозволить виявити зміни структури землекористування за напрямками в історичному аспекті. Такі дані стануть в нагоді під час створення прогнозних моделей землекористувань у розрізі адміністративних утворень території Чернівецької області (північної Буковини).

Виклад основного матеріалу. Францисканський кадастр (названий на честь австрійського імператора Франца І) – це земельний реєстр, створений для колишньої Австрійської імперії між 1817 та 1880-ми роками. Охоплює принаймні частково території сучасних Чехії, Словаччини, Австрії, Польщі, Словенії, Угорщини, України, Хорватії, Румунії, Боснії і Герцеговини та Сербії (рис. 1). Цікаво зауважити, що понад 90 % кордонів сучасних держав є кордонами кадастрових округів із Францисканського кадастру [1].

Після закінчення наполеонівських війн Габсбурзькій монархії потрібно було реорганізувати систему оподаткування землі та нерухомості, адже через високі витрати на військові кампанії державні фінанси були практично зруйновані, а в 1811 р. фінансова криза досягла свого апогею. Попередні картографічні йозефінські записи проводилися розрізнено без єдиної структури, і спроба об'єднання провінційних карт у 1792 р. для одержання загального зображення монархії, призвела до серйозних спотворень прикордонних територій, і висновку щодо потреби нового науково обґрунтованого суцільного знімання території [7].



Рис. 1. Австро-Угорська імперія (червоний) та сучасні кордони європейських країн
Джерело: [9].

У 1810 р. імператор Франц І з метою розробки нового податкового регулювання та запровадження нового кадастру наказав створити Імперську комісію. Указ імператора Франца І від 23 грудня 1817 р. започаткував новий кадастр, створений з нуля з картографуванням кожної ділянки та гармонізованою специфікацією для всієї Габсбурзької монархії [8]. Методологія кадастрового картографування вперше описана в 1818 р. та додатково скоригована в 1824, а потім у 1865 р. Інструкція, видана в 1824 р., заклала основи інституції, яка залишиться відомою як Францисканський кадастр або Кадастр стабільних земель. Таким чином, методологія, включаючи легенду карти, не була єдиною для території всієї Імперії. Крім розташування та форми ділянок, були зареєстровані власники та користувачі ділянок, а також оцінено якість ґрунту [9].

Картографування території переважно виконувалося в масштабі 1:2880 і лише на деякі частини в масштабах 1:720, 1:1440 або 1:5760 в циліндрично-поперечній проєкції Кассіні-

Зольднера. Для мінімізації впливу спотворення проєкції, для всієї території використано ортогональну проєкцію з вісьмома різними точками відліку. Муніципалітети з високою часткою непродуктивних земель, наприклад, гірські регіони, було нанесено на карти масштабу 1:5760, а громади з невеликими ділянками – в масштабі 1:1440. Загалом було розроблено 164 357 кадастрових планів, переважна більшість – у масштабі 1:2880. У табл. 1 представлено роки кадастрових вимірювань та їхні результати для всіх провінцій.

Таблиця 1 – Результати кадастрових вимірювань в австрійських провінціях

Провінція	Площа, км ²	Кількість громад	Роки проведення вимірювань	Кількість ділянок	Кількість кадастрових планів
Нижня Австрія	19 785	3 159	1817-1824, 1828	3462496	9983
Верхня Австрія та Зальцбург	19 163	1 562	1832-1830	2618844	9226
Штирія	22 495	2 692	1820-1825	2540984	12661
Тіроль з Форальбергом	29 291	1 051	1855-1861	2462107	13927
Каринтія та Крайна	20 325	1 738	1822-1828	2616749	10930
Австрійське Примор'я	7 959	645	1818-1822	1685266	5136
Далмація	12 793	744	1823-1830, 1834-1837	2381495	6725
Богемія	51 953	8 967	1826-1830, 1837-1843	9321064	32786
Моравія та Сілезія	27 375	3 724	1824-1830, 1833-1836	6038454	17181
Галичина	78 493	5 955	1824-1830, 1844-1854	15211974	40981
Буковина	10 450	319	1819-1823, 1854-1856	798707	4821
Всього	300 082	30 556	1817-1861	49 138 140	164 357

Передувало початку детального картографування муніципалітетів визначення та позначення меж кадастрової громади у співпраці із сусідніми громадами. Межі окремих ділянок маркувалися за допомогою стовпів або каменів. Ім'я та адреса власника, кількість стовпів та каменів, ґрунтовий покрив, а також деяка інша інформація документувалися на польовому ескізі. Додатково, номери ділянок, номери будівель, якість ґрунту та врожайність – як основа для оцінки оподаткування – реєструвалися в окремих документах. Геодезичне дослідження та картографування меж ділянок, а також меж землекористування виконувалося за допомогою плоскої таблиці з використанням методів перетину або в деяких випадках полярних методів. Допоміжне геодезичне обладнання складалося з візирної лопаті, компаса, рівня та вимірювального ланцюга (пізніше також рулетки).

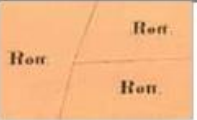
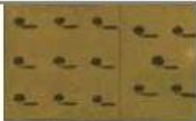
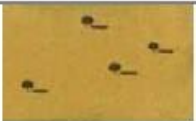
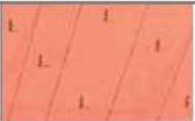
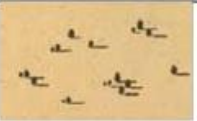
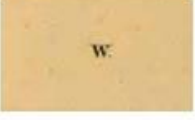
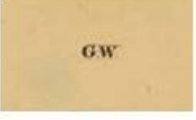
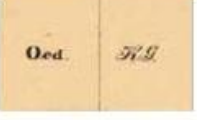
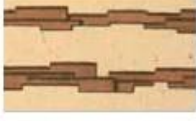
Інструкція 1824 р. та наступні детально описують методику виконання кадастрового знімання та особливості відображення об'єктів на картографічних творах. Ділянки повинні бути зняті з усіма польовими деталями: спорудами, обладнанням, категорією або категоріями землекористування кожної ділянки, видами сільськогосподарських культур. Якість ґрунту не враховується під час геодезичних робіт. Ділянки з різними категоріями використання в межах ділянки розмежовуються як окремі підчастини. Аналогічно, подвір'я разом із будівлями утворюють окремі підділянки. Для невеликих будівель, таких як сараї, хатини, невеликі дерев'яні будинки, геодезичні роботи та їх зображення на картах не є обов'язковими. Громадські будівлі, такі як церкви, монастирі, лікарні, утворюють спеціальні ділянки. Якщо ділянки з одним власником перетинаються постійними об'єктами, наприклад, річками, струмками, дорогами загального користування, то вони утворюють окремі ділянки, але якщо вони перетинаються такими об'єктами, як стежки, водостічні труби, зрошувальні канали, то вони вважаються однією ділянкою. Дуже малі ділянки відносно масштабу карти не зображуються, але вони повинні бути згадані в протоколі (звіті), складеному після проведення польового обстеження.

Ліси поділяються на ділянки відповідно до власника та природних меж. Якщо великі ліси раніше були обстежені лісовими інженерами, їхні роботи після попередньої перевірки будуть враховані в нових кадастрових роботах. Анклави всередині лісових територій реєструються як окремі ділянки відповідно до категорії землекористування. Камені, канавки реєструються окремо, якщо їхня площа перевищує 100 квадратних сажнів. Усі дороги загального користування вважаються спеціальними ділянками. Річки, озера та водні шляхи розглядаються як окремі ділянки. Незайняті ділянки русла річки включаються до спеціальної ділянки річки, а також заплави навколо нього. Невикористані або непродуктивні землі також вважаються окремими ділянками. Детальні процедури зазначено для різних окремих випадків, коли слід передати детальність в умовах відсутності або обмеженої прямої видимості при використанні оптичних інструментів. На забудованих територіях визначають розміри кварталу та найважливіших будівель у ньому, і після складання скороченого ескізу площі кварталу інші топографічні деталі отримуються графічними засобами. Особлива увага приділяється населеним пунктам з більш ніж 600 будинками. Складання карт виконується під час зимового періоду та повинно включати всі ділянки зі значними топографічними деталями. Кожна ділянка забарвлюється відповідно до кольорового коду, що відповідає категоріям використання земель. Всередині ділянки, окрім кадастрового номера, присвоєного кожній ділянці або підділянці арабськими цифрами, вказується ім'я власника та, де це доречно, номер будинку в забудованих районах. Нумерація зазвичай починається з церковної ділянки. Після складання карт перевіряється правильність і точність, і робляться перекреслення червоною лінією. Розрахунок поверхні для невеликих площ виконується геометричними методами шляхом поділу абрису ділянки на прості геометричні фігури, трикутники або трапеції, а у випадку великих площ – за допомогою скляних гравірованих позолочених пластин. Після завершення складання карт складаються земельні реєстри з кадастровими номерами, із зазначенням імені та по батькові власника, категорії землекористування («рід»). Також надаються детальні інструкції щодо складання детальних та синтетичних звітів на кожному ієрархічному рівні відповідального персоналу шляхом введення стабільного кадастру [10].

Для кожної кадастрової громади створювався окремий план із дотриманням попередньо визначеного розграфлення аркушів. Якщо на одному аркуші розташовувалися дві або більше громад, для кожної з них створювався окремий аркуш. Точність координат, отриманих за допомогою мензульного знімання, становила приблизно ± 80 см [11]. У гірських і лісових районах відхилення могли досягати 100 м. Точність розмірів ділянок залежала від їхнього розміру та масштабу карти, при цьому можливі були спотворення до 10 %. Наприкінці XIX ст. якість кадастрових карт швидко покращилася завдяки новим геодезичним методам.

Мінімальна площа картографування була встановлена на рівні 25 квадратних сажнів, що приблизно дорівнює 90 м^2 . Кадастр використовує 39 типів землекористувань (табл. 2), включаючи 10 класів землекористування агролісівництва, а також землі, що не оподатковуються. Під час читання францисканських карт найважливішим фактором є розпізнавання кольорів та символів для окремих категорій землекористування, оскільки це основа для розуміння вигляду ландшафту того періоду.

Таблиця 2 – Позначення ландшафтів

				
поля	рисові поля	тютюн	поля краппу ¹	трішакер ²
				
поля з фруктовими деревами	поля з оливками	поля з виноградниками	поля з деревами та виноградниками	шафран
				
фруктові сади	галявини з фрукт. деревами	виноградники	хмелєві сади	оливкові гаї
				
городні ділянки	декоративний сад	англійський сад ³	лісопарк, група дерев, алея	
				
листяні ліси	хвойні ліси	мішані ліси	каштанові ліси	чагарники
				
вологі луки	сухі луки	пасовища	громадське пасовище	пустельні ділянки, голі скелі
				
торфовища	болота	болота з рогазом	озера, ставки, струмки, річки	лагуни
				
піщані та гравійні кар'єри	глиняні кар'єри	кар'єри	морські солончаки	піщані відмілини

Примітки:

¹Крапп – фарбувальна рослина, яка після висушування дає яскраво-червоний барвник.

²Трішакер (Rott-oder Trischäcker) – земля, яка по чергово використовується як поле і як пасовище.

³Англійський сад – стиль ландшафтного дизайну, що виник у Великій Британії у XVIII ст.

Джерело: Правила креслення кадастрових планів у редакції 1824 р. Інші версії, у тому числі й та, що міститься в інструкції 1854 р., за винятком місцевих доповнень, не відрізняються від оригінального зразка 1824 р.

Оцінка точності меж земельних ділянок францисканського кадастру залежить від трьох основних факторів впливу: 1) точності графічного зображення; 2) точності вимірюваних даних; 3) точності визначення меж, і позначення поворотних точок. Пункти 1 і 2 детально розглянуто [12], «Визначення меж за сучасним станом австрійських кадастрових карт», а також у [13]. «Кадастр як доказ у суперечках про межі». Порівняльні дослідження показують, що на відкритій місцевості середня похибка на оригінальному аркуші карти становить 80 см. Середня товщина лінії 0,15 мм у масштабі 1:2880 дає планову точність 43 см, але не враховує деформацію паперу або стабільне маркування межі. У несприятливих для вимірювань районах (лісах, високогірній місцевості) точність слід оцінювати відповідно критичніше [11].

Францисканський кадастр складається з письмового реєстру земельних ділянок та будівель, а також багатьох документів з оцінки, таких як Протокол про врожайність, що містить багато детальної, але не стандартизованої інформації. Францисканський кадастр є прикладом зростаючої потреби в державному контролі за управлінням землею та збором податків у Новий час. Завдяки своїй надзвичайній точності, спочатку з фіскальних цілей, францисканський кадастр почав використовуватися як важлива технічна та правова основа.

Загальна висока тематична роздільна здатність (кількість класів землекористування/земельного покриття, широке просторове охоплення (Центральна Європа) та детальний масштаб картографування (1:2880) Францисканського кадастру, історичні джерела карт, не полишають його наявності потенційних недоліків, які варто враховувати при роботі з історичними даними [14].

Можливі джерела невизначеності поділяють на три категорії: 1) невизначеність в процесі картографування (помилки польових досліджень та відтворення карт); 2) невизначеність пов'язана із трансформацією (помилки трансформації, геоприв'язки та векторизації в ГІС); 3) невизначеність тлумачення (можливі помилки через різну семантику класів земельного покриття) [15]. Додають також і питання нечіткості критеріїв картографування для геодезистів; відмінності категоризації землекористування та земельного покриття в сучасних ті історичних джерел карт; визначенні меж між подібними класами земельного покриття. Зміст картографічних матеріалів потребує критичного осмислення через можливі навмисні помилки картографування, пов'язані з військовими цілями, податковим шахрайством або прогнозним призначенням карт [16].

Доступність картографічних даних францисканського кадастру реалізована в проєкті MAPIRE. Питання онлайн-доступності картографічних джерел було частково або повністю вирішено для території Чехії [17], Австрії та Галичини з 2012 р.

З початку XVII ст. в Карпато-Дунайському регіоні роль карт стала більшою, ніж просто графічних зображень певних географічних областей, і відігравали важливу роль у воєнні та мирні часи як засіб організації економіки, управління та політичного життя. Цей процес був пов'язаний із розширенням Габсбурзької імперії на колишніх територіях, контрольованих Османською імперією, та сучасними систематичними картографічними дослідженнями, які постійно збагачували географічні знання про історичні провінції [5]. Верхня Молдавія, окупована Йосифом II у 1775 р. як сполучна ланка між Галичиною та Трансільванією, спочатку була 19-м округом Галичини, і згодом під час подій 1848 р стала незалежною коронною землею Буковина з провінційним парламентом у її столиці Чернівцях. З погляду віденської центральної адміністрації, це була колоніальна територія, яка потребувала реформ. Австрійська адміністрація вважала однією зі своїх найнагальніших цілей якомога швидше інтегрувати новонабуту територію до інших провінцій монархії. Згідно з панівною на той час державною філософією, успішне регіональне утворення полягало, по суті, у зростанні сільськогосподарського виробництва та збільшенні врожайності культур.

Геодезичні роботи на території Буковини (адміністративного округу Галичини та найсхіднішої провінції Імперії) розпочалися у 1818 р. Хоча вона підпорядковувалася координатній галицького військового і цивільного керівництва в Лемберзі (Львові), з самого початку діяльності в провінції розроблено незалежну геодезичну і кадастрову системи картографування. Кадастрові роботи на Буковині розпочалося відносно рано у зв'язку з інспекційною поїздкою імператора Франца І до «східних земель» у 1822 р., незабаром почав формуватися опір, коли справа доходила до оцінки дохідності та визначення результуючого податку на майно.

Буковина була однією з провінцій Габсбургів, у якій кадастрові вимірювання передували військовому визнанню, нові карти, складені Генеральним штабом армії, були створені з використанням скороченої кадастрової планіметрії (1:28 800) та пов'язаних топографічних деталей. Ця операція розпочалася у 1828-1831 рр., коли було створено лише 28 розділів карти (під координацією майора Мірбаха), і завершилася у 1863 р. На відміну від кадастрових робіт, система картографічної сітки, яку використовували військові на Буковині, була системою Східної Галичини з фундаментальною точкою проєкції у Лемберзі [18].

Кадастрові роботи на Буковині проводилися протягом 1854-1856 рр. і завершилися до 1862 р. Для всіх 319 сіл Буковини були розроблені кадастрові карти та кадастрові карти. На основі цих документальних джерел можна дуже точно визначити соціально-економічний розвиток населених пунктів Буковини. Найбільша частка лісів була на південному заході Буковини, тоді як орні землі зосереджувалися на рівнинах, на півночі та сході провінції. Найбільші земельні ділянки знаходилися в гірській місцевості Буковини, найменші – на північному сході території. Домініканська власність (церковні та камерні фонди, ділянки великих приватних власників та солдатів) становила 62,1 %, а сільська власність (селянські, комунальні, парафіяльні ділянки) – 37,9 % від загальної площі земель [19]. Вартість геодезичних та картографічних робіт на Буковині становила 328 000 австрійських гульденів [5].

Архівні фонди Францисканського кадастру наразі розподілені між трьома місцями: Державним архівом Чернівецької області, Румунським національним архівом у Сучаві (Arhivele Naționale din Suceava) та Кадастровим управлінням у Сучаві (Ofi ciul Cadastral Suceava). Колекція Кадастрового управління містить кадастрові карти та записи зберігається в місцевому кадастровому управлінні. Для всіх 319 кадастрових округів, розподілених по 16 податкових округах, збереглися кадастрові карти, складені між 1854-1856 рр. З них 177 наразі належать до північної української, а 142 – до південної румунської Буковини. Після 1856 р. кількість податкових округів залишалася незмінною, і збільшувалася в 1876 (323 кадастрові округи) та 1884 роках (328 кадастрових округів). Кількість сіл за той самий період залишилася незмінною – 333 (1876 р.) та 334 (1884 р., через поділ). Між 1854-1856 рр. було обстежено площу 10 450 км² та складено 4821 кадастрову карту. Зафіксовано в реєстрі земельних ділянок та ділянок забудови інформацію, що стосується державних органів щодо 798 707 земельних ділянок. Реєстри будівельних ділянок та ділянок забудови, а також реєстр землекористування (вид культур) важливі для аналізу структури сільськогосподарської власності. Решта додатків містять описи меж кадастрового управління, зокрема зміни, зафіксовані порівняно з 1854-1856 рр. та новим кадастровим дослідженням 1860-1870 рр. [20].

Згідно з архівними фондами Францисканського кадастру загальна площа 307 кадастрових населених пунктів Буковини становила 988 341,31 га, з яких 452 631,63 (45,8 %) га – ліси, 236 533,35 (23,9 %) – орні землі, 150 345,77 (15,2 %) – луки, 115 239,78 (11,7 %) – пасовища, 23 249,92 (2,35 %) – непродуктивні землі, 6 821,33 (0,7 %) – сади, виноградники, ліси та болота, а також 3 519,44 (0,36 %) гектарів забудови [19].

Найбільші площі лісів зосереджувалися на південному заході Буковини і становили понад 60% від загальної площі в округах Ватра-Дорней, Кимпулунг, Радівці, Гура-Гумора і Путила. В округах Кіцмані та Заставна на півночі Буковини, а також у місті Чернівці частка лісовкритих площ не перевищувала 10 %. У 65 кадастрових місцевостях ліси становили понад 50 % площі, тоді як в інших 132 поселеннях – менше ніж 10 %. У 38 поселеннях не було лісових угідь.

Орні землі були найпоширенішими в рівнинній частині на півночі та сході Буковини. У повітах Заставна та Кіцмань їхня частка становила приблизно 70 % від загальної площі, а в повітах Сірет та Сучава на південному сході провінції – понад половину. Водночас у гірській частині на південному заході Буковини лише дуже невелика частина землі була орною. У 141 населеному пункті орні землі становили понад половину площі. Водночас у 56 населених пунктах орні землі не перевищували 10 %, а в 25 населених пунктах ці землі не досягали навіть 1 % площі.

Луки та пасовища становили 15,2 та 11,7 % від загальної площі відповідно. Частка луків була найбільшою в округах Путила та Вижниця на північному заході Буковини, а найменшою – в округах Заставна та Кіцмань, розташованих між Прутом і Дністром. Найбільші площі пасовищ були в населених пунктах округів Чернівці, Сучава, Кимпулунг, найменші – в округах Кіцмань, Путила, Заставна, Вижниця, Садгора.

Найбільші площі садів (понад 100 га) були в містах Чернівці та Сучава, а також у селах Босанка, Котмани, Топорівці, Остриця. Частка площ, зайнятих садами, була найбільшою в містах Чернівці (14,2 %), Сірет (4,9 %) і Сучава (4,8 %), в передмістях Калічанка (14,1 %), Гореча (9,4 %) і Клоучка (7,7 %), у містечку Садгора (10,7 %), а також у деяких селах, таких як Біла Криниця (8,5 %), Секуричені (6,6 %), Суховерха (6,1 %), Остриця (6,1 %).

Виноградники не мали значного поширення на Буковині. Їх можна простежити лише в 31 населеному пункті. Площа (61,7 га) була відповідно незначною, причому понад половина (46,4 га) припадала на 12 поселень у південно-східному податковому окрузі Сучави. У Чернівцях оброблялося майже 6 га.

Болота та болотисті землі були зареєстровані в 29 кадастрових місцевостях, більшість з яких знаходилися на півночі Буковини, в районі між Прутом і Дністром, а також на південному сході провінції, поблизу міст Сірет і Сучава. Площа боліт і трясовин становила 247,09 га, у тому числі 71,01 га в окрузі Кіцмань, 67,04 – в Заставні, 44,67 – в Сіреті, 39,24 – в Сучаві та 18,56 га – в окрузі Садгора. У 10 населених пунктах площа боліт і трясовин перевищувала 10 га.

Непродуктивні землі складалася переважно з річок, струмків, придорожніх ділянок, боліт і ставків без очерету, пустирів і каменів. У 16 поселеннях ця частка навіть перевищувала 10 % площі. Це передусім пов'язано із сільськими громадами, розташованими на берегах річок Дністер, Прут, Черемош або Сучава.

У середині XIX ст. площа під забудовою на Буковині залишалася ще дуже невеликою. Вона становила лише 3 519,44 га (0,4 % від загальної площі). Навіть у містах цей показник досягав помірної частки (Чернівці 80,5 га; Радівці 48,2 га; Босанка 47,1 га; Кимполунг 46,2 га; Мамаївці 46,1 га; Сучава 44,6 га; Топорівці 43,3 га; Путила 38,4 га; Фре-тауцій Ной 36,3 га; Рідківці 35,8 га; Вашківці над Черемошем 35,3 га і Кіцмань 32,7 га).

Таким чином, Францисканський кадастр зафіксував вже суттєві зміни в землекористуванні Буковини. На думку дослідника К. Шарра, «кадастр належить до причин, які мали велику вагу для розвитку Буковини та, відповідно, звичайно ж, і міста Чернівці – як функціонального, так і адміністративного центру коронної землі» [20].

Висновки. Земельний реєстр Франца І був успішною спробою об'єднати країни Центральної Європи, які близько 1800 р. перебували в процесі переходу від станового суспільства до національного суспільства, в один простір з єдиним законодавством щодо оцінки ґрунтів (оцінки землекористування) та податкової системи.

Успіх проєкту проведення систематичного кадастрового дослідження та формування францисканського кадастру для всіх країн Австрійської імперії ґрунтувався на столітньому досвіді землевпорядкування та формування земельних книг, що проводилися австрійською владою в країнах, що перебували під їхньою владою.

Успіх впровадження та встановлення стабільного кадастру за часів правління імператора Франца I став результатом тривалих зусиль австрійської влади щодо створення центрального земельного реєстру для всієї імперії та перехоплення податкової системи з рук місцевої знаті та передачі її під юрисдикцію центральних державних органів влади. Це був тривалий процес модернізації, який проходив з великим опором, і формування стабільного кадастру та поступове скасування феодалізму, безумовно, було одним із його найбільших успіхів. Ідея централізації податків та передачі юрисдикції земельних реєстрів та збору податків виключно до сфери центральної влади в межах Габсбурзької монархії.

Кадастрові карти, які створювалися з ретельним дотриманням стандартів якості з початку XIX ст. для значних частин Європи, пропонують унікальне та комплексне представлення знань. Детальна інформація про окремі будинки в масштабах від 1:720 до 1:5760, зі стандартним масштабом 1:2880 документує землекористування, сучасні дороги та стежки, межі земельних ділянок та інші відповідні дані.

Список використаних джерел

1. Pivac, D., Roić, M., Križanović, J., & Paar, R. (2021). Availability of historical cadastral data. *Land*, 10(9), 917. <https://doi.org/10.3390/land10090917>.
2. Petek, F., & Urbanc, M. (2004). The Franziscean Land Cadastre as a key to understanding the 19th-century cultural landscape in Slovenia. *Acta Geographica Slovenica*, 44(1), 89–113. <https://doi.org/10.3986/ags44104>.
3. Ignjatić, J., Nikolić, B., Rikalović, A., & Ćulibrk, D. (2018). Deep Learning for Historical Cadastral Maps Digitization: Overview, challenges and potential. *Computer Science Research Notes*. <https://doi.org/10.24132/csrn.2018.2803.6>.
4. Baciór, S. (2023). Austrian Cadastre still in use – Example proceedings to determine the legal status of land property in southern Poland. *Land Use Policy*, 131, 106740. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106740>.
5. Cristea, A. (2018, May 11). *The cadastral mapping system of Bukovina: from emergence to GIS integration*. CRISTEA | GEOREVIEW: Scientific Annals of Stefan Cel Mare University of Suceava. Geography Series. <http://georeview.ro/ojs/index.php/revista/article/view/385>.
6. Frajer, J., & Fiedor, D. (2020). A historical curiosity or a source of accurate spatial information on historical land use? The issue of accuracy of old cadastres in the example of Josephian Cadastre from the Habsburg Empire. *Land Use Policy*, 100, 104937. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104937>.
7. MGI, Militär-Geographische Institut (1881). Bericht über die Leistungen des k. k. militärgeographischen Institutes. *Mittheilungen des K.u.K. Militär-Geographischen Institutes*, I: 22–82.
8. Triglav, J. (2017). Grundsteuer patent, 23. 12. 1817. *Geodetski vestnik*, 61(4), 649–654.
9. Hernik, J., Prus, B., Dixon-Gough, R., Taszakowski, J., Navratil, G., & Mansberger, R. (2020). The Evolution of Cadastral Systems in Austria and Galicia (Poland): Different Approaches to a Similar System from a Common Beginning. *The Cartographic Journal*, 57(2), 97–112. <https://doi.org/10.1080/00087041.2018.1534344>.
10. Boroica, I., Manu, C.S., Cucaila, S., & Filip, L.O. (2017). Some of the 19th century regulations on the introduction of the historical cadaster within Transylvania, Banat and Bucovina and their modernity. *Annals of the University of Petrosani Mining Engineering*, 18, 156–163.
11. Fuhrmann, S. (2007) Digitale Historische Geobasisdaten im Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV): Die Urmappe des Franziszeischen Katasters. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation*, 95 (1), 24–35.
12. Voith, F. (1963). Grenzfeststellungen nach dem derzeitigen Stand der österreichischen Fortführungsmappen. *Mitteilungsblatt zur OZ*, 17.
13. Twaroch, C. (1986). Der Kataster als Beweismittel bei Grenzstreitigkeiten. *Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie, Heft*, (3), 74.

14. Dolejš, M., & Forejt, M. (2019). Franziscean Cadastre in Landscape Structure Research: A Systematic review. *Quaestiones Geographicae*, 38(1), 131–144. <https://doi.org/10.2478/quageo-2019-0013>.
15. Kaim, D., Kozak, J., Ostafin, K., Dobosz, M., Ostapowicz, K., Kolecka, N., & Gimmi, U. (2014). Uncertainty in Historical Land-Use Reconstructions with Topographic Maps. *Quaestiones Geographicae*, 33(3), 55–63. <https://doi.org/10.2478/quageo-2014-0029>.
16. Forejt, M., Dolejš, M., & Raška, P. (2018). How reliable is my historical land-use reconstruction? Assessing uncertainties in old cadastral maps. *Ecological Indicators*, 94, 237–245. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.053>.
17. ÚAzK [Ústřední Archiv zeměměřictví a Katastru], 2018. ÚAzK Central Archive of Surveying and Land Register Online: archivnimapy.cuzk.cz (accessed 15 May 2018).
18. Timár, G., Molnár, G., Székely, B., Biszak, S., Varga, J., & Jankó, A. (2006). *Digitized maps of the Habsburg Empire – The map sheets of the second military survey and their georeferenced version*. Budapest, Hungary: Arcanum. <https://doi.org/10.13140/2.1.1423.7127>.
19. Ungureanu, C. (2011). Cadastrul austriac din Bucovina. In: *Revista de Istorie a Moldovei*, 1-2(86), 44-57.
20. Rumpler, H., Scharr, K., & Ungureanu, C. (2015). *Der Franziszeische Kataster im Kronland Bukowina/Czernowitzer Kreis (1817-1865): Statistik und Katastralmappen*. Böhlau Verlag Wien.

References

1. Pivac, D., Roić, M., Križanović, J., & Paar, R. (2021). Availability of historical cadastral data. *Land*, 10(9), 917. <https://doi.org/10.3390/land10090917>.
2. Petek, F., & Urbanc, M. (2004). The Franziscean Land Cadastre as a key to understanding the 19th-century cultural landscape in Slovenia. *Acta Geographica Slovenica*, 44(1), 89–113. <https://doi.org/10.3986/ags44104>.
3. Ignjatić, J., Nikolić, B., Rikalović, A., & Čulibrk, D. (2018). Deep Learning for Historical Cadastral Maps Digitization: Overview, challenges and potential. *Computer Science Research Notes*. <https://doi.org/10.24132/csrn.2018.2803.6>.
4. Baciór, S. (2023). Austrian Cadastre still in use – Example proceedings to determine the legal status of land property in southern Poland. *Land Use Policy*, 131, 106740. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106740>.
5. Cristea, A. (2018, May 11). *The cadastral mapping system of Bukovina: from emergence to GIS integration*. CRISTEA | GEOREVIEW: Scientific Annals of Stefan Cel Mare University of Suceava. Geography Series. <http://georeview.ro/ojs/index.php/revista/article/view/385>.
6. Frajer, J., & Fiedor, D. (2020). A historical curiosity or a source of accurate spatial information on historical land use? The issue of accuracy of old cadastres in the example of Josephian Cadastre from the Habsburg Empire. *Land Use Policy*, 100, 104937. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104937>.
7. MGI, Militär-Geographische Institut (1881). Bericht über die Leistungen des k. k. militärgeographischen Institutes. *Mittheilungen des K.u.K. Militär-Geographischen Institutes*, I: 22-82.
8. Triglav, J. (2017). Grundsteuer patent, 23. 12. 1817. *Geodetski vestnik*, 61(4), 649-654.
9. Hernik, J., Prus, B., Dixon-Gough, R., Taszakowski, J., Navratil, G., & Mansberger, R. (2020). The Evolution of Cadastral Systems in Austria and Galicia (Poland): Different Approaches to a Similar System from a Common Beginning. *The Cartographic Journal*, 57(2), 97–112. <https://doi.org/10.1080/00087041.2018.1534344>.
10. Boroica, I., Manu, C.S., Cucaila, S., & Filip, L.O. (2017). Some of the 19th century regulations on the introduction of the historical cadaster within Transylvania, Banat and Bucovina and their modernity. *Annals of the University of Petrosani Mining Engineering*, 18, 156-163.
11. Fuhrmann, S. (2007) Digitale Historische Geobasisdaten im Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV): Die Urmappe des Franziszeischen Katasters. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation*, 95 (1), 24–35.
12. Voith, F. (1963). Grenzfeststellungen nach dem derzeitigen Stand der österreichischen Fortführungsmappen. *Mitteilungsblatt zur O.Z.*, 17.
13. Twaroch, C. (1986). Der Kataster als Beweismittel bei Grenzstreitigkeiten. *Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie*, Heft, (3), 74.
14. Dolejš, M., & Forejt, M. (2019). Franziscean Cadastre in Landscape Structure Research: A Systematic review. *Quaestiones Geographicae*, 38(1), 131–144. <https://doi.org/10.2478/quageo-2019-0013>.

15. Kaim, D., Kozak, J., Ostafin, K., Dobosz, M., Ostapowicz, K., Kolecka, N., & Gimmi, U. (2014). Uncertainty in Historical Land-Use Reconstructions with Topographic Maps. *Quaestiones Geographicae*, 33(3), 55–63. <https://doi.org/10.2478/quageo-2014-0029>.
16. Forejt, M., Dolejš, M., & Raška, P. (2018). How reliable is my historical land-use reconstruction? Assessing uncertainties in old cadastral maps. *Ecological Indicators*, 94, 237–245. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.053>.
17. ÚAZK [Ústřední Archiv zeměměřictví a Katastru], 2018. ÚAZK Central Archive of Surveying and Land Register Online: archivnimapy.cuzk.cz (accessed 15 May 2018).
18. Timár, G., Molnár, G., Székely, B., Biszak, S., Varga, J., & Jankó, A. (2006). *Digitized maps of the Habsburg Empire – The map sheets of the second military survey and their georeferenced version*. Budapest, Hungary: Arcanum. <https://doi.org/10.13140/2.1.1423.7127>.
19. Ungureanu, C. (2011). Cadastrul austriac din Bucovina. In: *Revista de Istorie a Moldovei*, 1-2(86), 44-57.
20. Rumpler, H., Scharr, K., & Ungureanu, C. (2015). *Der Franziszeische Kataster im Kronland Bukowina/Czernowitzer Kreis (1817-1865): Statistik und Katastralmappen*. Böhlau Verlag Wien.

Дата першого надходження статті до видання: 05.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.11.2025

UDC 9.91.913

Nazar Bepalko

postgraduate student at the Department of Land Management and Cadastre
Kyiv National University of Construction and Architecture

E-mail: n.bepalko@knuba.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4272-5835>

FRANCISCAN CADASTRE ON BUKOVINA: HISTORY AND RELEVANCE OF USE

Archival cadastral maps still have significant potential and are used for many purposes, including research into the social and economic circumstances of changes and reconstruction of land use. Land use is a kind of landscape indicator, as it reflects the close connection between humans and nature and at the same time has a strong and clearly defined temporal dimension. A better understanding of the current situation requires knowledge of the past landscape, as the current landscape largely reflects its historical appearance, which is particularly noticeable in the field of land use. Such information allows scientists to research and extrapolate the data necessary to assess past environmental conditions closely related to changes in land use.

Like any historical source, the Franciscan cadastre is not without subjective shortcomings, which, when taken into account during spatial analysis, can increase the reliability of the results. In particular, the methodology, including the map legend, was not uniform across the entire territory of the Empire, and regional differences should be taken into account. There were some differences between the categorisation of land use in the 19th century and the categorisation of land use in the 21st century.

The aim of the study is to analyse the materials of the Franciscan cadastre within the territory of Bukovina (as one of the historical sources of data) in terms of detail, accuracy and completeness of information.

The history of the Franciscan cadastre is presented. Methodological features of geodetic and cadastral work are described. The peculiarities of mapping cadastral objects are revealed. Factors that influenced the accuracy of the work are identified. As one of the results of the Franciscan cadastre, the structure of the land fund of Bukovina is presented.

The Franciscan cadastre was a successful attempt to integrate the countries of Central Europe, which around 1800 were in the process of transitioning from an estate-based society to a national society, into a single space with uniform legislation on land valuation (land use assessment) and a tax system. The cadastral information contained in the maps and registers, which were created in strict compliance with quality standards for large parts of Europe, offers a unique and comprehensive representation of knowledge about the space. In addition to historical reconstructions, this is important for the search for and preservation of historical and cultural heritage sites.

Keywords: land cover; land resources; land fund; land use; cadastre; forecasting.

Fig.: 1. Table: 2. References: 20.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-616-626](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-616-626)

УДК 004.932.2:004.89:528.8

Дмитро Борисович Захарченко¹, Тетяна Миколаївна Малік²¹аспірант ННІ «Інститут геології»

Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: dmitry.zakharchenko490@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1687-1433>²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геоінформатики ННІ «Інститут геології»

Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: malik.tat@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1362-8433> Researcher ID: V-5877-2018

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ

У статті виконано порівняльний аналіз підходів підвищення якості супутникових зображень для задач геодезії та землеустрою. Розглянуто BSWTV, самонавчальну MISR-DSA, CNN на парах Landsat–Sentinel-2 та RS-ESRGAN. Дані включали синтетичні та реальні сцени, при цьому застосовано маскування хмар, тіней, інше та поканальне оцінювання за PSNR/SSIM. Узагальнені результати: BSWTV – пригнічення змішаного шуму зі збереженням контурів, MISR-DSA – найкраще для $\times 2$ і серій із субпіксельними зсувами, CNN – практичний компроміс для однокадрового підвищення та масштабування архівів, RS-ESRGAN – великі масштаби і крос-сенсорні пари зі збереженням природної текстури та спектральної узгодженості.

Ключові слова: зондування; суперрозрізненість; нейромережі; узгодженість; сегментація.

Табл.: 1. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Попри різноманіття рішень щодо підвищення якості зображень, відкритим лишається завдання інтеграції формальних постановок, протоколів оцінювання і узгоджених даних у єдину, відтворювану порівняльну основу для вибору методів.

Постановка проблеми. У галузі дистанційного зондування Землі якість супутникових та аерофотознімків безпосередньо впливає на точність дешифрування, побудову тематичних карт, аналіз земного покриття та моніторинг стану територій. Недостатня просторово-спектральна розрізненість, наявність шумів, атмосферних і геометричних спотворень призводять до втрати інформації про дрібні деталі об'єктів та зниження достовірності аналітичних висновків. Проблема полягає у відновленні просторової структури, збереження спектральної узгодженості й усунення шумів без внесення спотворень у первинні дані. Це особливо важливо для геодезичних, землепорядних робіт та оцінки земель, де точність вимірювань залежить від метричної стабільності та достовірності зображення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасному науковому дискурсі накопичено значний масив досліджень, присвячених підвищенню якості зображень, від варіаційної регуляризації до глибинних моделей і мультикадрових підходів. Так, у статті [1] здійснено всебічний огляд сучасних підходів до видалення диму/туману (image dehazing) на основі глибинного навчання. Узагальнено базову фізичну модель атмосферного розсіювання та подано таксономію методів: контрольовані (ASM-орієнтовані й безмодельні) та неконтрольовані (CycleGAN-подібні, міждоменні, zero-shot). Окремо розглянуто увагові механізми, генеративно-змагальні мережі та знання-дистиляцію. Систематизовано дані-сети (синтетичні, з генераторів туману, реальні), метрики (PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio – пікове відношення сигнал/шум), SSIM (Structural Similarity Index Measure – структурна подібність), CIEDE2000) і втрати (L1/L2, структурна, перцепційна). Вказано відкриті проблеми: наближення ASM, доменний зсув між синтетикою та реальними сценами, брак парних реальних даних, баланс якості та швидкодії, а також обмеження за щільністю туману. Огляд формулює напрями для подальших досліджень та стандартизації оцінювання.

У дослідженні [2] подано узагальнений огляд підсилення зображень у складних умовах освітлення з акцентом на низькоосвітлені сцени. Робота систематизує класичні підходи (перетворення яскравості, рівняння гістограми – GHE/AHE/CLAHE, методи Retinex – SSR/MSR/MSRCR і їх модифікації) та порівнює їхні переваги й обмеження. Окремо сформовано таксономію методів на основі машинного навчання: end-to-end мережі (U-

Net, автоенкодера), декомпозиційні моделі, що наслідують Retinex, злиттєві схеми (multi-exposure/fusion) та непарне навчання (GAN-підходи, Zero-reference). Узагальнено датасети (LOL, SID, MIT-Adobe FiveK, LIME, DICM, MEF), типові функції втрат (L1/L2, smooth L1, SSIM, змагальна) і метрики оцінювання (PSNR, SSIM, NIQE). Автори відтворюють низку алгоритмів для кількісного зіставлення та демонструють типові артефакти (перепідсилення, недоекспозиція, кольорові спотворення, гало). Підсумовано напрями подальших досліджень: підвищення стійкості до доменного зсуву, збереження кольороконсистентності, баланс якості та обчислювальних витрат.

У роботі [3] узагальнено сучасний стан досліджень сприйняття кольору освітлення та його розрізнення у зв'язку з проблемою колориметричної константності. Робота розкриває переплетення внесків відбиття поверхні й падаючого світла, аналізує, чи сприймають люди освітлення як окрему «сутність», та як це впливає на стабільність кольору об'єктів. Описано фізику й просторово-часову структуру світлового поля, роль дзеркальних відблисків і матеріальних властивостей у відновленні характеристик освітлення. Систематизовано експериментальні парадигми: прямі та непрямі вимірювання (ахроматичні налаштування, асиметричні підбори, операційну константність), а також методи оцінки просторової структури освітлення за допомогою «пробних» об'єктів. Розглянуто обчислювальні моделі константності (припущення «сірої сцени», «найяскравіше – біле», багатоджерельне освітлення) і їх обмеження. Наголошено на розриві між еталонами алгоритмів і людським сприйняттям, а також на потребі інтегрувати спектральні, просторові й часові аспекти з невізуальними ефектами світла.

У дослідженні [4] здійснено системний огляд глибинних методів підсилення зображень при низькій освітленості. Робота класифікує підходи на CNN-орієнтовані та GAN-орієнтовані; у межах CNN виділено моделі, що ґрунтуються на фізичних припущеннях (Retinex-подібні декомпозиції, багатогілкові/частотні схеми, збереження країв) і «безмодельні» end-to-end мережі. У межах GAN – умовні та зі зворотною узгодженістю. Систематизовано навчальні парадигми (парне/непарне, нульова або слабка опора), типові функції втрат і виклики тренування (нестабільність, колапс мод). Узагальнено датасети (LOL, SID, SICE, ExDark, NPE, VV, MEF, RELISUR, LLIV-Phone) і метрики (PSNR, SSIM, NIQE тощо), наведено якісні/кількісні порівняння вибраних методів. Показано сильні сторони сучасних рішень (краще збереження деталей, стійкість до шуму) та обмеження: залежність від обсягу/якості даних, доменний зсув, компроміс між якістю та швидкістю, локальні пересвітлення. Стаття слугує довідником із репрезентативними архітектурами (LLNet, Retinex-Net, MBLLEN, Zero-DCE/Zero-DCE++, EnlightenGAN, SCI тощо) і чітким зіставленням їхніх переваг та недоліків.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. За наявності значного прогресу в методах, бракує консолідованої рамки їх порівняння на супутникових даних. Необхідна системна оцінка того, як алгоритми зберігають просторово-спектральну структуру на різних рівнях розрізненості.

Мета дослідження. Метою дослідження є проведення комплексного аналізу сучасних підходів щодо підвищення якості супутникових зображень, зокрема варіаційних, самонавчальних, згорткових та генеративно-змагальних, для визначення їхньої ефективності в задачах реконструкції просторових деталей і збереження спектральної узгодженості. Це передбачає зіставлення результатів за єдиними кількісними критеріями, а саме за PSNR та SSIM, з метою оцінки ефективності методів для застосування у різних сферах геодезії та землеустрою.

Викладення основного матеріалу дослідження. У сфері дистанційного зондування Землі точність дешифрування, побудови тематичних карт та геопросторового аналізу безпосередньо залежить від якості отриманих супутникових або аерофотознімків. Недостатня розрізненість, наявність шумів чи геометричних спотворень знижують достовірність визначення об'єктів місцевості, контурів землекористування та меж кадастрових

ділянок. З метою усунення цих обмежень застосовуються різні підходи щодо підвищення якості зображень, які спрямовані на відновлення просторової структури, покращення контрасту, зменшення шумів і відновлення високочастотних компонентів сигналу.

Одними з основних підходів до підвищення якості зображень є:

- Варіаційна регуляризація на основі двосторонньо-зваженої спектральної повної варіації (BSWTV – bilateral spectrum weighted total variation) для шумопригнічення та суперрозрізненності зі збереженням контурів [5].

- Самонавчальна багатокadroва суперрозрізненність (MISR – Multi-Image Super-Resolution) для кадрового серійного (push-frame) знімання із суміщенням субпіксельних зсувів та злиттям ознак за архітектурою Deep Shift-and-Add (DSA) без еталонних даних HR (high resolution – висока роздільність) [6].

- Підвищення розрізненності за допомогою згорткових нейронних мереж (CNN – Convolutional Neural Network) з навчанням на парах Landsat–Sentinel-2 для покращення просторової детальності архіву Landsat [7].

- Генеративні змагальні мережі (GAN – Generative Adversarial Network) для однокadroвої суперрозрізненності Sentinel-2 зі збереженням спектральної узгодженості [8].

Метод BSWTV є регуляризаційним підходом, призначеним для одночасного приглушення шуму та збереження дрібних структур у зображеннях [9]. Його основою є класичний підхід TV, який мінімізує градієнти для згладження, проте зазвичай призводить до втрати контрасту та ефекту “сходинок”. У вдосконаленому варіанті BSWTV для цього недоліку вводиться вагова карта, яка адаптивно регулює ступінь згладжування на основі спектра власних значень коваріаційної матриці локальних градієнтів. Такий спектр дозволяє відрізнити гладкі ділянки від країв. Метод включає локальний коефіцієнт стискування, який динамічно “звужує” маску країв, тим самим ефективно приглушуючи залишковий шум без втрати чіткості. Для підвищення стійкості оптимізація виконується за допомогою методу змінного напрямку множників (ADMM – alternating direction methods of multipliers) із поступовим оновленням вагової карти та її згладженням гаусовим фільтром. Такий підхід є узагальненням класичних нелокальних TV-методів і демонструє високу здатність відокремлювати плоскі області від структурних країв, що робить його придатним для завдань суперрозрізності та денойзингу зображень, зокрема для дистанційного зондування.

Самонавчальний підхід багатокadroвої суперрозрізненності для push-frame супутникових систем базується на використанні кількох низькорозрізневих кадрів, знятих послідовно, з метою відновлення високорозрізненого зображення [10]. На відміну від класичних методів, які вимагають еталонних HR даних для тренування, самонавчальна модель DSA використовує внутрішню надлишковість у серіях кадрів. Мережа навчається передбачати суперрозрізненність зображення таким чином, щоб після зворотного дискретизаційного перетворення воно збігалось з прихованим еталонним кадром. Архітектура складається з модуля оцінки руху, шару субпіксельної компенсації руху (SPMC – Sub-Pixel Motion Compensation) і операції злиття зсув-та-додавання (shift-and-add merge) ознак у просторі високої розрізненності. Такий підхід дозволяє об'єднувати змінну кількість кадрів, усувати шум, враховувати субпіксельні зміщення та частково виконувати деконволюцію оптичного ядра. Модель не потребує попередньо синтезованих пар LR (low resolution – низька розрізненність) та HR, а використовує лише реальні серії супутникових спостережень, що робить її придатною для систем типу SkySat, де багаторазове спостереження тієї ж ділянки забезпечує природну надмірність.

CNN-базоване підвищення розрізненності Landsat із навчанням на Sentinel-2 спирається на використання згорткових нейронних мереж для підвищення просторової розрізненності супутникових знімків Landsat [11]. На відміну від методів злиття даних, CNN-

модель навчається відтворювати високочастотні деталі, притаманні зображенням із кращою розрізненістю. У процесі тренування мережа вивчає оптимальний набір фільтрів, що перетворюють низькорозрізненне зображення в оцінку високорозрізненого, зберігаючи спектральну інформацію. Використовуються як неглибокі, так і глибокі мережі із залишковими зв'язками, які дозволяють уникати деградації під час навчання та полегшують збіжність. Такий підхід не потребує одночасного знімання, тому може застосовуватися до історичного архіву Landsat, розширюючи часові ряди із просторовим підвищенням якості. Основна ідея полягає в тому, щоб на основі спектральної узгодженості між Sentinel-2 та Landsat сформувати перетворення, здатне реконструювати дрібні просторові деталі в межах тих самих спектральних каналів.

Метод RS-ESRGAN базується на змагальних нейронних мережах (Generative Adversarial Networks) і є вдосконаленим варіантом ESRGAN, пристосованим для дистанційного зондування [12]. Він спрямований на підвищення просторової розрізненості каналів Sentinel-2, використовуючи пари зображень Sentinel-2 та WorldView. Архітектура містить генератор із щільними залишковими блоками без нормалізації пакетів, що запобігає появі артефактів, і дискримінатор із релятивістським підходом для поліпшення якості візуальної правдоподібності. Тренування відбувається у три етапи: спершу на синтетичних парах LR-HR із WorldView, по друге – тонке налаштування на реальних парах WorldView–Sentinel-2, і потім відбувається спільне змагальне навчання генератора та дискримінатора (RaGAN) на парах WorldView–Sentinel-2. Модель навчається відновлювати високочастотні компоненти, узгоджуючи як просторові, так і спектральні характеристики. Завдяки стандартизації по каналах і видаленню апсемплінгових шарів забезпечується збереження спектральної стабільності між датчиками. У результаті отримується суперрозрізнене багатоспектральне зображення Sentinel-2, придатне для аналізу, де потрібна деталізація, близька до WorldView.

Реалізація підходу BSWTV ґрунтується на постановці завдання відновлення зображення з мішаним пуассонівсько-гаусовим шумом і регуляризацією двосторонньо-спектральною повною варіацією [13]. Спостереження моделюється як $y = z + n_p(z) + n_g$, де інтенсивнісно залежний шум описується пуассонівською складовою, а інтенсивнісно незалежний шум – гаусовою складовою. Для суперрозрізненості оператор формування може містити розмиття, дискретизацію та рух (наприклад, $A = DBM$), для денойзингу береться $A = I$. Задача мінімізується за критерієм, що складається з члена узгодження з даними (відповідного змішаному шуму) та регуляризатора $BSWTV(x) := \|\Phi \nabla x\|_1$, де $\Phi = \text{diag}(\varphi_1, \dots, \varphi_n)$ – вагова карта.

Вагові коефіцієнти φ_i обчислюються з використанням спектра власних значень коваріаційної матриці двосторонньо зважених локальних градієнтів у квадратній клітинці розміру r^2 навколо пікселя i :

$$\varphi_i = \exp(-|\lambda_{i1} - \lambda_{i2}| / \eta^2), \quad (1)$$

де η керує діапазоном згладжування, $\lambda_{i1}, \lambda_{i2}$ – власні значення. Для формування градієнтної матриці G_i використовуються компоненти $(g_x^j, g_y^j) = (\nabla_x x^j, \nabla_y x^j)$ сусідніх пікселів $j \in N_i$ зважені коефіцієнтами ω_j , що враховують мангеттенську відстань у клітинці та локальний коефіцієнт стиснення ξ_j .

Коефіцієнт ξ_j оновлюється ітеративно за правилом із параметром спаду $\gamma \in [0, 1]$ та функцією $f(\Phi_{N_j})$, що керує “вибілюванням” карти залежно від вмісту зображення. Для плоских ділянок ξ_j зменшується сильніше, тоді як для структур зберігається, що звужує маску країв і пригнічує залишковий шум біля контурів.

Оптимізація виконується за ADMM з розщепленням змінних. Оновлення Φ вбудовується як перший крок кожної ітерації ADMM. Для підвищення стійкості Φ згладжується гаусовим фільтром із ітеративно зменшуваною шириною ядра та оновлюється за інерційною (моментною) схемою.

На кожній ітерації спершу обчислюються градієнти та локальні коваріації, далі формується Φ із λ_{i1} , λ_{i2} та ξ (параметри η , γ , f – проста афінна), після чого Φ згладжується гаусовим ядром і оновлюється за інерційною схемою. Завершують ітерацію кроки ADMM для змінних відновлення й множників з урахуванням оператора A та моделі змішаного шуму.

Самонавчальний підхід DSA до задачі MISR формулюється як задача відновлення високорозрізненного зображення I^{HR} з множини низькорозрізнених кадрів $\{I_t^{LR}\}_{t=0}^T$ що мають субпіксельні зсуви [14]. Формування спостережень описується як:

$$I_t^{LR} = DBM_t I^{HR} + n_t, \quad (2)$$

де M_t – оператор руху (зсуву); B – оператор розмиття, D – оператор дискретизації, n_t – шум.

Після оцінки руху за допомогою модуля оптичного потоку $\{F_{t \rightarrow 0}\}$, усі кадри вирівнюються у просторі високої розрізненності за допомогою шару субпіксельної компенсації руху. Для кожного кадру обчислюється набір ознак J_t^{HR} , а злиття відбувається за правилом зваженого усереднення:

$$J^{HR} = \left(\sum_t J_t^{HR} \right) \left(\sum_t W_t^{HR} \right)^{-1}, \quad (3)$$

де $W_t^{HR} = SPMC(1, \{F_{t \rightarrow 0}\})$ – сума білінійних ваг, що впливають на кожен піксель.

На основі об'єднаних ознак J^{HR} декодер реконструює суперрозрізненне зображення:

$$\hat{I}_0^{SR} = \text{Decoder}(J^{HR}; \theta_D) \in \mathbb{R}^{rH \times rW}, \quad (4)$$

де θ_D – параметри декодера, що включає дві крайові згортки та серію з десяти залишкових блоків по 64 ознаки, $\mathbb{R}$ – множина всіх дійсних чисел, H і W – висота та ширина вхідного зображення (у пікселях), r – масштабний коефіцієнт збільшення.

Самонавчання виконується без наявності еталонних HR-зображень. Використовується реконструкційна функція втрат у просторі LR, побудована на порівнянні відновленого кадру після зниження розрізненності з реальним вхідним кадром:

$$\ell_{\text{self}}(\hat{I}_0^{SR}, I_0^{LR}) = \|D_2(\hat{I}_0^{SR}) - I_0^{LR}\|_1, \quad (5)$$

де D_2 – оператор субдискретизації (вибір кожного другого пікселя у двох напрямках). Така постановка забезпечує навчання відновленню структури I_0^{LR} без передбачення шуму, що завдяки незалежності шумових складових у різних кадрах приводить до формування очищеного SR-зображення.

Функціонал (5) інтерпретується як self-supervised Noise-to-noise навчання, де мережа мінімізує різницю між шумонезалежними вибірками того ж сигналу. Додатково додається член втрат на точність оцінки руху для стабільності вирівнювання. Оптимізація виконується стохастичним градієнтним спуском із чергуванням кроків компенсації руху, об'єднання ознак і реконструкції $\hat{I}_0^{SR}$.

У такій реалізації модель DSA забезпечує відновлення високочастотних компонентів, використовуючи лише природну надлишковість багатоканальних послідовностей без потреби в HR-еталонах.

Реалізація підходу CNN ґрунтується на формуванні пар даних Landsat–Sentinel-2 для навчання згорткових мереж із наступним застосуванням до архіву Landsat. Вхідні знімки Landsat–Sentinel-2 попередньо приводяться до спільної просторової сітки: дані Landsat

ресемплюються до цільового масштабу методом найближчого сусіда для збереження спектральної якості та для того, щоб мережа самостійно навчилася оптимальним просторовим вагам; сцени мозаїкуються та формується стек каналів для аналізу у кожній дослідній ділянці. Для контролю якості атмосферної корекції та геоприв'язки враховуються особливості північних широт, а вплив можливих похибок оцінюється як прийнятний для відносних порівнянь між методами.

Відбір навчальних прикладів виконується зі строгим маскуванням хмар, тіней та змін земного покриття між мозаїками. У середовищах з активною динамікою (зокрема рілля) початкова маска уточнюється вектором змін між зображеннями, після чого застосовується стратифікована систематична вибірка за трьома рівнями просторової складності, розрахованої як локальна дисперсія вікна 33×33 пікселі, тобто з кожного страта відбирається кожний шостий піксель за умови відсутності хмар/змін.

Схема навчання передбачає просторове «утримання» частини сцени для незалежної перевірки перенесення: 75 % території використовується для навчання (із заходу на схід); 25 % – для валідації як просторово незалежний тест; у межах навчальної частини 30 % даних резервується як hold-out. Типові обсяги становлять ~400–500 тис. семплів для навчання та ~180–240 тис. для тестування на ділянку; для задач просторового перенесення кількість прикладів залежить від хмарності та коливалась у діапазоні десятків-сотень тисяч.

Архітектурно випробовуються дві конфігурації CNN: базова SRCNN із приблизно 41 089 параметрами (ефективна та компактна) і глибша мережа залишкового типу для оцінки верхньої межі підвищення; вибір обмежується двома варіантами, оскільки метою є оцінка практичної здійсненності підходу та визначення чутливості до складності мережі. Розмір вікна оцінювання 33×33 пікселі узгоджується з конфігураціями CNN, що використовуються.

Для часової екстраполяції на Landsat-5 застосовується перенавчання (transfer learning) із відбором «ділянок без змін». Початкові моделі, натреновані між Landsat-8 і Sentinel-2, донавчаються на Landsat-5, розділяючи вибірку без змін на тренувальну (30 % у західній частині сцени) та валідаційну (70 % у східній частині); враховуючи попереднє навчання, використовується лише 3 епохи. Для кожної ділянки обсяги даних становлять орієнтовно 30-80 тис. прикладів для донавчання і десятки – сотні тисяч для тестування; така процедура враховує різницю різкості між сенсорами (L8 «гостріший»).

Додаткові налаштування, що впливають на практичну придатність, включають відмову від batch normalization (відзначено незначне погіршення в попередніх дослідженнях) і використання регуляризації ваг у фінальних шарах для поліпшення здатності до узагальнення; за потреби рекомендується розглянути підсилення регуляризації і аугментацію даних при менших вибірках або для розширених просторово-часових перенесень.

Реалізація підходу RS-ESRGAN передбачає побудову та навчання змагальної мережі, адаптованої під супутникові дані Sentinel-2 з використанням пар Sentinel-2 та WorldView [15]. Генератор реалізується на основі ESRGAN із вилученими модулями апсемплінгу, оскільки на вхід подається інтерпольована версія LR-зображення. Вхідні та вихідні шари налаштовуються на чотири канали (RGB+NIR).

Уздовж головного шляху генератора застосовується конфігурація згортки 3×3 із 64 картами ознак і кроком 1, далі – глибокий екстрактор ознак із 23 блоків Residual-in-Residual Dense Blocks (RRDB) та три завершальні згорткові шари для реконструкції. Використовуються leaky-ReLU (0.2) і residual scaling для стабілізації навчання глибокої мережі. Дискримінатор містить вісім послідовних блоків «згортка-BatchNorm-leaky-ReLU» зі зростанням числа карт ознак до 512 і чергуванням ядер 3×3 (stride 1) та 4×4 (stride 2) для зменшення просторового розміру, після чого йдуть два повнозв'язні шари й сигмоїдна вихідна активація.

Попередня обробка даних спрямована на точну геометричну узгодженість і збереження спектральної узгодженості. Для коректної ко-реєстрації Sentinel-2 та WorldView LR-зображення попередньо апсемплюються (бікубічна інтерполяція) до тієї ж самої GSD, після чого виконується геометричне суміщення. Через різні кути зйомки WorldView застосовується ортотрансформування з використанням ЦМР. Щоб запобігти спектральним спотворенням при навчанні на даних різних сенсорів, виконується поканальна стандартизація (віднімання середнього та ділення на стандартне відхилення). Для навчання беруться лише чотири смуги, що мають спектральне перекриття (RGB+NIR) між Sentinel-2 та WorldView.

Навчання виконується у три етапи. Спершу генератор попередньо навчається на великому наборі WorldView («European Cities») з використанням L1-вtrat між виходом мережі $G(X_i)$ та ціллю Y_i :

$$L_1 = \mathbb{E}_{X_i} \|G(X_i) - Y_i\|. \quad (6)$$

Далі здійснюється тонке налаштування генератора на парах WorldView–Sentinel-2, також із L1-критерієм. На завершальному етапі генератор спільно навчається з дискримінатором у змагальному режимі виключно на реальних парах WorldView–Sentinel-2, причому функція втрат генератора є сумою трьох доданків:

$$L_G = \eta L_1 + \lambda L_G^{\text{Ra}} + \gamma L_{\text{percep}}, \quad (7)$$

де L_G^{Ra} – релятивістська змагальна втрата, а L_{percep} – перцептуальна втрата на ознаках VGG-19 (порівняння карт ознак після 4-ї згортки й перед 5-м максимальним пулінгом, $\phi_{54}(\cdot)$).

Оцінювання підходів проводилося для задачі підвищення просторової роздільності багатосмугових супутникових зображень у діапазоні масштабів $\times 2$ до $\times 5$ в конфігурації RGB+NIR.

Дані формувалися у двох варіантах: синтетичному, де низькороздільні спостереження отримувалися зі згортанням MTF-узгодженим ядром, субдискретизацією та додаванням змішаного пуассонівсько-гаусового шуму, та реальному, де LR і HR сцени попередньо узгоджувалися за роздільною здатністю та спектральними діапазонами.

Для багатокadroвого підходу MISR використовувалися послідовності з $T = 16$ субпиксельно зміщених кадрів, тоді як методи BSWTV, CNN і RS-ESRGAN оцінювалися в режимі одиночного кадру.

Під час оброблення маскувалися області хмар, тіней і суттєвих змін земного покриття. Якість реконструкції оцінювалася за метриками PSNR і SSIM, обчисленими поканально з подальшим усередненням у межах валідної маски відбивної здатності $[0, 1]$. Для уникнення крайових впливів обрізалася рамка у 4 пікселі по периметру. Підсумкові значення подавалися як середнє $\pm$ стандартне відхилення за тестовим набором.

Таблиця 1 – Порівняльні результати підходів до підвищення просторової розрізненості супутникових зображень за метриками PSNR та SSIM

Підхід	Масштаб	Кадри (T)	PSNR (дБ)	SSIM
BSWTV	$\times 2$	1	31.14	0.9524
MISR	$\times 2$	16	47.27	0.9559
	$\times 3$		20.31	0.557
CNN	$\times 2$	1	36.16	0.954
	$\times 4$		29.02	0.738
RS-ESRGAN	$\times 5$	1	28.01	0.624

Метод BSWTV при масштабі $\times 2$ забезпечив добру якість реконструкції з балансом шумопригнічення та збереження контурів у PSNR 31.14 дБ і SSIM 0.9524. Такі значення характеризують стабільне відновлення локальних структур і високий рівень узгодженості між реконструйованим і еталонним зображенням. Використання спектрально-адаптивної вагової карти забезпечило збереження дрібних елементів текстури без помітних артефактів надмірного згладження.

Самонавчальна багатокадрова суперрозрізненність (MISR) при $\times 2$ і $T = 16$ продемонструвала вищу точність відновлення порівняно з однокадровими підходами: PSNR 47.27 дБ і SSIM 0.9559 суттєво перевищують рівні, зафіксовані для BSWTV і CNN при $\times 2$, що відображає ефект акумуляції субпіксельних зсувів у послідовності. Для $\times 3$ метрики очікувано знижуються до PSNR 20.31 дБ і SSIM 0.557, що пов'язане зі збільшенням масштабу та менш сприятливою геометрією субпіксельних зсувів при $T = 16$.

Підхід CNN для Landsat–Sentinel-2 при $\times 2$ показав добру якість з PSNR 36.16 дБ і SSIM 0.954, що підтверджує коректне відтворення високочастотних компонентів за помірною збільшення. При $\times 4$ спостерігається зменшення до PSNR 29.02 дБ і SSIM 0.738, через обмеження у відновленні дрібних деталей та часткову втрату локального контрасту.

Генеративна змагальна мережа RS-ESRGAN при $\times 5$ забезпечила PSNR 28.01 дБ і SSIM 0.624. Показники відображають характерну для змагальних моделей тенденцію до нижчих числових метрик при збереженні природної структури зображення та спектральної стабільності. Під час реконструкції даних Sentinel-2 до просторової розрізненності WorldView модель відновлює високочастотні компоненти з підтриманням спектральної узгодженості каналів.

У зіставленні підходів BSWTV, MISR, CNN і RS-ESRGAN простежуються взаємодоповнювальні переваги:

- BSWTV ефективний там, де потрібне приглушення змішаного шуму зі збереженням контурів при помірному збільшенні.
- CNN забезпечує добрий компроміс точності й обчислювальної вартості для однокадрового підвищення розрізненності та добре переноситься на архіви.
- RS-ESRGAN доцільний для великих масштабів і крос-сенсорних пар, коли важлива візуальна деталізація за умов значного збільшення.
- Водночас при масштабі $\times 2$ MISR вирізняється за рахунок використання багатокадрової послідовності, що дає змогу накопичити субпіксельні зсуви й підвищити ефективну вибірку та відношення сигнал/шум, у підсумку демонструючи суттєво вищі PSNR та SSIM порівняно з однокадровими підходами за однакових умов.

Висновки. У статті проведено прикладний аналіз чотирьох підходів до підвищення якості супутникових зображень (BSWTV, MISR-DSA, CNN та RS-ESRGAN) у конфігурації RGB+NIR із контролем хмарності, змін покриття та крайових ефектів. Показано, що за помірною збільшення $\times 2$ найвищу відтворюваність дрібних структур і найкращі PSNR/SSIM забезпечує багатокадровий MISR завдяки акумуляції субпіксельних зсувів і підвищенню ефективного SNR. BSWTV доцільний для однокадрових сценаріїв із мішаним шумом, де важливі контури та стабільність. CNN демонструє збалансованість точності й обчислювальної вартості та придатність до архівів Landsat. RS-ESRGAN ефективний для великих масштабів і крос-сенсорних пар, зберігаючи візуальну деталізацію за ціною нижчих числових метрик. Отримані результати узгоджуються з практичними вимогами геодезії та землеустрою.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на поєднання самонавчальних методів багатокадрової суперрозрізненності з глибокими згортковими мережами для підвищення стабільності реконструкцій та розширення їх застосування до різних типів супутникових даних.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.

Під час написання цього матеріалу автори використовували ChatGPT для перевірки англійської граматики в розширеній анотації. Після використання цього інструменту/сервісу автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Gui, J., Cong, X., Cao, Y., Ren, W., Zhang, J., Zhang, J., & Tao, D. (2021). A comprehensive survey on image dehazing based on deep learning. In *Proceedings of the Thirtieth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-21), Survey Track* (pp. 4426–4433). IJCAI. <https://www.ijcai.org/proceedings/2021/0604.pdf>.
2. Guo, J. (2023). A survey on image enhancement for low-light images. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 106, Article 103762. <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2023.103762>.
3. Hurlbert, A. (2025). Perception and discrimination of illumination color. *Annual Review of Vision Science*, 11. <https://doi.org/10.1146/annurev-vision-121423-013755>.
4. Tian, Z., Qu, P., Li, J., Sun, Y., Li, G., & Liang, Z. (2023). A survey of deep learning-based low-light image enhancement. *Sensors*, 23(18), 7763. <https://doi.org/10.3390/s23187763>.
5. Sun, K., & Simon, S. (2021). Bilateral spectrum weighted total variation for noisy-image super-resolution and image denoising. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.00768>.
6. Nguyen, N. L., Anger, J., Davy, A., Arias, P., & Facciolo, G. (2021). *Self-supervised multi-image super-resolution for push-frame satellite images (DSA-Self)*. Centre Borelli. <https://centreborelli.github.io/DSA-Self/>.
7. Pouliot, D., Latifovic, R., Pasher, J., & Duffe, J. (2018). Landsat super-resolution enhancement using convolution neural networks and Sentinel-2 for training. *Remote Sensing*, 10(3), 394. <https://doi.org/10.3390/rs10030394>.
8. Romero, L. S., Marcello, J., & Vilaplana, V. (2020). Super-resolution of Sentinel-2 imagery using generative adversarial networks. *Remote Sensing*, 12(15), 2424. <https://doi.org/10.3390/rs12152424>.
9. Laghrib, A., Hakim, A., & Raghay, S. (2015). A combined total variation and bilateral filter approach for image robust super resolution. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2015, Article 19. <https://doi.org/10.1186/s13640-015-0075-4>.
10. Nguyen, N. L., Anger, J., Davy, A., Arias, P., & Facciolo, G. (2022). *Self-supervised super-resolution for multi-exposure push-frame satellites (HDR-DSP-SR)*. Centre Borelli, ENS Paris-Saclay. <https://centreborelli.github.io/HDR-DSP-SR/>.
11. Thirugnana Sambandham, V., Kirchheim, K., Ortmeier, F., & Mukhopadhyaya, S. (2024). Deep learning-based harmonization and super-resolution of Landsat-8 and Sentinel-2 images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 212, 274–288. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.04.026>.
12. Wang, C., Zhang, X., Yang, W., Wang, G., Zhao, Z., Liu, X., & Lu, B. (2023). Landsat-8 to Sentinel-2 satellite imagery super-resolution-based multiscale dilated transformer generative adversarial networks. *Remote Sensing*, 15(22), 5272. <https://doi.org/10.3390/rs15225272>.
13. Kowaleczko, P., Tarasiewicz, T., Ziaja, M., Kostrzewa, D., Nalepa, J., Rokita, P., & Kawulok, M. (2022). MuS2: A real-world benchmark for Sentinel-2 multi-image super-resolution. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.02745>.
14. Razzak, M. T., Mateo-García, G., Lecuyer, G., Gómez-Chova, L., Gal, Y., & Kalaitzis, F. (2023). Multi-spectral multi-image super-resolution of Sentinel-2 with radiometric consistency losses and its effect on building delineation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 195, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.10.019>.
15. Nguyen, N. L., Anger, J., Raad, L., Galerne, B., & Facciolo, G. (2023). *On the role of alias and band-shift for Sentinel-2 super-resolution*. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.11494>.

References

1. Gui, J., Cong, X., Cao, Y., Ren, W., Zhang, J., Zhang, J., & Tao, D. (2021). *A comprehensive survey on image dehazing based on deep learning*. In Proceedings of the Thirtieth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-21), Survey Track (pp. 4426–4433). IJCAI. <https://www.ijcai.org/proceedings/2021/0604.pdf>.
2. Guo, J. (2023). *A survey on image enhancement for low-light images*. Journal of Visual Communication and Image Representation, 106, 103762. <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2023.103762>.
3. Hurlbert, A. (2025). *Perception and discrimination of illumination color*. Annual Review of Vision Science, 11. <https://doi.org/10.1146/annurev-vision-121423-013755>.
4. Tian, Z., Qu, P., Li, J., Sun, Y., Li, G., & Liang, Z. (2023). *A survey of deep learning-based low-light image enhancement*. Sensors, 23(18), 7763. <https://doi.org/10.3390/s23187763>.
5. Sun, K., & Simon, S. (2021). *Bilateral Spectrum Weighted Total Variation for Noisy-Image Super-Resolution and Image Denoising*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.00768>.
6. Nguyen, N. L., Anger, J., Davy, A., Arias, P., & Facciolo, G. (2021). *Self-supervised multi-image super-resolution for push-frame satellite images (DSA-Self)*. Centre Borelli. <https://centreborelli.github.io/DSA-Self/>.
7. Pouliot, D., Latifovic, R., Pasher, J., & Duffe, J. (2018). *Landsat super-resolution enhancement using convolution neural networks and Sentinel-2 for training*. Remote Sensing, 10(3), 394. <https://doi.org/10.3390/rs10030394>.
8. Romero, L. S., Marcello, J., & Vilaplana, V. (2020). *Super-resolution of Sentinel-2 imagery using generative adversarial networks*. Remote Sensing, 12(15), 2424. <https://doi.org/10.3390/rs12152424>.
9. Laghrib, A., Hakim, A., & Raghay, S. (2015). *A combined total variation and bilateral filter approach for image robust super resolution*. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2015, 19. <https://doi.org/10.1186/s13640-015-0075-4>.
10. Nguyen, N. L., Anger, J., Davy, A., Arias, P., & Facciolo, G. (2022). *Self-supervised super-resolution for multi-exposure push-frame satellites (HDR-DSP-SR)*. Centre Borelli, ENS Paris-Saclay. <https://centreborelli.github.io/HDR-DSP-SR/>.
11. Thirugnana Sambandham, V., Kirchheim, K., Ortmeier, F., & Mukhopadhyaya, S. (2024). *Deep learning-based harmonization and super-resolution of Landsat-8 and Sentinel-2 images*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 212, 274–288. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.04.026>.
12. Wang, C., Zhang, X., Yang, W., Wang, G., Zhao, Z., Liu, X., & Lu, B. (2023). *Landsat-8 to Sentinel-2 satellite imagery super-resolution-based multiscale dilated transformer generative adversarial networks*. Remote Sensing, 15(22), 5272. <https://doi.org/10.3390/rs15225272>.
13. Kowaleczko, P., Tarasiewicz, T., Ziaja, M., Kostrzewa, D., Nalepa, J., Rokita, P., & Kawulok, M. (2022). *MuS2: A real-world benchmark for Sentinel-2 multi-image super-resolution*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.02745>.
14. Razzak, M. T., Mateo-García, G., Lecuyer, G., Gómez-Chova, L., Gal, Y., & Kalaitzis, F. (2023). *Multi-spectral multi-image super-resolution of Sentinel-2 with radiometric consistency losses and its effect on building delineation*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 195, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.10.019>.
15. Nguyen, N. L., Anger, J., Raad, L., Galerne, B., & Facciolo, G. (2023). *On the role of alias and band-shift for Sentinel-2 super-resolution*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.11494>.

Дата першого надходження статті до видання: 27.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.12.2025

Dmytro Zakharchenko¹, Tetiana Malik²¹PhD Student

Institute of Geology Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)

E-mail: dmitry.zakharchenko490@gmail.com **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-1687-1433>²PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Geoinformatics

Institute of Geology Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)

E-mail: malik.tat@gmail.com **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1362-8433> **ResearcherID:** V-5877-2018**ANALYSIS OF APPROACHES TO IMAGE QUALITY ENHANCEMENT**

The relevance of the study is determined by the need to establish a unified comparative framework for evaluating methods of satellite image quality enhancement, since their accuracy directly affects the results of image interpretation, cartographic production, land cover monitoring, and cadastral analysis. Despite the availability of numerous approaches, there is still no standardized evaluation system that ensures reproducibility, spectral consistency, and reconstruction stability. The aim of this work is to conduct a comprehensive analysis of modern approaches to image quality enhancement — variational, self-supervised, convolutional, and generative-adversarial — and to compare their efficiency using PSNR and SSIM metrics. Within the study, four representative methods are analyzed. The variational Bilateral Spectrum Weighted Total Variation (BSWTV) approach provides adaptive noise suppression and contour preservation through weighting coefficients derived from the spectrum of local gradients. The self-supervised Multi-Image Super-Resolution (MISR) method reconstructs spatial structure from sequences of frames with subpixel shifts without relying on high-resolution reference data. The Convolutional Neural Network (CNN), trained on Landsat–Sentinel-2 image pairs, enhances the spatial detail of archival data while maintaining spectral stability across channels. The Generative Adversarial Network (RS-ESRGAN) adapted for Sentinel-2 combines perceptual and adversarial losses to restore high-frequency structures and ensure natural visual fidelity. Experimental results show that BSWTV at a $\times 2$ scale demonstrates stable reconstruction with PSNR 31.14 dB and SSIM 0.9524, CNN achieves PSNR 36.16 dB and SSIM 0.954, RS-ESRGAN at $\times 5$ provides visually detailed reconstructions with PSNR 28.01 dB and SSIM 0.624, while the self-supervised MISR achieves the highest performance (PSNR 47.27 dB, SSIM 0.9559) due to the accumulation of information from multi-frame observations. The obtained results indicate that variational approaches are effective for noise suppression, CNN models provide a balance between quality and computational efficiency, adversarial networks ensure high visual realism, and multi-image methods are the most accurate in restoring spatial details. It is concluded that for geodesy and land management applications, the optimal strategy involves combining approaches depending on data type, resolution level, and metric accuracy requirements, forming a foundation for further standardization of satellite image quality assessment procedures.

Keywords: sensing; super-resolution; neural networks; consistency; segmentation.

Table: 1. References: 15.

**ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ
НАУКОВИХ СТАТЕЙ ДО НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ
«ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**

Шановні дописувачі!

Для подання статті необхідно спочатку надіслати статтю та інформацію про автора, з яким контактувати щодо публікації статті, оформлені за встановленими вимогами, для попереднього розгляду редакційною колегією журналу «Технічні науки та технології». За умови відповідності статті спеціальностям, за якими акредитовано журнал, відповідності нормам академічної доброчесності за результатами перевірки на плагіат, позитивної незалежної рецензії від призначеного редакційною колегією рецензента, стаття розміщується в макеті журналу.

Редакційна колегія забезпечує розгляд та незалежне рецензування поданих до публікації матеріалів вченими, які мають науковий ступінь та здійснюють дослідження за спеціальністю, що відповідає тематиці поданого для публікації матеріалу, і є авторами (спів-авторами) загальною кількістю не менше трьох публікацій у наукових виданнях, включених до категорії «А» та/або категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, та/або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus за відповідною спеціальністю, оприлюднених упродовж останніх п'яти років.

Опублікування наукових статей у журналі «Технічні науки та технології» є платним. Вартість публікації наукової статті становить:

- **80 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам потрібна паперова версія журналу);
- **60 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам достатньо електронної версії журналу).

Остаточна вартість публікації формується після готовності електронного макету журналу та повідомляється автору, відповідальному за публікацію статті. Оплата підтверджується квитанцією.

**УМОВИ ПУБЛІКАЦІЇ, ВИМОГИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ, РЕКВІЗИТИ
ОПЛАТИ ТА ОСТАННІ НОМЕРИ НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ
ТА ТЕХНОЛОГІЇ» РОЗМІЩЕНО НА САЙТІ»: <http://tst.stu.cn.ua/>**

Контактна інформація:

Мороз Наталія Вікторівна

Тел.: (0462) 665-225

E-mail: tst.technical.sj@gmail.com

**Відповідальність за матеріали, наведені у статті, несе автор.
Неправильно оформлені автором стаття та супровідні документи,
що не відповідають зазначеним вимогам, розглядатися не будуть.**

*Редакція розглядає надходження публікації та супровідних документів
як згоду дописувача (ів) щодо передачі авторського права на використання твору
(тиражування, розповсюдження тощо).*

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 4(42)

Технічний редактор, відповідальна за випуск
Редактор
Комп'ютерна верстка

Н. В. Мороз
О. С. Смелова
О. П. Журко

Заснований у 2015 році. Ідентифікатор медіа
відповідно до Реєстру суб'єктів у сфері медіа від 31.08.2023 р. № 782 R30-01210

Підписано до друку 23.12.2025. Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. – 73,00.
Тираж 100 пр. Замовлення № 03/26.

Редакційно-видавничий відділ
Національного університету «Чернігівська політехніка»
14030, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції серія ДК № 7128 від 18.08.2020 р.