РОЗДІЛ ІІІ. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-324-334
УДК 664.6:579.864:615.3

Мирослав Ярославович Бомба[1], Лариса Олександрівна Федина[2], Олександра Богданівна Максимець[3], Юрій Васильович Максимець[4]

[1]доктор сільськогосподарських наук, професор кафедри готельно-ресторанної справи та харчових технологій
Львівський Національний університет імені Івана Франка (Львів, Україна)
E-mail: mirbomba55@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7865-2111
ResearcherID: PLS-3672-2026. **Scopus Author ID:** 58317716100

[2]кандидат хімічних наук, доцент кафедри готельно-ресторанної справи та харчових технологій
Львівський Національний університет імені Івана Франка (Львів, Україна)
E-mail: lofedyna@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-6597-674X
ResearcherID: M-2846-2018. **Scopus Author ID:** 8574229000

[3]старший викладач кафедри готельно-ресторанної справи та харчових технологій
Львівський Національний університет імені Івана Франка (Львів, Україна)
E-mail: maxymezl@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0008-5302-3050

[4]кандидат економічних наук, доцент кафедри економіки підприємства
Львівський Національний університет імені Івана Франка (Львів, Україна)
E-mail: maxymezj@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-9693-4147

ЗАКВАСКА ЯК БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТРУМЕНТ МОЛЕКУЛЯРНОЇ ГАСТРОНОМІЇ

У роботі розглянуто закваску як біотехнологічний інструмент молекулярної гастрономії. Досліджено вплив типу борошна, на основі якого вирощувалася закваска (гречаного та гречано-житнього), а також додавання кураги на формування органолептичних і фізико-хімічних властивостей хліба. Встановлено, що найкращим складом борошняної суміші для випікання є поєднання пшеничного борошна вищого ґатунку (80 %), пшеничного цільнозернового (10 %) та гречаного (10 %). Додавання кураги покращує ароматичний профіль виробів, підвищує титровану кислотність та антиоксидантну активність. Результати підтверджують можливість використання закваски для цілеспрямованого моделювання текстури, смаку та функціональних властивостей хліба.

Ключові слова: *закваска; гречане борошно; пшеничне борошно; курага; молочнокислі бактерії; хліб.*
Рис.: 2. Бібл.: 19.

Актуальність теми дослідження. Молекулярна кухня є сучасним напрямком гастрономії, що інтегрує кулінарне мистецтво з фундаментальними знаннями про фізико-хімічні та біохімічні перетворення харчових компонентів. Ключовим завданням цього підходу є цілеспрямоване керування процесами, які формують сенсорні характеристики, текстуру та харчову цінність страв, зокрема в контексті створення продуктів із «чистим складом» (clean label) та оздоровчими властивостями [1].

Одним із найпоказовіших об’єктів для застосування принципів молекулярної кухні є хліб, виготовлений на заквасці. Процес спонтанної ферментації являє собою складну біотехнологічну систему, в якій симбіотична взаємодія молочнокислих бактерій та асоційованих дріжджів призводить до накопичення органічних кислот, синтезу летких ароматичних сполук та утворення метаболітів з пробіотичним потенціалом [2; 3]. Специфічний набір мікроорганізмів у тісті не лише визначає гастрономічну привабливість випічки, а й радикально змінює її нутрієнтний склад. Внутрішнє середовище кожної закваски є унікальним, оскільки воно формується під впливом комплексу зовнішніх та внутрішніх чинників, що перетворює базову суміш борошна та води на складний гастрономічний об’єкт із високим ступенем корисності. Дослідження мікробіоти різних заквасок свідчать про значну варіабельність видового складу залежно від типу борошна та умов культивування, що безпосередньо впливає на кінетику кислотності культури [4; 5]. Зокрема, здатність деяких представників молочнокислої мікрофлори продукувати значні кількості оцтової

© М. Я. Бомба, Л. О. Федина, О. Б. Максимець, Ю. В. Максимець, 2026

кислоти має виражений антигрибковий ефект: недисоційована кислота проникає крізь мембрани клітин грибів, спричиняючи зниження внутрішньоклітинного pH та пригнічення їхнього метаболізму [6].

Постановка проблеми. Традиційне сприйняття ферментованих напівфабрикатів виключно як засобу для аерації тіста поступово поступається місцем розумінню їхньої ролі як багатофункціональних біотехнологічних інструментів. Сучасна наука відкриває нові горизонти використання мікробіологічних культур, проте певні аспекти все ще потребують глибокого аналізу. Зокрема, недостатньо вивченими залишаються молекулярні механізми, що вивчають функціональні властивості закваски, а також можливості використання нетрадиційних видів борошна (зокрема гречаного та їхніх сумішей) та їхній вплив на формування сенсорних характеристик і біологічну цінність готових виробів.

У цьому контексті заслуговують на увагу дослідження щодо використання закваски як інструменту молекулярної гастрономії для цілеспрямованого моделювання текстури та смаку хліба. Застосування чистого гречаного борошна як інноваційного інгредієнта для випічки хліба, так і в комбінації з житнім складником, не є випадковим, а ґрунтується на специфічній нутрієнтній архітектурі цих культур. Таке поєднання створює оптимальне середовище для життєдіяльності мікроорганізмів, забезпечуючи їх рідкісними сполуками, які відсутні у класичній пшеничній сировині. Гречка містить значну кількість поліфенольних сполук, зокрема рутину, які проявляють антиоксидантну активність і можуть підсилювати функціональні властивості хліба. Крім того, гречане борошно має підвищений вміст білка та мінеральних речовин, що сприяє формуванню продуктів із підвищеною харчовою цінністю [4]. Додавання житнього борошна у співвідношенні 1:1 забезпечує більш стабільний розвиток мікробіоти закваски, оскільки житнє борошно містить легкодоступні цукри, які стимулюють активність молочнокислих бактерій та дріжджів [4; 5]. Така комбінація дозволяє досягти балансу між кислотністю закваски і її ароматичним профілем.

Вибір пшенично-гречаної суміші для випікання хліба обґрунтований необхідністю поєднати технологічні властивості пшеничного борошна з функціональними перевагами гречки. Пшеничне борошно забезпечує оптимальну газоутримувальну здатність тіста та формування еластичної структури м’якуша [7], тоді як гречане додає виражений смако-ароматичний акцент і підвищує біологічну цінність виробів [5]. Цільнозернове пшеничне борошно додатково збагачує продукт харчовими волокнами та мікроелементами, що відповідає сучасним тенденціям створення продуктів із «чистим складом» та оздоровчими властивостями [1]. Саме таке співвідношення дозволяє отримати хліб із гармонійним поєднанням сенсорних характеристик, високим рівнем антиоксидантної активності та стабільною текстурою, що підтверджено органолептичними та фізико-хімічними дослідженнями [2; 7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасна наука про харчування розглядає закваску як складну біотехнологічну систему, аналіз якої неможливий без розуміння молекулярних механізмів, що лежать в основі ферментації. Формування та дозрівання закваски визначається консорціумом молочнокислих бактерій та дріжджів, чия метаболічна активність зумовлює накопичення органічних кислот, летких сполук та біологічно активних пептидів. Аналіз поліморфізму мікроорганізмів у спонтанних заквасках підтверджує, що їхня внутрішня структура не є статичною. Навпаки, вона являє собою гнучку систему, яка постійно трансформується під впливом навколишнього середовища та технологічних маніпуляцій, що зрештою визначає унікальність кожного біологічного зразка [4; 5; 8]. Зокрема, у заквасках, виготовлених із нетрадиційних видів сировини, таких як гречка, домінують гетероферментативні молочнокислі бактерії, що забезпечують високий вміст оцтової кислоти, яка має виражену антигрибкову дію [9].

Одним із найбільш багатообіцяючих векторів сучасної нутриціології є інтеграція кукурудзяного помелу в процеси біоферментації. Це відкриває широкі можливості для моделювання спеціалізованих (безглютенових) виробів, орієнтованих на споживачів із особливими дієтичними потребами. У сучасному векторі розвитку хлібопекарської індустрії саме методологія культивування виступає фундаментом для конструювання заквасок з покращеними характеристиками. Перехід до нових стандартів якості вимагає не лише підбору інгредієнтів, а й розробки та вдосконалення технології їх приготування та дозрівання.. Дослідження впливу технологічних параметрів на якість спонтанних заквасок показало, що оптимальний час розвитку для популяцій молочнокислих бактерій та дріжджів становить 72 години за температури 25 °С. При цьому високою продуктивністю вирізнялися зразки, отримані з суміші житнього та кукурудзяного борошна у співвідношення 1:1, де спостерігалася збалансованість мікробного ценозу [8].

Вітчизняні дослідження також підтверджують, що додавання рослинної сировини, зокрема насіння базиліку, що прискорює дозрівання закваски та підвищує біохімічну активність мікробіоти [10; 11]. Використання екзогенних штамів мікроорганізмів дозволяє прискорити процес ферментації та цілеспрямовано впливати на властивість тіста. Наприклад, доведено, що застосування Lactiplantibacillus plantarum не лише інтенсифікує кислотонакопичення, але й підвищує стійкість тіста до багаторазового заморожування завдяки синтезу кріопротекторних речовин [3]. Систематичний аналіз реологічних параметрів тіста показує, що використання різних штамів молочнокислих бактерій суттєво впливає на його пружність, еластичність та газоутримувальну здатність [12]. Це, своєю чергою, корелює з якістю готових виробів. Аналіз параметрів випічки, до складу якої інтегровано ферментовані біопрепарати, демонструє їхню ключову роль у формуванні структурно-механічного каркаса готової продукції. Впровадження метаболітів мікробіологічного походження дозволяє не лише збагатити смакову палітру, а й суттєво вплинути на тривалість життєвого циклу виробу за рахунок органічних кислот, які сповільнюють процеси ретроградації крохмалю [13].

У сучасній парадигмі здорового харчування, продукти на основі природного бродіння класифікуються не просто як базова їжа, а як акумулятори життєво необхідних нутрієнтів. Використання стартових культур дозволяє трансформувати інертні компоненти зерна на легкозасвоювані форми з високим ступенем біологічної доступності. Зокрема, застосування сумішей різних видів борошна (наприклад, амаранту, гречки та кіноа) для створення спонтанних заквасок дозволяє отримувати продукти з підвищеним вмістом білка та біоактивних пептидів, що виявляють антиоксидантну активність [13; 14]. Крім того, метаболіти, утворені в процесі молочнокислого бродіння, здатні позитивно впливати на склад кишкової мікробіоти, підвищувати біодоступність мінеральних речовин, що відкриває перспективи для створення продуктів функціонального призначення [13; 15]. Важливо зазначити, що сучасні наукові дослідження тісно пов’язані з вивчення традиційних технологій. Традиційні українські техніки хлібопечення, зокрема приготування хліба на хмелевих заквасках, отримали ґрунтовне наукове висвітлення в сучасних міжнародних виданнях, що підкреслює їхню унікальність та важливість для європейської хлібної спадщини [16]. Таким чином, аналіз літературних джерел підтверджує, що закваска є не просто традиційним розпушувачем, а складним біотехнологічним інструментом [17-19].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на вагомі здобутки у дослідженні спонтанних заквасок на основі некласичної сировини, у цій галузі все ще спостерігається певний інформаційний вакуум. Багато процесів, що відбуваються на мікрорівні під час використання рідкісних видів борошна, досі не мають вичерпного наукового обґрунтування. Зокрема: відсутні системні дослідження, які б порівнювали

вплив чистого гречаного борошна та його комбінації із житнім борошном на метаболічну активність мікробіома закваски; не вивчено комбінований ефект додавання кураги (як природного джерела антиоксидантів та цукрів) на тлі різних типів борошна в контексті спонтанної ферментації; не досліджено можливий взаємний вплив між типом борошна та додаванням кураги, яка може посилювати функціональні властивості кінцевого продукту; відсутні роботи, в яких закваска на гречаному та гречано-житньому борошні з курагою розглядалася б як цілісний біотехнологічний інструмент молекулярної гастрономії для цілеспрямованого моделювання якості хліба.

Мета роботи. Наукове обґрунтування функціональних властивостей хлібних заквасок, отриманих шляхом спонтанного культивування асоційованої мікробіоти на гречаному та гречано-житньому борошні, з додаванням кураги та без неї, а також визначення оптимального складу борошняної суміші для випікання хліба**.** Дослідження спрямоване на оцінку потенціалу заквасок як біотехнологічного інструменту молекулярної гастрономії для цілеспрямованого моделювання текстурних, сенсорних та антиоксидантних властивостей хліба.

Виклад основного матеріалу. Реалізація поставлених завдань базувалася на комплексному аналітичному підході, де ключову роль відігравала варіативність вихідних компонентів. Експериментальна частина була вибудована навколо синергії рослинних інгредієнтів та їхнього впливу на ферментаційні процеси. Першим етапом став аналіз впливу сировинного базису (сорту борошна) у поєднанні з натуральним стимулятором бродіння – подрібненими абрикосами (курагою), що виступали додатковим джерелом цукрів та мікрофлори для закваски. Другий – охоплював пошук ідеальних пропорцій при створенні тіста, де основна пшенична матриця модифікувалася шляхом інтеграції гречаного складника.

Для виготовлення закваски використовували два варіанти борошна: чисто гречане та суміш гречаного з житнім у співвідношенні 1:1. Курагу, подрібнену блендером додавали у кількості 10 % від маси борошна, або не додавали зовсім. Для кожного варіанту закваски готували стартову суміш із відповідного борошна (або суміші борошна) та води кімнатної температури у співвідношенні 1:1 (за масою). Перший варіант: 50 г гречаного борошна, 60 мл води (гречане борошно вимагає дещо більше води); другий варіант: 50 г гречаного борошна, 60 мл води, 5 г подрібненої кураги; третій варіант: 25 г гречаного борошна, 25 г житнього борошна, 50 мл води; четвертий варіант: 25 г гречаного борошна, 25 г житнього борошна, 50 мл води, 5 г подрібненої кураги. У зразках, що передбачали добавку, лише один раз на початку етапу додавали подрібнену у блендері курагу. Суміш залишали за температури 25 °С для спонтанного бродіння. Через 48 годин проводили перше підживлення: видаляли половину маси, додавали свіжу порцію відповідного борошна (або суміші) та води (знову у співвідношенні 1:1). Процедуру підживлення повторювали щоденно протягом 5-7 діб до формування стабільного мікробного ценозу.

Для встановлення моменту завершення дозрівання ферментованої суміші орієнтувалися на сукупність органолептичних показників. Процес вважали завершеним, якщо спостерігалося інтенсивне газоутворення у вигляді дрібної пористості, суттєве зростання маси у просторі, а також поява специфічного гостро-свіжого аромату, притаманного молочнокислому бродінню. Таким чином, сформовано чотири дослідні зразки заквaски: Г – гречана закваска без кураги; Г + К – гречана закваска з додаванням кураги; ГЖ – гречано-житня закваска без кураги; ГЖ + К – гречано-житня закваска з додаванням кураги (рис. 1).



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Вигляд заквасок:
а – гречана; б – гречана з курагою; в – гречано-житня; г – гречано-житня з курагою.
Джерело: розроблено авторами.

Паралельно проводили дослідження оптимального складу борошняної суміші для випікання хліба. Було сформовано три дослідні зразки: у першому використано 20 % гречаного, 10 % пшеничного цільнозернового та 70 % пшеничного борошна вищого ґатунку; у другому – 15 % гречаного, 10 % пшеничного цільнозернового та 75 % пшеничного борошна вищого ґатунку; у третьому – 10 % гречаного, 10 % пшеничного цільнозернового та 80 % пшеничного борошна вищого ґатунку. До тіста додавали також дрібно нарізану курагу. Тісто для кожного зразка замішували за єдиною рецептурою: 500 г суміші борошна, 100 г готової закваски, 300 мл води та 10 г солі. Таким чином, було підготовлено чотири варіанти заквасок і три склади борошняної суміші для випікання хліба, що у сукупності забезпечило отримання 12 дослідних зразків.

Для дослідження органолептичних показників хліба враховували два чинники – склад борошняної суміші та тип закваски Органолептичні показники якості хліба визначали відповідно до ДСТУ 9188:2022 «Вироби хлібобулочні. Органолептичне оцінювання показників якості»**,** який регламентує оцінку зовнішнього вигляду, кольору скоринки, стану м’якушки, смаку та запаху. У табл. 1 наведено результати органолептичної оцінки дослідних зразків хліба, виготовлених на різних заквасках і з використанням різної кількості гречаного борошна. Оцінювання здійснювали за 5-бальною шкалою.

Таблиця 1 – Органолептичні показники хліба залежно від типу закваски та вмісту гречаного борошна

Назва досліду	Оцінка органолептичних показників якості хліба із гречаним борошном (бал)				
	Зовнішній вигляд	Колір скоринки	Стан м’якушки	Смак і запах	Загальна кількість балів
1	2	3	4	5	6
Дослід 1. Хліб із 20% гречаного борошна на гречаній заквасці	3,0	3,0	3,5	3,0	12,5
Дослід 2. Хліб із 20% гречаного борошна на гречаній заквасці з додаванням кураги	3,6	3,5	3,7	3,6	14,4
Дослід 3. Хліб із 20% гречаного борошна на гречано-житній заквасці	3,5	3,4	3,6	3,7	14,2
Дослід 4. Хліб із 20% гречаного борошна на гречано-житній заквасці з додаванням кураги	3,8	3,7	3,8	3,9	15,2
Дослід 5. Хліб із 15% гречаного борошна на гречаній заквасці	4,0	4,2	4,0	4,0	16,2
Дослід 6. Хліб із 15% гречаного борошна на гречаній заквасці з додаванням кураги	4,3	4,4	4,2	4,4	17,3
Дослід 7. Хліб із 15% гречаного борошна на гречано-житній заквасці	4,2	4,3	4,1	4,3	16,9

Закінчення таблиці 1

1	2	3	4	5	6
Дослід 8. Хліб із 15% гречаного борошна на гречано-житній заквасці з додаванням кураги	4,5	4,6	4,4	4,6	18,1
Дослід 9. Хліб із 10% гречаного борошна на гречаній заквасці	4,6	4,6	4,5	4,6	18,3
Дослід 10. Хліб із 10% гречаного борошна на гречаній заквасці з додаванням кураги	4,8	4,8	4,7	4,8	19,1
Дослід 11. Хліб із 10% гречаного борошна на гречано-житній заквасці	4,7	4,7	4,6	4,7	18,7
Дослід 12. Хліб із 10% гречаного борошна на гречано-житній заквасці з додаванням кураги	4,9	5,0	4,9	5,0	19,8

Джерело: розроблено авторами.

Результати показали, що кращі показники якості хліба отримано при складі тіста з 10 % гречаного борошна. Вироби мали правильну форму, рівномірно забарвлену скоринку, еластичний пористий м’якуш та гармонійний смак і запах. Збільшення частки гречаного борошна до 20 % знижувало органолептичну оцінку через менш виражений підйом тіста та щільніший м’якуш.

Тип закваски також мав суттєвий вплив на якість виробів. Хліб на гречаній заквасці (Г) характеризувався правильною формою та легким присмаком гречки, проте мав менш виражений підйом і щільніший м’якуш. Додавання кураги (Г + К) не лише посилювало ароматичний профіль, а й підвищувало загальні органолептичні показники порівняно з гречано-житньою закваскою без кураги, забезпечуючи більш гармонійний смак та еластичнішу структуру м’якушки. Гречано-житня закваска (ГЖ) сприяла стабільній формі виробів, рівномірному забарвленню скоринки та вираженому присмаку гречки з легкою кислинкою. Найкращі органолептичні показники отримано у варіанті гречано-житньої закваски з курагою (ГЖ + К) з 10 % гречаного борошна (19,8): вироби мали правильну форму, хрустку рівномірно забарвлену скоринку, пористий еластичний м’якуш із фруктовими включеннями та гармонійний смак із легкою кислинкою. На рис. 2 представлено зовнішній вигляд та зрізи хлібин, випечених на різних заквасках при складі тіста з 10 % гречаного борошна.



а *б* *в* *г*

Рис. 2. Зовнішній вигляд та зріз хлібин, випечених на різних заквасках: а – хліб на заквасці гречаній; б – хліб на заквасці гречаній з курагою; в – хліб на заквасці гречано-житній; г – хліб на заквасці гречано-житній з курагою

Джерело: розроблено авторами.

Для одержання більш комплексного результату органолептична оцінка була доповнена визначенням таких фізико-хімічних показників як: титрована кислотність, антиоксидантна активність, вологість хліба. Усі подальші дослідження проводили зі зразками хліба, випеченими з використанням борошняної суміші з 10 % вмістом гречаного борошна.

Титрована кислотність, визначена як кількість мілілітрів 0,1 М розчину натрію гідроксиду (NaOH), необхідна для нейтралізації кислот у 100 г продукту, є інтегральним показником накопичення органічних кислот у процесі бродіння та дозволяє оцінити активність молочнокислих бактерій, стабільність мікробного ценозу закваски, перебіг бродіння тіста та якість готового хліба (смак, стійкість до пліснявіння). Аналіз проводили для закваски, тіста та хліба відповідно до ДСТУ 4582:2006 «Хліб та хлібобулочні вироби». Додатково контролювали активну кислотність (pH – показник концентрації іонів водню у водній витяжці). Для закваски проби відбирали на момент її технологічної готовності (через 72 год культивування при 25 °С) окремо для кожного з чотирьох зразків: Г, Г+К, ГЖ, ГЖ+К. Наважку закваски масою 10,0 г змішували з 90 мл дистильованої води, ретельно перемішали, витримували 10 хв і фільтрували. У 10 мл фільтрату додавали 2-3 краплі 1 % спиртового розчину фенолфталеїну та титрували 0,1 М розчином натрію гідроксиду (NaOH) до появи стійкого слабко-рожевого забарвлення. ТК виражали в градусах за формулою ТК = V * 10, де V – об’єм титранту, мл. Для тіста зразки відбирали після 3 год бродіння (перед формування) та аналізували аналогічно. Для хліба м’якуш без скоринки подрібнювали, відбивали наважку 10,0 г через 2-4 год після випікання, готували водну витяжку та титрували за тією ж методикою. Усі вимірювання виконували в трьох повтореннях.

Проведені вимірювання дали змогу оцінити зміни кислотності закваски, тіста та хліба залежно від складу зразків. Отримані результати наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Титрована та активна кислотність (pH) закваски, тіста та хліба

Зразок	Закваска (ºН, pH)	Тісто (ºН, pH)	Хліб (ºН, pH)
Г	11,2 ± 0,8 (4,4 ± 0,1)	10,3 ± 0,7 (4,7 ± 0,1)	8,1 ± 0,6 (5,1 ± 0,1)
Г + К	14,1 ± 0,9 (4,1 ± 0,1)	13,2 ± 0,1 (4,4 ± 0,1)	10,4 ± 0,7 (4,8 ± 0,1)
ГЖ	13,3 ± 0,7 (4,2 ± 0,1)	11,4 ± 0,1 (4,5 ± 0,1)	9,2 ± 0,5 (4,9 ± 0,1)
ГЖ + К	16,2 ± 0,9 (3,9 ± 0,1)	15,1 ± 0,8 (4,2 ± 0,1)	12,3 ± 0,7 (4,6 ± 0,1)

Примітка. Результати наведено як середнє значення ± стандартне відхилення (n = 3). Статистичну обробку виконано методом ANOVA (p < 0,05).

Джерело: розроблено авторами.

Додавання кураги та використання гречано-житньої закваски підвищує титровану кислотність порівняно з контрольним зразком. Найвищі показники зафіксовано для гречано-пшеничного хліба на гречано-житній заквасці з курагою, що свідчить про активніший перебіг бродіння та стабільність мікробного ценозу.

Визначення антиоксидантної активності проводили методом DPPH (2,2-дифеніл-1-пікрилгідразил)**.** Метод ґрунтується на здатності сполук, екстрагованих зі зразків, нейтралізувати вільний радикал DPPH (2.2-дифеніл-1-пікрилгідразил – стабільний радикал, що використовується для оцінки антиоксидантної активності), що є показником функціональної цінності продукту. Аналіз проводили для закваски та готового хліба за міжнародним стандартом ISO 14502-1:2005. Зразки готували методом екстракції: 1,00 г подрібненого зразка (окремо для закваски та м’якушу хліба кожного з чотирьох варіантів) змішували з 10 мл 70 % метанолу, екстрагували на ультразвуковій бані 30 хв при кімнатній температурі та центрифугували (3000 об/хв, 10 хв). До 0,1 мл отриманого екстракту додавали 2,9 мл свіжоприготовленого 0,1 М розчину DPPH у метанолі, перемішували, витримували 30 хв у темряві, після чого вимірювали оптичну густину (А) зразка – абсорбція зразка та оптичну густину контрольного розчину при 517 нм. Антиоксиданту активність виражали у відсотках інгібування DPPH.

Результати визначення антиоксидантної активності висвітлені в табл. 3.

Таблиця 3 – Антиоксидантна активність закваски та хліба (інгібування DPPH, %,)

Зразок	Закваска	Хліб
Г	45,3 ± 3,2	35,1 ± 2,8
Г + К	59,8 ± 3,5	49,7 ± 3,0
ГЖ	53,2 ± 2,9	43,4 ± 2,7
ГЖ + К	69,6 ± 3,8	60,2 ± 3,4

Примітка: результати наведено як середнє значення ± стандартне відхилення (n = 3). Статистичну обробку виконано методом ANOVA (p < 0,05).

Джерело: розроблено авторами.

Включення кураги разом із застосуванням гречано-житньої закваски сприяє підвищенню антиоксидантної активності в порівнянні з контрольним зразком. Максимальні показники спостерігаються саме для гречано-житнього хліба з курагою, що свідчить про розширення оздоровчих характеристик продукту.

Вологість хліба визначали за ДСТУ 7045:2009 методом висушування до постійної маси. Для контрольного зразка (хліб, випечений на гречаній заквасці без кураги) вологість становила 40-45 %. Додавання кураги до закваски (зразок Г + К) підвищило вологість хліба до 45-50 %. Заміна у заквасці половини гречаного борошна на житнє (зразок ГЖ) підвищило вологість виробу до 42-47 %. Найвищу вологість (48-53 %) зафіксовано для хліба, виготовленого на гречано-житній заквасці з курагою.

Висновки. Результати дослідження підтверджують, що застосування закваски є ефективним біотехнологічним інструментом молекулярної гастрономії для цілеспрямованого моделювання сенсорних та функціональних властивостей хліба. Використання гречаного та гречано-житнього борошна забезпечує підвищену харчову цінність виробів завдяки вмісту поліфенольних сполук, білків і мінералів, а також сприяє стабільному розвитку мікробіоти. Додавання житнього борошна у співвідношенні 1:1 до гречаного створює сприятливі умови для активності молочнокислих бактерій і дріжджів, що забезпечує збалансоване формування кислотності та виражений ароматичний профіль.

Найкращим складом борошняної суміші для випікання хліба визначено поєднання пшеничного борошна вищого ґатунку (80 %), пшеничного цільнозернового (10 %) та гречаного (10 %), яке дозволяє отримати хліб з еластичною структурою м'якушки, гармонійним смаком і високим рівнем антиоксидантної активності. Додавання кураги додатково збагачує вироби фруктовими нотами та посилює їхні функціональні властивості.

Використання подрібненої кураги в рецептурному складі виступає не лише як інструмент смакової диверсифікації, а і як потужний чинник біологічної інтенсифікації продукту. Цей інгредієнт трансформує класичну зернову основу, додаючи їй нових функціональних властивостей.

Список використаних джерел

1. De Vuyst, L., Neysens, P. (2005). The sourdough microflora: biodiversity and metabolic interactions. *Trends in Food Science & Technology, 16(1–3)*, 43–56. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2004.02.012.

2. Corsetti, A., Settanni, L. (2007). Lactobacilli in sourdough fermentation. *Food Research International, 40(5),* 539–558. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2006.11.001.

3. Alkay, Z., Alkay, R., Dertli, E., Kökten, K., & Durak, M. Z. (2023). Rheological, textural and physicochemical properties of buckwheat sourdough bread prepared with different lactic acid bacteria strains. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences,* e5643. https://doi.org/10.55251/jmbfs.5643.

4. Moroni, A. V., Arendt, E. K., Dal Bello, F. (2011). Biodiversity of lactic acid bacteria and yeasts in spontaneously-fermented buckwheat and teff sourdoughs. *Food Microbiology*, 28(3), 497–502. https://doi.org/10.1016/j.fm.2010.10.016.

5. Moroni, A. V., Dal Bello, F., Zannini, E., Arendt, E. K. (2011). Impact of sourdough on buckwheat flour, batter and bread: Biochemical, rheological and textural insights. *Journal of Cereal Science*, 54(2), 195–202. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.04.008.

6. Axel, C., Brosnan, B., Zannini, E., et al. (2016). Antifungal activity of lactic acid bacteria and their metabolites against food spoilage fungi. *International Journal of Food Microbiology, 239,* 33–43. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.06.020.

7. Kasegn, M.M., Abrha, G.T., Weldemichael, M.Y. et al. (2024). Characterization of wild yeasts isolated from cereal sourdoughs and their potential for leavening wheat dough. *Discover Food, 4.* https://doi.org/10.1007/s44187-024-00072-0.

8. Dobre, A. A., Cucu, E. M., & Belc, N. (2024). Influence of technological parameters on sourdough starter obtained from different flours. *Applied Sciences*, *14*(11), 4955. https://doi.org/10.3390/app14114955.

9. Moroni, A. V., Zannini, E., Sensidoni, G., Arendt, E. K. (2012). Exploitation of buckwheat sourdough for the production of wheat bread. *European Food Research and Technology*, 235(4), 659–668. https://doi.org/10.1007/s00217-012-1790-z.

10. Савченко, О. М., & Калініченко, Ю. Д. (2019). Технологія виготовлення житньо-пшеничного хліба на заквасках із використанням базиліку. *Технічні науки та технології*, 4(18), 14–19.

11. Кухтин, М., Кравченюк, К., Сельський, В., Покотило, О., Вічко, О., Копчак, Н., & Хмеляр, А. (2022). Оцінка спонтанного бродіння з вмістом базиліка в технології виробництва житньо-пшеничного хліба. *Науковий вісник ЛНУ ветеринарної медицини та біотехнологій. Серія: Харчові технології*, *24* (97), 14-19. https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9703.

12. Zhou, X., Duan, M., Cui, L., Ouyang, B., Zhou, Y., & Li, Y. (2023). Fermentation characteristics of Tartary buckwheat sourdough by exogenous lactic acid bacteria and quality change of frozen dough bread. *Shipin Kexue (Food Science), 44*(12), 141–149. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20230286604.

13. Lorusso, A., Coda, R., Montemurro, M., & Rizzello, C. G. (2020). Use of selected lactic acid bacteria and quinoa flour for manufacturing novel foods rich in proteins and bioactive peptides. *Food Science and Technology International*, 26(4), 307–317. https://doi.org/10.1177/1082013219895357.

14. Nsogning, S. D., Fischer, S., & Becker, T. (2018). Investigating on the fermentation behavior of six lactic acid bacteria strains in barley malt wort reveals limitation in key amino acids and buffer capacity. *Food Microbiology*, *73*, 245–253. https://doi.org/10.1016/j.fm.2018.01.010.

15.Marco, M. L., Heeney, D., Binda, S., Cifelli, C. J., Cotter, P. D., Foligné, B., Gänzle, M., Kort, R., Pasin, G., Pihlanto, A., Smid, E. J., Hutkins, R., & Sanders, M. E. (2017). Health benefits of fermented foods: Microbiota and beyond. *Current Opinion in Biotechnology, 44*, 94–102. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.11.010.

16. Mykolenko, S., Lebedenko, T., & Ziubrovskyi, A. (2023). Traditional Ukrainian bread making. In M. Garcia-Vaquero, K. Pastor, G. E. Orhun, A. McElhatton, & J. M. F. Rocha (Eds.), *Traditional European breads* (pp. xx–xx). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-23352-4_18.

17. Gobbetti, M., Rizzello, C. G., Di Cagno, R., & De Angelis, M. (2014). How the sourdough may affect the functional features of leavened baked goods. *Food Microbiology*, *37*, 30–40. https://doi.org/10.1016/j.fm.2013.04.012.

18. Pétel, C., Onno, B., Prost, C. (2017). Sourdough volatile compounds and their contribution to bread quality. *Food Chemistry, 217*, 35-44. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.062.

19. Kocková, M., & Valík, Ľ. (2017). Properties of crackers with buckwheat sourdough. *Acta Chimica Slovaca*, *10*(2), 98–103. https://doi.org/10.1515/acs-2017-0025.

References

1. De Vuyst, L., Neysens, P. (2005). The sourdough microflora: biodiversity and metabolic interactions. *Trends in Food Science & Technology, 16(1–3)*, 43–56. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2004.02.012.

2. Corsetti, A., Settanni, L. (2007). Lactobacilli in sourdough fermentation. *Food Research International, 40(5),* 539–558. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2006.11.001.

3. Alkay, Z., Alkay, R., Dertli, E., Kökten, K., & Durak, M. Z. (2023). Rheological, textural and physicochemical properties of buckwheat sourdough bread prepared with different lactic acid bacteria strains. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences,* e5643. https://doi.org/10.55251/jmbfs.5643.

4. Moroni, A. V., Arendt, E. K., Dal Bello, F. (2011). Biodiversity of lactic acid bacteria and yeasts in spontaneously-fermented buckwheat and teff sourdoughs. *Food Microbiology*, 28(3), 497–502. https://doi.org/10.1016/j.fm.2010.10.016.

5. Moroni, A. V., Dal Bello, F., Zannini, E., Arendt, E. K. (2011). Impact of sourdough on buckwheat flour, batter and bread: Biochemical, rheological and textural insights. *Journal of Cereal Science*, 54(2), 195–202. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.04.008.

6. Axel, C., Brosnan, B., Zannini, E., et al. (2016). Antifungal activity of lactic acid bacteria and their metabolites against food spoilage fungi. *International Journal of Food Microbiology, 239,* 33–43. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.06.020.

7. Kasegn, M.M., Abrha, G.T., Weldemichael, M.Y. et al. (2024). Characterization of wild yeasts isolated from cereal sourdoughs and their potential for leavening wheat dough. *Discover Food, 4.* https://doi.org/10.1007/s44187-024-00072-0.

8. Dobre, A. A., Cucu, E. M., & Belc, N. (2024). Influence of technological parameters on sourdough starter obtained from different flours. *Applied Sciences*, *14*(11), 4955. https://doi.org/10.3390/app14114955.

9. Moroni, A. V., Zannini, E., Sensidoni, G., Arendt, E. K. (2012). Exploitation of buckwheat sourdough for the production of wheat bread. *European Food Research and Technology*, 235(4), 659–668. https://doi.org/10.1007/s00217-012-1790-z.

10. Savchenko, O. M., & Kalinichenko, Yu. D. (2019). Tekhnolohiia vyhotovlennia zhytnio-pshenychnoho khliba na zakvaskakh iz vykorystanniam bazyliku [Technology of rye-wheat bread production on sourdoughs with basil]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii Technical Sciences and Technologies*, 4(18), 14–19.

11. Kukhtyn, M., Kravcheniuk, K., Selskyi, V., Pokotylo, O., Vichko, O., Kopchak, N., & Khmeliar, A. (2022). Otsinka spontannoho brodinnia z vmistom bazylika v tekhnolohii vyrobnytstva zhytnio-pshenychnoho khliba [Evaluation of spontaneous fermentation with basil content in the technology of rye-wheat bread production]. *Naukovyi visnyk LNU veterynarnoi medytsyny ta biotekhnolohii. Seriia: Kharchovi tekhnolohii – Scientific Bulletin of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies*, *24*(97), 14–19. https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9703.

12. Zhou, X., Duan, M., Cui, L., Ouyang, B., Zhou, Y., & Li, Y. (2023). Fermentation characteristics of Tartary buckwheat sourdough by exogenous lactic acid bacteria and quality change of frozen dough bread. *Shipin Kexue (Food Science), 44*(12), 141–149. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20230286604.

13. Lorusso, A., Coda, R., Montemurro, M., & Rizzello, C. G. (2020). Use of selected lactic acid bacteria and quinoa flour for manufacturing novel foods rich in proteins and bioactive peptides. *Food Science and Technology International*, 26(4), 307–317. https://doi.org/10.1177/1082013219895357.

14. Nsogning, S. D., Fischer, S., & Becker, T. (2018). Investigating on the fermentation behavior of six lactic acid bacteria strains in barley malt wort reveals limitation in key amino acids and buffer capacity. *Food Microbiology, 73,* 245–253. https://doi.org/10.1016/j.fm.2018.01.010.

15.Marco, M. L., Heeney, D., Binda, S., Cifelli, C. J., Cotter, P. D., Foligné, B., Gänzle, M., Kort, R., Pasin, G., Pihlanto, A., Smid, E. J., Hutkins, R., & Sanders, M. E. (2017). Health benefits of fermented foods: Microbiota and beyond. *Current Opinion in Biotechnology, 44*, 94–102. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.11.010.

16. Mykolenko, S., Lebedenko, T., & Ziubrovskyi, A. (2023). Traditional Ukrainian bread making. In M. Garcia-Vaquero, K. Pastor, G. E. Orhun, A. McElhatton, & J. M. F. Rocha (Eds.), *Traditional European breads* (pp. xx–xx). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-23352-4_18.

17. Gobbetti, M., Rizzello, C. G., Di Cagno, R., & De Angelis, M. (2014). How the sourdough may affect the functional features of leavened baked goods. *Food Microbiology, 37*, 30–40. https://doi.org/10.1016/j.fm.2013.04.012.

18. Pétel, C., Onno, B., Prost, C. (2017). Sourdough volatile compounds and their contribution to bread quality. *Food Chemistry, 217*, 35-44. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.062.

19. Kocková, M., & Valík, Ľ. (2017). Properties of crackers with buckwheat sourdough. *Acta Chimica Slovaca, 10*(2), 98–103. https://doi.org/10.1515/acs-2017-0025.

Дата першого надходження статті до видання: 07.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.03.2026

УДК 664.6:579.864:615.3

Myroslav Bomba[1], Larysa Fedyna[2], Olexandra Maxymets[3], Yuriy Maksymets[4]

[1]Doctor of Sciences, Agricultural, Professor of the Department of Hotel and Restaurant Business and Food Technology
Ivan Franko Lviv National University (Lviv, Ukraine)
E-mail: mirbomba55@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7865-2111
ResearcherID: PLS-3672-2026. **Scopus Author ID:** 58317716100

[2]PhD in Chemistry, Associate Professor of the Department of Hotel and Restaurant Business and Food Technology
Ivan Franko Lviv National University (Lviv, Ukraine)
E-mail: lofedyna@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-6597-674X
ResearcherID: M-2846-2018. **Scopus Author ID:** 8574229000

[3]Senior Teacher of the Department of Hotel and Restaurant Business and Food Technology
Ivan Franko Lviv National University (Lviv, Ukraine)
E-mail: maxymezl@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0008-5302-3050

[4]PhD in Economics, Associate Professor of the Department of Enterprise Economics
Ivan Franko Lviv National University (Lviv, Ukraine)
E-mail: maxymezj@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-9693-4147

SOURDOUGH AS A BIOTECHNOLOGICAL TOOL IN MOLECULAR GASTRONOMY

The study considers sourdough as a biotechnological tool of molecular gastronomy. The influence of the type of flour used for sourdough cultivation (buckwheat and buckwheat–rye mixture) as well as the addition of dried apricots was investigated in relation to the formation of organoleptic and physicochemical properties of bread. Four sourdough variants were prepared: buckwheat without apricots, buckwheat with apricots, buckwheat–rye without apricots, and buckwheat–rye with apricots. The technological process was standardized, and bread quality was assessed using sensory evaluation and physicochemical indicators. The results demonstrated that the optimal flour composition for bread baking is a mixture of 80% refined wheat flour, 10% whole-grain wheat flour, and 10% buckwheat flour. This formulation ensures proper loaf shape, evenly colored crust, elastic porous crumb, and balanced taste. The addition of dried apricots improved the aromatic profile by introducing pleasant fruity notes, while also increasing titratable acidity and antioxidant activity. The highest acidity values were observed in buckwheat–rye sourdough with apricots, indicating more active fermentation and greater microbial stability. Organoleptic evaluation confirmed that bread with 15% buckwheat flour achieved the best quality scores compared to samples with higher buckwheat content, which resulted in denser crumb and weaker dough rise. Physicochemical analysis supported these findings, showing that sourdough fermentation contributes to enhanced texture, prolonged freshness, and improved nutritional value. The study highlights the potential of sourdough as a controllable biotechnological instrument in molecular gastronomy. By combining traditional fermentation techniques with functional ingredients such as buckwheat flour and dried apricots, it is possible to design bread with improved sensory properties, higher biological value, and health-promoting effects. These findings correspond to modern trends in healthy nutrition and the development of "clean label" bakery products.

Keywords: *sourdough; buckwheat flour; wheat flour; dried apricots; lactic acid bacteria; bread; molecular gastronomy.*
Fig.: 2. References: 19.

Бомба М. Я., Федина Л. О., Максимець О. Б., Максимець Ю. В. Закваска як біотехнологічний інструмент молекулярної гастрономії. *Технічні науки та технології*, 2026. № 2(44). С. 324-334. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-324-334.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-335-344
УДК 67-036

Тетяна Ернстівна Римар[1], Сергій Олександрович Войтюк[2]

[1]доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімічної інженерії та екології
Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (Київ, Україна)
E-mail: rymartatyana1975@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-9724-8640
Scopus Author ID: 6508270257

[2]аспірант кафедри хімічної інженерії та екології
Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (Київ, Україна)
E-mail: serhii.voytyuk@tana.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МІКРОСФЕР, ЩО ТЕРМОРОЗШИРЮЮТЬСЯ, НА ВЛАСТИВОСТІ ТЕРМОЕЛАСТОПЛАСТІВ НА ОСНОВІ СТИРОЛ-БУТАДІЄН-СТИРОЛЬНИХ КАУЧУКІВ

У роботі проводилось дослідження впливу мікросфер, що терморозширюються, на основні властивості стирол-бутадієн-стирольних (СБС) компаундів, призначених для виготовлення підошви взуття. Було встановлено, що ведення у СБС компаунди терморозширюваних мікросфер вводить газову фазу, яка має значно нижчий модуль та густину, створює пористу, легку структуру, знижує безперервність полімерної матриці, послаблює міжмолекулярні взаємодії завдяки зменшенню контактної площі між макромолекулами. Такі структурні зміни обумовлюють зменшення густини, плинності розплаву, твердості, абразивності та модуля еластичності СБС компаунду. Завдяки контрольованому ступеню розширення мікросфер можна цілеспрямовано впливати на макромолекулярну організацію СБС компаунду.

Ключові слова: *термоеластопласт; стирол-бутадієн-стирольний компаунд; підошва для взуття; спінювання; мікросфери; властивості.*

Рис.: 1. Табл.: 1. Бібл.: 20.

Актуальність теми дослідження. Композиції термопластичних еластомерів (ТПЕ) на основі стирол-бутадієн стиролу (СБС), етиленвінілацетану (ЕВА), термопластичного поліуретану (ТПУ) та поліолефінів широко застосовуються вже багато років, і в галузі накопичено значний досвід створення рецептур із заданими експлуатаційними характеристиками: від м'яких, амортизуючих матеріалів для спортивного взуття до більш твердих та зносостійких складів для повсякденних підошов [1-3]. Проте розвиток взуттєвої індустрії, зростаючі вимоги до ергономіки, довговічності, екологічності та технологічності матеріалів роблять удосконалення таких композицій актуальним завданням. Серед ключових напрямів поліпшень – зниження щільності при збереженні міцності, підвищення стійкості до гідролізу та УФ-випромінювання, поліпшення адгезії до інших матеріалів верху, розширення стабільності кольорів і підвищення перероблюваності з метою стійкого виробництва.

ТПЕ поєднують еластичність каучуку (високі оборотні деформації, пружність, морозостійкість) із термопластичністю полімерів, що проявляється у високій плинності розплаву та можливості переробки литтям під тиском. Завдяки цьому матеріал дозволяє формувати складні геометрії, рельєфні протектори та різні варіанти жорсткості в межах одного виробу.

Підошви з термоеластопласту легко згинаються, швидко відновлюють первісну форму та не обмежують природну біомеханіку стопи. Це позитивно впливає на загальну ергономіку взуття, покращує амортизацію, зменшує ударні навантаження на суглоби та сприяє комфортному пересуванню по різних типах поверхонь - від асфальту до ґрунту чи засніжених ділянок [4].

Постановка проблеми. ТПЕ-підошва є інтегральною структурою, у якій зовнішні шари формуються як монолітні, щільні та зносостійкі, тоді як внутрішні шари мають пористу, комірчасту будову. Така структура забезпечує оптимальне поєднання міцності, амортизації та зниженої ваги. Пористий внутрішній об’єм зменшує масу виробу й підвищує комфорт під час тривалих навантажень, тоді як монолітна поверхня забезпечує ста-

© Т. Е. Римар, С. О. Войтюк, 2026

більність, механічну стійкість і характерні експлуатаційні властивості. При цьому формування рівномірної дрібнокомірчастої структури з контрольованою пористістю, зниження густини без втрати міцності, покращення пружних і амортизаційних властивостей, забезпечення чистоти та стабільності технологічного процесу, а також підвищення теплоізоляційних характеристик і стабільності розмірів виробів є ключовими вимогами до створення стабільного внутрішнього пористого шару підошви взуття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Композиції термопластичних еластомерів засновані на матеріалах, які при кімнатній температурі виявляють пружні властивості, характерні для еластомерних каучуків, а при нагріванні переходять у пластично-в'язкий стан, що дозволяє переробляти їх стандартними методами термопластів – литтям під тиском, екструзією. Така подвійність поведінки обумовлена наявністю у їхній структурі фізично зшитих доменів, які виконують роль оборотних «вузлів сітки». Завдяки цьому ТПЕ поєднують м'якість, еластичність та гарне відновлення форми з технологічністю термопластичних матеріалів. На вигляд і за тактильним відчуттям вони схожі з вулканізованою гумою, проте не вимагають стадій хімічної вулканізації і можуть багаторазово перероблятися без істотної втрати властивостей [5-6].

У виробництві взуття найбільшого поширення набули стирольні блок-сополімери – насамперед кополімери стиролу-бутадієну-стиролу та стиролу-етилену/бутилену-стиролу (СЕБС). Ці матеріали мають гарну гнучкість, амортизаційні властивості, зносостійкість і можливість регулювати жорсткість композиції у широких межах шляхом зміни співвідношення полістирольних і еластомерних блоків. На базі СБС можна формувати м'які, високоеластичні підошви, тоді як СЕБС забезпечує підвищену термостійкість та покращену стійкість до старіння [7-9].

Композиції ТПЕ, що застосовуються у взуттєвій промисловості, переважно є багатокомпонентними системами. До їхнього складу можуть входити:

• СБС або СЕБС як основний еластомірний компонент;

• термопластичний поліуретан (ТПУ) для підвищення механічної міцності, зносостійкості, стійкості до олій та абразивного зносу;

• етиленвінілацетат (ЕВА) для покращення пружності, зниження щільності та підвищення легкості матеріалу;

• пластифікуючі олії (парафінові, нафтенові), що регулюють гнучкість та твердість;

• поліолефіни (ПП, ПЕ) для підвищення жорсткості, термостійкості та стабілізації структури;

• мінеральні наповнювачі – тальк, каолін, карбонат кальцію, які покращують технологічність, регулюють в'язкість розплаву, підвищують твердість та знижують собівартість;

• антиоксиданти та УФ-стабілізатори для уповільнення старіння;

• пігменти та добавки, що забезпечують необхідні декоративні параметри та стійкість кольору [10-11].

Однією з ключових переваг ТПЕ є високий коефіцієнт тертя та надійне зчеплення з різними покриттями: мокрою дорогою, льодом, снігом, гладким асфальтом. Це значно зменшує ризик ковзання та отримання травм, особливо в зимовий сезон. Властивість утворювати міцний контакт із поверхнею зберігається навіть при сильній ожеледиці, що робить підошви з ТПЕ популярними для зимового та демісезонного взуття.

Матеріал має високу зносостійкість, що визначається композиційним складом: синтетичні каучуки забезпечують еластичність і міцність, а поліолефіни, спеціальні модифікатори та стабілізатори – стійкість до стирання, розриву та довготривалих циклічних навантажень. Завдяки цьому взуття на ТПЕ-підошві може служити кілька сезонів навіть

при інтенсивній експлуатації. Додатково матеріал стійкий до дії солей, реагентів і побутових хімікатів, що є особливо важливим у зимовий період, коли дорожні покриття обробляють антиожеледними складами.

ТПЕ-підошви демонструють виняткову морозостійкість до -45 °С, без розтріскування та втрати цілісності. В основі морозостійких композицій зазвичай переважає стирольний каучук, який підвищує міцність, еластичність і стабільність структури при низьких температурах. Завдяки мінеральним наповнювачам і стабілізаторам підошва не стає крихкою, зберігає гнучкість та добре переносить перепади температур. У теплу пору матеріал також поводить себе стабільно, жаростійкість до +50 °С дозволяє уникати деформацій чи розшарування при нагріванні.

Важливою характеристикою ТПЕ є низька теплопровідність, що сприяє збереженню тепла всередині взуття. Пориста структура внутрішнього шару зменшує втрати тепла та запобігає промерзанню стопи, а щільний зовнішній шар забезпечує водостійкість, тому ноги не намокають при контакті зі снігом чи вологою поверхнею.

Крім функціональних властивостей, ТПЕ має й екологічні переваги: матеріал придатний до вторинної переробки. Виробничі відходи та зношені деталі підошви можуть бути подрібнені та використані повторно, що знижує обсяг полімерних відходів і сприяє ефективнішому використанню ресурсів.

Таким чином, ТПЕ-підошви поєднують легкість, міцність, ергономічність, довговічність і безпеку, що робить їх одним із найпоширеніших та найефективніших матеріалів для сучасного взуття різного призначення.

Для створення пористої структури ТПЕ-підошви зазвичай використовують процес спінювання. Спінювання термоеластопластів є процесом введення газової фази в полімерну матрицю з формуванням пористої, комірчастої структури. Газові порожнини, що утворюються, зменшують щільність матеріалу, покращують амортизаційні властивості, підвищують гнучкість, а також дозволяють оптимізувати масогабаритні характеристики готового виробу [12].

Розрізняють хімічне і фізичне спінювання.

Хімічне спінювання засноване на використанні спеціальних добавок - хімічних агентів, що спінюють (ХСА), які при нагріванні розкладаються з виділенням газів, найчастіше азоту, вуглекислого газу або їхні суміші [13-14].

Найбільш поширені типи ХСА:

Азодикарбонамід: дає високий ступінь спінювання, підходить для ТПЕ на основі СБС, СЕБС та поліолефінів.

Гідразидні агенти: утворюють більш контрольовану пористість та менші осередки.

Бікарбонатні системи: використовуються для м'яких спінених матеріалів з невисокими температурами обробки.

При фізичному спінюванні газ безпосередньо вводиться у розплав ТПЕ без застосування хімічних добавок. Найчастіше використовуються азот, вуглекислий газ або їх суміші, що під тиском вводяться через спеціальні інжекційні системи [15-16]. Фізичне спінювання дає регулярну, дрібнокомірчасту піну з рівномірним розподілом розмірів пор та підвищену чистоту матеріалу, оскільки відсутні продукти розкладання ХСА.

Одним із найбільш перспективних напрямків такого спінювання є спінювання ТПЕ за допомогою терморозширюваних мікросфер. Такий спосіб є одним із найефективніших та технологічно зручних способів створення легкої, пружної та стабільної пористої структури [17-18].

Мікросфери являють собою дрібні полімерні капсули, заповнені низькокиплячим газом або рідиною. Під час нагрівання оболонка розм'якшується, а внутрішній агент розширюється, збільшуючи об'єм мікросфер у 20–50 разів і формуючи рівномірну систему закритих пор.

Переваги використання терморозширюваних мікросфер у спіненні термопластичних еластомерів полягають у забезпеченні контрольованої та рівномірної пористої структури матеріалу. Завдяки їх застосуванню формується дрібнокомірчаста, однорідна структура без утворення великих пор і неконтрольованих газових каналів, що часто спостерігається при використанні традиційних хімічних спінювачів. Ступінь спінення легко регулюється шляхом підбору типу мікросфер та їх концентрації в композиції.

Використання мікросфер дозволяє знизити густину матеріалу без суттєвої втрати його механічних властивостей. Утворення системи закритих пор сприяє зменшенню маси виробів, а міцна оболонка мікросфер забезпечує збереження цілісності пор під навантаженням, що позитивно впливає на міцність і стабільність геометричних параметрів.

Крім того, спінені термопластичні еластомери з мікросферами характеризуються покращеними амортизаційними та пружними властивостями. Вони ефективніше поглинають удари та вібрації і демонструють високу здатність до відновлення форми після деформації, що є важливим для виробів, які працюють в умовах динамічних навантажень, зокрема у взуттєвій промисловості.

Важливою перевагою є також чистота та технологічна стабільність процесу спінення. На відміну від хімічних газоутворювачів, терморозширювані мікросфери не виділяють продуктів розкладу, що спрощує контроль технологічних параметрів і виключає утворення побічних речовин, запахів або забруднення обладнання.

Додатково, застосування мікросфер покращує теплоізоляційні властивості матеріалу завдяки наявності закритої пористої структури, яка знижує теплопровідність. Це дозволяє ефективніше зберігати тепло у виробах.

Також такі матеріали характеризуються підвищеною стабільністю розмірів і форми. Пори формуються всередині мікрокапсул і мають чітко обмежені розміри, що запобігає вторинному розширенню, усадці або деформаціям у процесі експлуатації. Спінений шар не провалюється, не «здувається» і не проявляє усадки з часом.

Мікросфери легко інтегруються у процеси лиття під тиском, екструзії, каландрування. Не потребують спеціального обладнання, лише коригування температурних режимів. Менший тиск, потрібний для формування, знижує навантаження на пресформи та обладнання [19-20].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що використання терморозширюваних мікросфер у спіненні ТПЕ дає можливість отримати легкий, пружний, міцний та еластичний матеріал з високою стабільністю розмірів і чудовими амортизаційними властивостями. Це сучасний, чистий і контрольований метод модифікації, який значно розширює функціональні можливості ТПЕ у взуттєвій, спортивній, ізоляційній та інших галузях.

Таким чином, **метою роботи** є дослідження впливу мікросфер, що терморозширюються, на основні властивості стирол-бутадієн стирольних компаундів, призначених для виготовлення підошви взуття.

Викладення основного матеріалу. В роботі було проведено дослідження фізико-механічних властивостей компаундів на основі стирол-бутадієн-стирольних каучуків і полімерних мікросфер Expancel шведської компанії Akzo Nobel.

На підставі попередньо проведених досліджень та з урахуванням вимог до даного типу продукції, були складені рецептури компаундів для виготовлення взуттєвої підошви, які наведені в табл. 1. Рецептура складена на 100 мас. ч основного компоненту (СБС каучуку).

Таблиця 1 – Рецептури стирол-бутадієн-стирольних компаундів

Склад компаундів	Кількість компонента, мас. ч
СБС (Стирол-бутадієн-стирол)	100
Парафінова олива	85
Полістрол HIPS Edistir R 321P	30
Карбонат кальцію оброблений	21
Спінюючий агент (мікросфери Expancel)	4 ÷ 8

Джерело: розроблено авторами.

Для виготовлення компаундів була використана лінія на базі двошнекового екструдера компанії «Деліте» КНР, з співвідношенням довжини до діаметру L/D=48, та лінія на базі одношнекового екструдера компанії «Деліте» КНР, L/D=28.

Компаунди готували при температурі 90 °С у міксері протягом 45 хв. Екструзія проводилась при температурі розплаву яка не перевищує 130 °С, та частоті обертання шнеків 200-300 об/хв. Для кожного вмісту мікросфер було проведено по п’ять паралельних дослідів. При цьому склад компаунду залишався незмінним, варіювали лише кількість введених мікросфер. Були визначені наступні показники компаундів:

Середня густина, ISO 2781, g/cm^3;

Твердість, ISO 868, Шор А;

Показник плинності розплаву, 230°С/2,16 кг, ISO 1133, g/10хв;

Модуль еластичності при 100 %, MPa, ISO 37;

Модуль еластичності при 300 %, MPa, ISO 37;

Абразивність, DIN 53516, мм^3.

На рис. 1 наведено вплив різної кількості спінюючого агенту на властивості компаундів.

Збільшення вмісту терморозширюваних мікросфер у стирол-бутадієн-стирольному компаунді призводить до системних змін його структури та властивостей. Основна причина - формування розгалуженої пористої мікроструктури, яка змінює механіку деформації та реологічну поведінку матеріалу.

Терморозширювані мікросфери складаються з тонкої полімерної оболонки, всередині якої міститься леткий агент. Під час нагріву оболонка роздувається, утворюючи порожнини із газовим наповненням. Як наслідок, частка газооповнених пор у структурі збільшується, а частка твердої фази зменшується, відповідно середня густина падає.

Падіння показника плинності розплаву (ППР) означає зростання в’язкості. Оскільки мікросфери діють як твердий наповнювач, то це перешкоджає течії розплаву. При розширенні мікросфер збільшується їхній об’єм, а множинні мікропорожнини та високий ступінь дисперсності погіршують текучість. Через зростання міжфазної поверхні СБС - мікросфера відбувається додаткове тертя, що спричиняє енергетичні втрати під час течії, розплав стає більш структурованим і менш мобільним.

Розширені мікросфери діють як мікропористий модифікатор, що підвищує “компресійність” матеріалу. Збільшення кількості газових пор призводить до зниження опору локальному втискуванню. Фактично, твердість зменшується через перехід до більш м’якої, пористої структури. Пориста структура є менш жорсткою і легше деформується, оскільки оболонки мікросфер деформуються під навантаженням, поглинаючи частину енергії, а ефективна площа передачі навантаження між ланцюгами полімеру зменшується. Матеріал стає м’якшим і більш компресійно податливим.

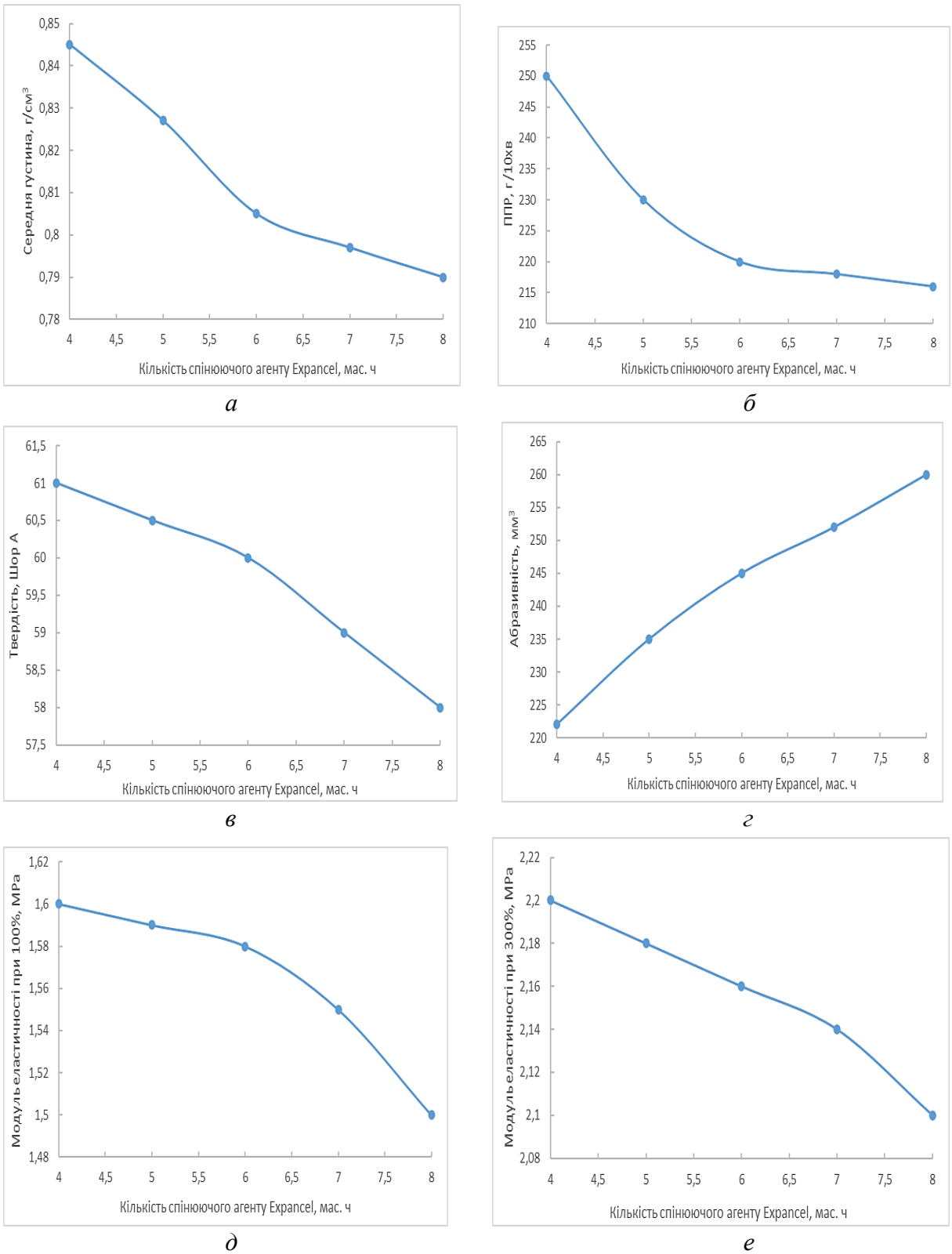


Рис. 1. Вплив кількості спінюючого агенту на властивості стирол-бутадієн-стирольних компаундів

При збільшенні кількості мікросфер відбувається зменшення абразивності, тобто зниження стирання, матеріал стає менш зносостійким, оскільки пориста структура слабше чинить опір механічному руйнуванню. Локальні порожнини є точками концентрації напружень, в наслідок чого, відбувається легше відривання фрагментів під час тертя. Мікросфери самі по собі не є жорсткими, на відміну від мінеральних наповнювачів, які підвищують абразивність. Підвищення вмісту мікросфер зменшує механічну міцність компаунду, оскільки пори є концентраторами напружень, що прискорює руйнування поверхні, відповідно зменшується кількість безперервної полімерної фази, яка відповідальна за опір розриву та стиранню. Оболонки мікросфер можуть також локально руйнуватися, спричиняючи мікрокришіння поверхні, це робить матеріал менш стійким до стирання.

Модуль еластичності характеризує жорсткість матеріалу під малими деформаціями. Зростання кількості мікросфер призводить до зменшення частки твердого полімеру, що несе основне навантаження та до формування "газонаповненої матриці", яка має нижчий модуль пружності. Наявність газових пор призводить до значного зменшення ефективної жорсткості композиту. Розширені мікросфери працюють як м'які пружні включення, що підвищують компресійність. Зниження ступеня контакту між полімерними доменами (СБС має мікрофазову структуру) призводить до менших можливостей переносити навантаження. Як наслідок, матеріал переходить до режиму м'якшої, менш жорсткої, амортизуючої структури.

Оптимальним вмістом мікросфер, які забезпечують весь комплекс необхідних властивостей, що висуваються до матеріалів для взуттєвої підошви є 5 мас.ч. Введення у СБС-компаунди такої кількості терморозширюваних мікросфер вводить необхідну кількість газової фази, яка створює пористу, легку структуру і, водночас, надає матеріалу підвищені амортизуючі властивості і зносостійкість.

З подальшим підвищенням вмісту терморозширюваних мікросфер кількість газової фази, яка має значно нижчий модуль та густину, занадто підвищується, що знижує безперервність полімерної матриці, послаблює міжмолекулярні взаємодії завдяки зменшенню контактної площі між макромолекулами. Такі структурні зміни обумовлюють надмірне зменшення густини, плинності розплаву, твердості, абразивності та модуля еластичності СБС-компаунду.

Висновки. Таким чином, терморозширювані мікросфери дають можливість тонко та цілеспрямовано регулювати властивості СБС компаундів у надзвичайно широкому діапазоні - від щільних, структурно монолітних еластомерів до ультралегких, високоамортизаційних піноматеріалів із керованою пористістю. Така універсальність зумовлена унікальною природою мікросфер як мікророзмірних газонаповнених включень, що здатні змінювати свій об'єм у десятки разів та формувати стабільну мікроклітинну структуру. Завдяки контрольованому ступеню розширення мікросфер можна цілеспрямовано впливати на макромолекулярну організацію СБС, перерозподіл напружень усередині матеріалу та ефективну тривимірну морфологію полімерної матриці.

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

Під час написання цього матеріалу автори використовували ChatGPT для пошуку та аналізу публікацій за напрямком дослідження. Після використання цього сервісу автори переглянули та відредагували зміст і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Brückner K., Odenwald S., Schwanitz S., Heidenfelder J., Milani T. (2010). Polyurethane-foam midsoles in running shoes – Impact energy and damping. *Procedia Engineering*, 2, 2789–2793. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.04.067.

2. Maiti M., Jasra R. V., Kusum S. K., Chaki T. K. (2012). Microcellular foam from ethylene vinyl acetate/polybutadiene rubber (EVA/BR) based thermoplastic elastomers for footwear applications. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51, 10607–10612. https://doi.org/10.1021/ie300396m.

3. Wang L., Hong Y., Li J. X. (2012). Durability of running shoes with ethylene vinyl acetate or polyurethane midsoles. *Journal of Sports Sciences*, 30, 1787–1792. https://doi.org/10.1080/02640414.2012.723819.

4. Shariatmadari, M. R., English, R., Rothwell, G. (2012). Effects of temperature on the material characteristics of midsole and insole footwear foams subject to quasi-static compressive and shear force loading. *Materials and Design,* 37, 543–559.

5. Paukkunen J. (2012). *Foaming of thermoplastic elastomers. Master of Science Thesis.* Tampere University of Technology. Tampere.

6. Krasnov, K. V., Chalaya, N. M., Osipchik, V. S. (2018). The modification of blend composites based on thermoplastic elastomers. *Int Polym Sci Technol*., 43(9), 43–6.

7. Batistini, A., & Perozzi, G. (2009). *Thermoplastic compositions for footwear with no marking characteristics* (WO 2009/071549 A1). World Intellectual Property Organization.

8. Zhang Z. X., Dai X. R., Zou L., Wen S. B., Sinha T. K., Li H. (2019). A developed, eco-friendly, and flexible thermoplastic elastomeric foam from SEBS for footwear application. *eXPRESS Polymer Letters*, 13(11), 948–958. https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2019.83.

9. Whelan, D. (2017). Thermoplastic elastomers. In *Brydson's plastics materials* (pp. 653–703). Elsevier.

10. Medienta-Garcia M.B., Paramo-Garcia U., Díaz-Zavala N.P., Robledo-Muniz J.G., Rivera-Armenta J.L. (2013). Thermal morphological evaluation of linear and radial SEBS-polypropylene blends. *Polímeros*, 23(5), 597-603.

11. Tigemann H.M., Tomacheski D., Celso F., Ribeiro V.F., Nachtigall S-M.B. (2013). Use of wollastonite in a thermoplastic elastomer composition. *Polym. Test*., 32, 1373-1379.

12. Awasthi P., Aiswarya S., Banerjee S.-S. (2023). Thermoplastic Elastomeric Foams: Challenges, Opportunities and New Approaches. *Polymeric Foams: Fundamentals and Types of Foams,* 1(5), 91-119. https://doi.org/10.1021/bk-2023-1439.ch005.

13. Haowang, F. (2018). *TPE (thermoplastic elastomer) foamed master batch and preparation method thereof* (CN105694484A). Material Technology Co. Ltd.

14. Jin F.-L., Zhao M., Park M., Park S.-J. (2019). Recent Trends of Foaming in Polymer Processing: A Review. *Polymers*, 11(6), 953. https://doi.org/10.3390/polym11060953.

15. Cooper A. I. (2003). Porous materials and supercritical fluids. *Advanced Materials*, 15, 1049–1059. https://doi.org/10.1002/adma.200300380.

16. Primel A., Férec J., Ausias G., Tirel Y., Veillé J-M., Grohens Y. (2017). Solubility and interfacial tension of thermoplastic polyurethane melt in supercritical carbon dioxide and nitrogen. *The Journal of Supercritical Fluids*, 122, 52–57.

17. Kıroğlu C., Kızılcan N. (2021). Production and characterization of thermoplastic elastomer foams based on the styrene–ethylene–butylene–styrene (SEBS) rubber and thermoplastic material. *Open Chemistry*, 19, 929–937. https://doi.org/10.1515/chem-2021-0084.

18. Baek, K. H., Jung, B. J., & Ju, J. K. (2013). *Thermally-expandable microspheres having good foaming characteristics and uniform microsphere diameter and methods of preparing the same* (EP2327475A2). European Patent Office.

19. Versatile Expandable Microspheres China. (n.d.). *NJCHM*. https://www.njchm.com/versatile-expandable-microspheres-china.html?utm_source=chatgpt.com.

20. Zhang J., Yan T., Zhang H., Fang Y., Huang Y., Tang J., He M. (2022). Thermally expandable microspheres with excellent high-temperature expansion property. *Express Polymer Letters,* 16(7), 760–771. https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2022.55.

References

1. Brückner K., Odenwald S., Schwanitz S., Heidenfelder J., Milani T. (2010). Polyurethane-foam midsoles in running shoes – Impact energy and damping. *Procedia Engineering*, 2, 2789–2793. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.04.067.

2. Maiti M., Jasra R. V., Kusum S. K., Chaki T. K. (2012). Microcellular foam from ethylene vinyl acetate/polybutadiene rubber (EVA/BR) based thermoplastic elastomers for footwear applications. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51, 10607–10612. https://doi.org/10.1021/ie300396m.

3. Wang L., Hong Y., Li J. X. (2012). Durability of running shoes with ethylene vinyl acetate or polyurethane midsoles. *Journal of Sports Sciences*, 30, 1787–1792. https://doi.org/10.1080/02640414.2012.723819.

4. Shariatmadari, M. R., English, R., Rothwell, G. (2012). Effects of temperature on the material characteristics of midsole and insole footwear foams subject to quasi-static compressive and shear force loading. *Materials and Design*, 37, 543–559.

5. Paukkunen J. (2012). *Foaming of thermoplastic elastomers. Master of Science Thesis.* Tampere University of Technology. Tampere.

6. Krasnov, K. V., Chalaya, N. M., Osipchik, V. S. (2018). The modification of blend composites based on thermoplastic elastomers. *Int Polym Sci Technol*., 43(9), 43–6.

7. Batistini, A., & Perozzi, G. (2009). *Thermoplastic compositions for footwear with no marking characteristics* (WO 2009/071549 A1). World Intellectual Property Organization.

8. Zhang Z. X., Dai X. R., Zou L., Wen S. B., Sinha T. K., Li H. (2019). A developed, eco-friendly, and flexible thermoplastic elastomeric foam from SEBS for footwear application. *eXPRESS Polymer Letters*, 13(11), 948–958. https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2019.83.

9. Whelan, D. (2017). Thermoplastic elastomers. In *Brydson's plastics materials* (pp. 653–703). Elsevier.

10. Medienta-Garcia M.B., Paramo-Garcia U., Díaz-Zavala N.P., Robledo-Muniz J.G., Rivera-Armenta J.L. (2013). Thermal morphological evaluation of linear and radial SEBS-polypropylene blends. *Polímeros*, 23(5), 597-603.

11. Tigemann H.M., Tomacheski D., Celso F., Ribeiro V.F., Nachtigall S-M.B. (2013). Use of wollastonite in a thermoplastic elastomer composition. *Polym. Test*., 32, 1373-1379.

12. Awasthi P., Aiswarya S., Banerjee S.-S. (2023). Thermoplastic Elastomeric Foams: Challenges, Opportunities and New Approaches. *Polymeric Foams: Fundamentals and Types of Foams,* 1(5), 91-119. https://doi.org/10.1021/bk-2023-1439.ch005.

13. Haowang, F. (2018). *TPE (thermoplastic elastomer) foamed master batch and preparation method thereof* (CN105694484A). Material Technology Co. Ltd.

14. Jin F.-L., Zhao M., Park M., Park S.-J. (2019). Recent Trends of Foaming in Polymer Processing: A Review. *Polymers*, 11(6), 953. https://doi.org/10.3390/polym11060953.

15. Cooper A. I. (2003). Porous materials and supercritical fluids. *Advanced Materials*, 15, 1049–1059. https://doi.org/10.1002/adma.200300380.

16. Primel A., Férec J., Ausias G., Tirel Y., Veillé J-M., Grohens Y. (2017). Solubility and interfacial tension of thermoplastic polyurethane melt in supercritical carbon dioxide and nitrogen. *The Journal of Supercritical Fluids*, 122, 52–57.

17. Kıroğlu C., Kızılcan N. (2021). Production and characterization of thermoplastic elastomer foams based on the styrene–ethylene–butylene–styrene (SEBS) rubber and thermoplastic material. *Open Chemistry*, 19, 929–937. https://doi.org/10.1515/chem-2021-0084.

18. Baek, K. H., Jung, B. J., & Ju, J. K. (2013). *Thermally-expandable microspheres having good foaming characteristics and uniform microsphere diameter and methods of preparing the same* (EP2327475A2). European Patent Office.

19. Versatile Expandable Microspheres China. (n.d.). *NJCHM*. https://www.njchm.com/versatile-expandable-microspheres-china.html?utm_source=chatgpt.com.

20. Zhang J., Yan T., Zhang H., Fang Y., Huang Y., Tang J., He M. (2022). Thermally expandable microspheres with excellent high-temperature expansion property. *Express Polymer Letters*, 16(7), 760–771. https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2022.55.

Дата першого надходження статті до видання: 15.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.03.2026

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

UDC 67-036

Tetyana Rymar[1], Serhiy Voytiuk[2]

[1] doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of Chemical Engineering and Ecology
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University (Kyiv, Ukraine)
E-mail: rymartatyana1975@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-9724-8640
Scopus Author ID: 6508270257

[2] Graduate Student of the Department of Chemical Engineering and Ecology
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University (Kyiv, Ukraine)
E-mail: serhii.voytyuk@tana.ua

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF THERMAL EXPANDABLE MICROSPHERES ON THE PROPERTIES OF THERMOELASTOPLASTS BASED ON STYRENE-BUTADIENE-STYRENE RUBBER

The development of the footwear industry, increasing requirements for ergonomics, durability, environmental friendliness and manufacturability of materials make the improvement of compositions for the manufacture of shoe soles an urgent task. Soles made of thermoplastic elastomers (TPE) bend easily, quickly restore their original shape and do not limit the natural biomechanics of the foot. The TPE sole is an integral structure in which the outer layers are formed as monolithic, dense and wear-resistant, while the inner layers have a porous, cellular structure. This structure provides an optimal combination of strength, shock absorption and reduced weight. One of the most effective and technologically convenient ways to create a light, elastic and stable porous structure is the foaming of TPE using thermally expandable microspheres. The work investigated the effect of thermally expandable microspheres on the main properties of styrene-butadiene-styrene compounds intended for the manufacture of shoe soles. It was found that the introduction of thermally expandable microspheres into SBS compounds introduces a gas phase, which has a significantly lower modulus and density, creates a porous, light structure, reduces the continuity of the polymer matrix, and weakens intermolecular interactions due to a decrease in the contact area between macromolecules. Such structural changes cause a decrease in the density, melt fluidity, hardness, abrasiveness and elastic modulus of the SBS compound. Due to the controlled expansion degree of the microspheres, it is possible to purposefully influence the macromolecular organization of the SBS compound, the redistribution of stresses within the material, and the effective three-dimensional morphology of the polymer matrix. These compounds can be effectively used in the production of shoe soles with increased shock-absorbing properties and wear resistance.

Keywords*: thermoplastic elastomer; styrene-butadiene-styrene compound; shoe sole; foaming; microspheres; properties. Fig.: 1. Table: 1. References: 20.*

Римар Т. Е., Войтюк С. О. Дослідження впливу мікросфер, що терморозширюються, на властивості термоеластопластів на основі стирол-бутадієн-стирольних каучуків. *Технічні науки та технології,* 2026. № 2(44). С. 335-344. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-335-344.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-345-365
УДК 634.0.8:664:66.0

Тетяна Геннадіївна Філінська[1], Тетяна Іванівна Ковальчук[2], Антоніна Олександрівна Філінська[3], Олег Вікторович Черваков[4], Дмитро Геннадійович Філінський[5], Сергій Климович Павлюк[6]

[1]кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)
E-mail: f111nskaya@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0009-7921-1989

[2]кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри біоресурсів, тваринництва та аквакультури Поліський національний університет (Житомир, Україна)
E-mail: tanyana72@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-8682-3280

[3]старший викладач кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)
E-mail: antoniyafilin@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0001-6975-6186

[4]доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Український державний університет науки і технологій
ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)
E-mail: ochervakov@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1631-3592

[5]аспірант кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)
E-mail: filinskyi.dmytro@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0003-6301-0695

[6]аспірант кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)
E-mail: serpik07@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0004-7615-963X

ПЛОДИ ДУБА – ПЕРСПЕКТИВНА СИРОВИНА ХАРЧОВОГО І ТЕХНІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Продукти перероблення дуба, включаючи плоди, кору, деревину та листя, мають безліч застосувань. Жолуді багаті на поживні речовини, що роблять їх важливим сировинним ресурсом. З давніх часів плоди дуба були цінним харчовим продуктом і на сьогодні мають великий потенціал до використання у різних галузях промисловості. Жолудеве борошно є важливим безглютеновим компонентом хлібобулочних виробів, а крохмаль може використовуватися не лише в харчових цілях, а і знаходити застосування у виробництві біоетанолу, у паперовому виробництві, при виготовленні композитів та полімерних плівок. Білкові ізоляти жолудів мають перспективи у виробництві харчових водно-жирових емульсійних продуктів, жолудева олія є джерелом цінних жирних кислот, все більшого поширення набувають жолудеві напої – замінники кави.

Представлені у статті матеріали мають оглядовий характер. Вони містять аналіз існуючих методів перероблення та використання плодів дуба. Стаття спрямована на формування гнучкого підходу до комплексного використання жолудів, як відновлюваної сировини харчового і технічного призначення, зменшення відходів і екологічного навантаження на довкілля.

Ключові слова: *жолуді; борошно; крохмаль; танін; олія; білковий ізолят.*
Рис.: 3. Бібл.: 52.

Актуальність теми дослідження. До пріоритетних напрямів розвитку різних галузей промисловості можна віднести: використання відновлюваної сировини, екологізацію виробництва, впровадження безвідходних технологій з одержанням вторинних продуктів, що мають додану вартість. Склад та властивості різних морфологічних частин дуба слугують відправною точкою для їх можливого промислового застосування. Плоди дуба, зазвичай відомі як жолуді, у наш час дещо недооцінені та недостатньо використовуються. Розширення сфер застосування жолудів у виробництві харчових продуктів як нетрадиційної сировини вимагає досліджень їхнього хімічного складу, фізіологічної цінності, виявлення взаємозв'язку з іншими компонентами продукції для розроблення ефективної технології їх використання. Реалізація принципів «зеленої хімії» в технічних галузях промисловості, впровадження виробничих процесів, які базуються на міжнародних системах управління якістю та системах екологічного менеджменту, потребує систематизації інформації та робить актуальним вивчення нових можливостей використання плодів дуба як сировини багатоцільового призначення.

© Т. Г. Філінська, Т. І. Ковальчук, А. О. Філінська, О. В. Черваков, Д. Г. Філінський, С. К. Павлюк, 2026

Постановка проблеми. Сучасні роботи науковців щодо використання відновлюваних сировинних ресурсів у харчових та технічних виробництвах є актуальними. Вони здійснюються з використанням інноваційних методів дослідження, їм властива глибина вивчення властивостей продуктів перероблення, у тому числі і плодів дуба. Прогнозованість їхньої поведінки є важливою для технологів. Плоди дуба, відомі як кормовий ресурс для диких і свійських тварин, здавна слугували також альтернативним і недорогим інгредієнтом у раціоні людей. Зараз їх використовують у багатьох галузях промисловості, що супроводжується відповідними дослідженнями. Для максимально ефективного застосування жолудів як сировини багатоцільового призначення, важливо враховувати сучасні напрацювання щодо технологій вилучення основних складових, таких як вуглеводи (крохмаль), білки, жири та інші біологічно активні сполуки. Не менш важливим завданням є реалізація не окремих процесів, а комплексне, екологічне й економічно обґрунтоване безвідходне перероблення плодів дуба у продукти харчового і технічного призначення. Вирішення цього завдання потребує систематизації результатів досліджень і формування гнучких підходів до питання перероблення жолудів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дуби (*Quercus)* є поширеними деревами у більшості європейських, північноафриканських, американських та азіатських лісів, від прохолодних до тропічних середовищ. У світі налічується за різними даними до 500 видів *Quercus* [1]. З них близько 45 % вважаються такими, що перебувають під загрозою, оскільки вони страждають від руйнування довкілля, або хвороб і шкідників. Питання збереження дубів у багатьох країнах є важливим завданням, а оскільки більшість видів *Quercus* мають насіння, чутливе до висихання, їх довгострокове збереження залежить від розроблення та застосування кріобіотехнології [2]. Дуби є домінуючими видами дерев в екосистемах по всій Північній півкулі. Практика вирощування дубів включає природні лісові масиви і штучне лісонасадження, створене людиною. Площі дубових насаджень в країнах різняться. У Польщі дубові насадження становлять близько 6 % від загальної площі лісів, у Китаї – близько 13 %, у Португалії цей відсоток знаходиться на рівні 34 %, а в Алжирі дуби становлять близько 40 % лісів [1; 3-5]. У Середземноморському регіоні жолуді традиційно були важливим джерелом їжі, особливо в періоди голоду та у неврожайні роки. Однак їх регулярне споживання було втрачено, і нині жолуді переважно споживаються пасовищними тваринами, зокрема, іберійською породою свиней, але все одно більша їх частина залишається на полях без будь-якого перероблення, як і в інших країнах. Жолуді з Південної Європи мають особливу характеристику: вони солодкі через нижчий вміст танінів у порівнянні з іншими видами дуба, що робить їх ще більш привабливими для використання як звичайного інгредієнта в раціоні людини. Одне з найважливіших дерев в унікальній середземноморській лісовій екосистемі кам'яний дуб (*Quercus rotundifolia*) є деревом, що охороняється, яке заборонено рубати, і відповідно до європейського законодавства його території не можуть використовуватися для будь-яких інших цілей, тому дуже важливо використовувати цей цінний ресурс. Остання інвентаризація лісів у 2015 році показала, що в Португалії налічується близько 350 тис. га кам'яних дубів. Це є великою площею, особливо в порівнянні з такою цінною культурою, як, наприклад, каштан, загальна площа якого набагато менша, близько 48 тис. га [6].

Ліси України сформовані понад 30 видами деревних порід, серед яких: сосна (*Pinus sylvestris*), дуб (*Quercus robur*), бук (*Fagus silvatica*), ялина (*Picea abies*), береза (*Betula pendula*), вільха (*Alnus glutinosa*), ясен (*Fraxinus excelsior*), граб (*Carpinus betulus*), ялиця (*Abies alba*). Загальна площа лісового фонду України донедавна становила 10,4 млн га, із яких вкритих лісовою рослинністю – 9,6 млн га, площі дубових насаджень займали близько 24 % [7]. У природних насадженнях рівнинної частини України зростають дуби звичайний або черешчатий (*Quercus robur*), скельний (*Quercus petraea*) і пухнастий (*Quercus pubescens*). Насадження дуба звичайного займають приблизно 95 %, скельного – 4 % і пухнастого – 1 % загальної площі дубових насаджень. Найпоширенішим і найціннішим вважається дуб звичайний [8].

Жолуді – це плоди (горіхи) дуба (*Quercus*), а точніше, це сім'янки з одного насіння. Жолудь, нерозкривний плід з однією вільною насіниною в твердому дерев'янистому оплодні, розміщений у блюдце- або чашоподібній мисочці, яка прикріплює його до стебла. Плоди дуба (жолуді), як і листя, є ознаками, що дозволяють ідентифікувати різновиди дубів. Серед характеристик (рис. 1), які відрізняють жолуді різних видів *Quercus*, можна назвати: структуру чашоподібної мисочки, форму, масу (разом із відсотком затверділого перикарпію) та розміри [3].

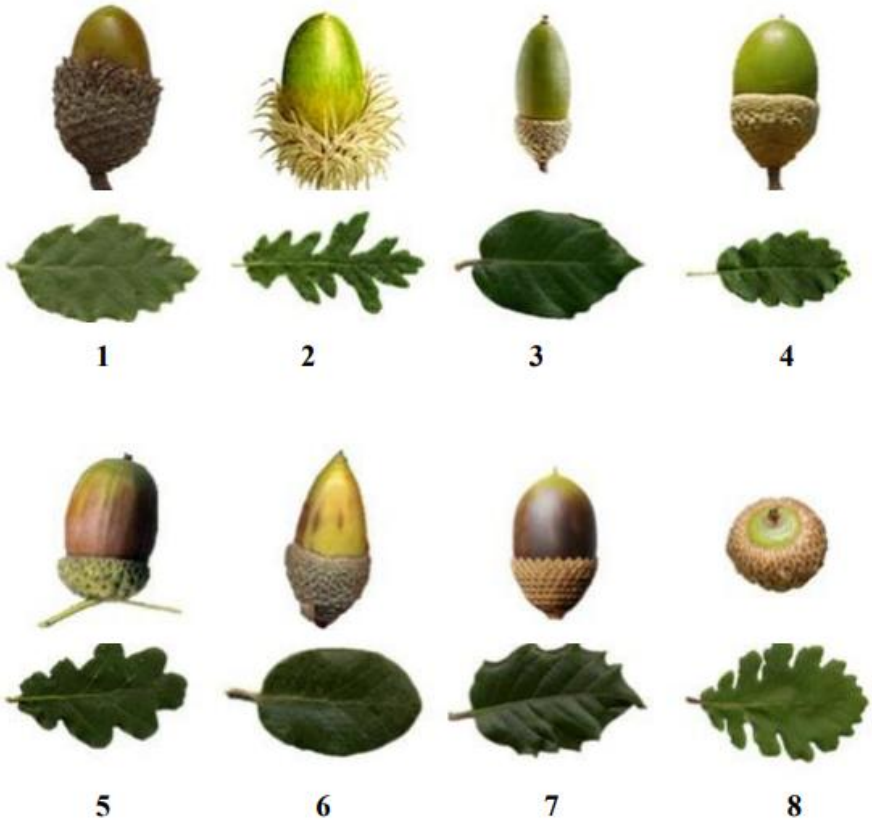


Рис. 1. Морфологічні відмінності в листі та жолудях різних видів Quercus: 1 – Q. brantii; 2 – Q. cerris; 3 – Q. ilex; 4 – Q. infectoria; 5 – Q. robur; 6 – Q. rotundifolia; 7 – Q. suber; 8 – Q. virginiana

Джерело: [3].

Властивості жолудів різних видів різняться не лише за розміром, а й за складом [9]. Мають місце відмінності за жирнокислотним складом, та все ж домінуючими серед присутніх кислот є: олеїнова, лінолева і пальмітинова кислоти (табл. 1).

Таблиця 1 – Жирнокислотний склад зразків жолудів різних видів Quercus (%)

Кислота	Види *Quercus*				
	Q. faginea	*Q. suber*	*Q. pyrenaica*	*Q. coccifera*	*Q. ilex*
1	2	3	4	5	6
С14 міристинова	0,19 ± 0,05	0,31 ± 0,06	0,18 ± 0,02	0,30 ± 0,09	0,18 ± 0,04
С15 пентадеканова	0,15 ± 0,02	0,15 ± 0,03	0,15 ± 0,01	0,16 ± 0,03	0,08 ± 0,01
С16 пальмітинова	11,69 ± 1,19	14,27 ± 1,48	12,17 ± 0,55	16,22 ± 0,99	12,28 ± 1,55
С16:1 пальмітоолеїнова	0,36 ± 0,12	0,26 ± 0,03	0,38 ± 0,02	0,37 ± 0,15	0,17 ± 0,04
С17 маргаринова	0,16 ± 0.01	0,19 ± 0,01	0,15 ± 0,01	0,18 ± 0,01	0,19 ± 0,03
С18 стеаринова	3,50 ± 0,66	2,74 ± 0,54	3,23 ± 0,66	3,31 ± 0,44	4,03 ± 0,86

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6
С18:1 олеїнова	62,44 ± 2,46	56,25 ± 6,84	57,46 ± 3,46	48,02 ± 4,55	65,83 ± 3,75
С18:1 вакценова	2,49 ± 0,24	2,23 ± 0,41	2,36 ± 1,18	3,11 ± 0,76	1,40 ± 0,31
С18:2 лінолева	16,42 ± 0,22	20,73 ± 4,43	21,30 ± 3,54	25,38 ± 2,54	14,17 ± 2,98
С18:3 ліноленова	0,74 ± 0,21	1,34 ± 0,42	0,80 ± 0,10	1,57 ± 0,25	0,54 ± 0,18
С20 арахінова	0,58 ± 0,18	0,26 ± 0,06	0,54 ± 0,15	0,29 ± 0,03	0,36 ± 0,04
С20:1 гадолеїнова	0,43 ± 0,12	0,39 ± 0,08	0,39 ± 0,07	0,38 ± 0,04	0,36 ± 0,04
С20:2 ейкозадієнова	0,04 ± 0,03	0,08 ± 0,02	0,04 ± 0,04	0,06 ± 0,02	0,03 ± 0.05
С22 бегенова	0,34 ± 0,17	0,35 ± 0,15	0,41 ± 0,11	0,28 ± 0,06	0,18 ± 0,01
С23 трикозанова	0,12 ± 0,05	0,14 ± 0,07	0,12 ± 0,03	0,10 ± 0,02	0,05 ± 0,06
С24 лігноцеринова	0,22 ± 0,10	0,23 ± 0,12	0,21 ± 0,04	0,16 ± 0,04	0,09 ± 0,01
Загальна кількість насичених жирних кислот, %	16,96 ± 0,88	18,64 ± 1,87	17,15 ± 1,44	21,01 ± 1,35	17,44 ± 1,01
Загальна кількість мононенасичених жирних кислот, %	65,73 ± 2,36	59,13 ± 6,50	60,59 ± 3,55	51,89 ± 4,05	67,76 ± 3,93
Загальна кількість поліненасичених жирних кислот, %	17,31 ± 2,14	22,24 ± 4,74	22,26 ± 3,61	27,11 ± 2,80	14,80 ± 3,12

Джерело: [9].

Жолудева олія та її побічні продукти мають високий економічний потенціал для промислового застосування через значний вміст у них фенолів та високу антиоксидантну активність. За жирнокислотним складом жолудева олія близька до оливкової, характеризується високим вмістом ненасичених жирних кислот [10].

Жолудева олія має високі поживні якості, а її смак можна порівняти зі смаком оливкової олії. Значення числа омилення (Ч.О) для олії з різних видів жолудів знаходиться в межах від 160,3 до 220 мг КОН/г. Його можна порівняти з таким у оливкової олії (184-196 мг КОН/г). Відносно високі показники Ч.О вказують на те, що олії містять жирні кислоти з великою кількістю атомів вуглецю (довголанцюгові). Йодне число (Й.Ч) відображає ступінь ненасиченості, і що більше подвійних зв'язків, то вище Й.Ч. Показник Й.Ч для жолудевої олії можна порівняти зі значеннями цього показника для оливкової олії 75-94 г/100 г, для деяких зразків цей показник вище.

Вміст вільних жирних кислот (ВЖК) є важливим параметром оцінювання якості олії. Олія більш придатна для споживання людиною, якщо вона має низький вміст ВЖК. Цей показник для жолудевої олії невисокий, що вказує на безпечність використання її для харчових цілей. Для жолудевої олії показник заломлення (n_D^{20}) знаходиться в діапазоні, що наближений до відповідних значень інших рослинних олій, наприклад, оливкової з n_D^{20} 1,4677-1,4705. Жолудева олія містить значну кількість фітостеринів, важливу група природних сполук, біологічно активних у профілактиці низки захворювань. Вони присутні в жолудевій олії в кількостях, що перевищують цей показник для мигдальної, соєвої і оливкової олії та знаходяться в тому ж діапазоні, що притаманні для кунжутної та кукурудзяної. Жолудева олія характеризується високим вмістом β-ситостеролу, за яким слідує кампестерол. Стигмастерол, клеростерол, 5-авенастерол і 7-авенастерол присутні в незначних кількостях. Споживання фітостеролу важливе для зниження рівня холестерину в крові, а також він виявляє протиракові властивості. Крім того, повідомлялося, що жолудева олія містить значну кількість аліфатичних спиртів. Тетракозанол був переважаючою сполукою цього класу сполук (43,70–59,48 %), за ним слідував гексакозанол (18,66–26,93 %), а такі сполуки як докозанол (13,17–26,24 %) і октакозанол (1,52–9,33 %) менш поширені аліфатичні спирти в жолудевій олії.

Жолудева олія також є відмінним джерелом токоферолів, що являють собою жиророзчинні фенольні сполуки, які природним чином присутні в олійному насінні в чотирьох різних формах (α-, β-, γ- і δ-токофероли). Ці сполуки цінуються за їхню здатність захищати від окислювального ушкодження, опосередкованого активними формами кисню та азоту, запобігати окисленню під час зберігання олій і харчових продуктів, які містять ліпіди [10].

За результатами досліджень [5] в жолудевій олії було ідентифіковано фенольні сполуки (табл. 2), серед яких переважаючими були: гідролізовані похідні таніну й сполуки у формі гексагідроксидифенольних ефірів глюкози та галоїлглюкозних ефірів (тригалоїлглюкоза і пентагалоїлглюкоза).

Таблиця 2 – Поліфеноли жолудевої олії

Фенольні сполуки (мг GAE/кг олії)	Вид жолудів		
	Q. ilex	*Q. suber*	*Q. coccifera*
Дигалоїлгексоза	1,73	1,26	1,22
Касталагін	2,01	1,45	1,52
Педункулагін	0,14	1,22	1,12
Дигалоїл гексагідроксидифеноїл глюкоза	0,26	3,0	2,36
Казуариктин	0,22	1,93	2,63
Дигалоїл гексагідроксидип глюкоза (785)	–	1,32	3,88
Тригалоїлглюкоза	1,49	3,32	4,87
Тетрагалоїл-пентозид	1,98	6,06	6,55
Тетрагалоїлпентозид (787), тригалоїл гексагідродипеноїл глюкоза (937)	–	17,52	21,26
Тетрагалоїл-пентозид (787), тригалоїл гексагідродифеноїлглюкоза (937)	20,83	28,13	34,82
Тригалоїлгексагідродифеноїл глюкоза	81,89	101,47	129,15
Пентагалоїл глюкоза (939)	10,75	20,90	20,22

Джерело: [10].

Проаналізовано як загальний вміст фенолів, так і загальний вміст флавоноїдів в жолудевій олії і борошні. Рівень вмісту фенолів (виражений в еквіваленті галової кислоти – GAE) варіювався від 195,6 до 322,06 мг GAE/кг олії, тоді як вміст флавоноїдів (виражений в еквіваленті катехіну – CE) знаходився в межах від 122,99 до 131 мг CE/кг. Загальний вміст фенольних сполук у різних сортах жолудевої олії коливався від 84 до 109 мг/кг. Ці сполуки сприяють підвищенню окисної стабільності олії [10; 11].

В олії з жолудів *Q. suber* у великій кількості присутні каротиноїди (66,33 ± 0,90 мг/кг олії); ця олія також багата на хлорофіли (2,03 ± 0,01 мг/кг олії) [5].

Жолуді *Q. faginea* багаті на лікопін (183 ± 141 г/г сухої речовини) і β-каротин (1312 ± 890 (мкг/г сухої речовини)). Як відомо, β-каротин є потужним антиоксидантом, який слугує інгібітором фотоокислення шляхом реакції з пероксильними радикалами. Невелика кількість жолудів гарантує рекомендовану добову потребу у вітаміні А, що важливо з погляду здоров'я людини. Жолудева олія здобула широку популярність у науковій спільноті як функціональний продукт. З погляду її користі для здоров'я, жолудева олія містить високу частку олеїнової кислоти, також у ній присутні незамінні лінолева й ліноленова кислоти. Присутність цих кислот у складі жолудевої олії робить її перспективним харчовим продуктом-добавкою для профілактики ризику серцево-судинних захворювань. Важливим компонентом є β-ситостерин. Він виступає переважним фітостеролом, представленим у жолудевій олії (90 %). Олія слугує відмінним джерелом токоферолів, причому γ-токоферол є найбільш поширеним. Антиоксидантна активність та ідентифікація поліфенолів вказують на потенційну користь для здоров'я. Можливості застосування жолудевої олії, як нового харчового інгредієнта, ще повністю не вивчено. Хоча, наприклад, у португальському законодавстві вона визначена в категорії харчових олій і в шістдесятих роках минулого століття її було оцінено як сировину для харчової промисловості [12; 13].

Слід зосередити більше досліджень на виробництві жолудевої олії кращої якості, наприклад, на застосуванні більш інноваційних та оптимізованих методів, які можуть підвищити її користь для здоров'я. Аналогічно, токсикологічні ефекти, механізм дії в організмі людини та дані про присутні у складі сполуки, необхідно ретельно вивчати перед розглядом питання щодо безпечності використання жолудевої олії в харчових цілях.

Вилучати олію з жолудів можна різними способами. Традиційно холодне відтискання є одним з найбільш використовуваних методів отримання жолудевої олії. За такого способу пресування виконується при низькому тиску близько 0,5 МПа [10]. Процес потребує менших затрат енергії, ніж інші методи вилучення олії, є екологічно чистим і короткотривалим. Вилучення жолудевої олії екстракцією виконується з використанням органічних розчинників, таких як гексан і петролейний ефір. Цей метод вважається ефективним більше сторіччя; найбільшою його перевагою є простота (не потрібна фільтрація після етапу вилучення олії) і помірне споживання енергії. Недоліком є використання розчинника, який є токсичною речовиною. Його важко виключити повністю, і це може призвести до серйозного забруднення кінцевого продукту (олії). Для вилучення олії з жолудів успішно застосовується фокусована мікрохвильова екстракція. Цей метод заснований на тих же принципах, що і звичайна екстракція, але він модифікований для полегшення розміщення відсіку картриджа зі зразком в зоні опромінення мікрохвильової печі. Фокусована мікрохвильова екстракція має перевагу в порівнянні зі звичайними методами, оскільки дозволяє повністю вилучити жир за 30 хв, що значно швидше у порівнянні з еталонним методом екстракції (4,5 – 8 годин). Як альтернатива цим традиційним методам екстракції для вилучення жолудевої олії пропонуються такі методи, як ультразвукова екстракція та надкритична екстракція CO_2. Жирнокислотний склад жолудевої олії, отриманої екстракцією *н*-гексаном в апараті Сокслета і надкритичною флюїдною екстракцією з CO_2 при 18 МПа і 313°С, не мав суттєвих відмінностей. Але остання в порівнянні з екстракцією в апараті Сокслета вважається екологічно чистим методом, що дозволяє уникнути проблеми забруднення олії залишковим розчинником. Більш того, діоксид вуглецю безпечний, негорючий і доступний у високій чистоті. Для екстракції жолудевої олії у дослідженнях використовували надкритичний CO_2 змінюючи такі параметри, як розмір частинок, швидкість потоку розчинника, геометрію екстрактора та ін. Встановлено, що вихід продукту та початкова швидкість екстракції залежать від густини діоксиду вуглецю та поверхневої швидкості.

Крім використання в харчових цілях, жолудева олія може слугувати сировиною для виробництва біодизелю (метилових ефірів жирних кислот – МЕЖК) [14].

Крохмаль – продукт, що знаходить застосування у різних галузях промисловості і потреба в ньому має тенденцію до зростання. Світове виробництво крохмалю у 2020 році становило 88,1-97,7 млн тонн. Із загального обсягу 75 % припадає на кукурудзу, за якою слідують маніока (14 %), пшениця (7 %) і картопля (4 %). Співвідношення різних видів крохмалю на американському, європейському, азійському ринках різняться. Китай і США є основними виробниками крохмалю, в основному з кукурудзи. Таїланд – з маніоки, а Європа – пшеничного і картопляного крохмалів. Гідролізовані крохмалі є найбільш споживаними, за ними слідують нативні та модифіковані крохмалі, і вони важливі як джерело їжі. Разом з харчовою промисловістю великі об’єми крохмалю потребує паперове виробництво, за нею слідують хімічна промисловість і виробництва біорозкладальних полімерів, попит на які швидко зростає [15]. Знання властивостей крохмалю є обов'язковим, щоб визначити його потенційне застосування як у харчовій, так і нехарчовій промисловості. Крохмалі із жолудів характеризуються високим вмістом амілози, обмеженим набуханням у поєднанні з низькою розчинністю та низькими температурами желатинізації. Важливим є метод одержання крохмалю, його ізоляція. Лужний метод є більш ефективним. Такого висновку дійшли у процесі виділення крохмалю з плодів двох

видів жолудів (*Quercus rotundifolia ma Quercus suber*) різними методами (лужним і ферментним) [16]. Метод виділення викликав зміни властивостей в ізольованих крохмалях, а саме: термічні, реологічні, синерезисні, кристалізаційні, а також вмісту резистентного крохмалю. Ізольовані жолудеві крохмалі мали високий вміст амілози (53–59 %) і резистентного крохмалю (30,8–41,4 %). Були встановлені значення розчинності й набухання, показуючи їх поступове збільшення від 60°C до 90°C. Температури клейстеризації варіювалися від 67,5 до 72,0 °C, і клейстери не показували розпаду, що вказує на високу стабільність клейстеру жолудевих крохмалів при нагріванні. При температурі навколишнього середовища значення каламутності та синерезису були низькими, але при витримуванні при температурах замерзання синерезис значно збільшувався. Крохмаль, виділений ферментативним методом, показав менш цікаві функціональні властивості, оскільки ця процедура виділення більше вплинула на структуру крохмалів.

Для різних видів жолудів і методів їх оброблення за літературними даними вихід крохмалю знаходився в діапазоні від 48,93 до 89,83 %, а його чистота становила від 98,1 до 97,6 % [17]. Майже всі методи мали схожу схему, незалежно від виду жолудів. Плоди зазвичай очищають від лушпиння, подрібнюють, частіше у вологому стані. Потім хімічна або ферментативна обробка. Центрифуги застосовувалися для прискорення виділення таких сполук, як білок, жир, цукри та волокна. Один з ранніх методів виділення жолудевого крохмалю включав обробку 0,3 % розчином метабісульфіту натрію для замочування, нейлонову сітку (106 мм) для просіювання і багаторазове промивання толуолом (10 % толуолу в 0,1 М водного розчину). Отриманий крохмаль висушували на повітрі за кімнатної температури.

Інший спосіб включав подрібнення жолудів в сухому виді з подальшим замочуванням 0,25 % NaOH. Після цього суспензію гомогенізували та просіювали через сито 180 мм. Отриманий осад далі послідовно просіювали через сита 75 мм і 53 мм та центрифугували. Жолудевий крохмаль, вилучений за допомогою цього методу, мав високу чистоту та вихід, і що важливо менш ушкоджену структуру. Описано інший метод виділення крохмалю з жолудів, який включав замочування жолудевого борошна в 0,3 % гідроксиді натрію при масовому співвідношенні компонентів 1:5, просіювання дисперсії через сито з розміром отворів 0,18 мм і наступне очищення центрифугуванням.

Щодо молекулярної структури, то в наукових джерелах не надто багато повідомлень про хімічні структури компонентів амілози та амілопектину з крохмалю із жолудів. Його молярна маса становить від $2{,}65\times10^7$ до $8{,}22\times10^7$ г/моль. Молярну масу та щільність амілопектину з жолудів можна порівняти з іншими крохмалями типу А. Крохмаль із жолудів показав нижчий відсоток розгалужених коротких ланцюгів амілопектину та дуже довгих ланцюгів. А відсоток розгалужених довгих ланцюгів був більшим. Форма жолудевого крохмалю може бути сферичною, еліптичною та неправильною.

У гранулах зовнішні ланцюги амілопектинових ланцюгів взаємодіють один з одним і молекулами води, утворюючи подвійні спіралі та кристали. Кристали гранул розташовані систематично, утворюючи 3 поліморфні типи (типи А, В і С). Типи А і В розрізняються на основі упаковки подвійних спіралей в амілопектині та рівня їх гідратації. Тип С являє собою суміш типу А і В. Ступінь кристалічності крохмалю із жолудів варіювався від 22,3 до 47,8 %, він нижчий, ніж у крохмалів пшениці, гречки.

Желатинізація крохмалю – це фізичний процес, при якому гранула руйнується і набухає при нагріванні при надлишку води. Цей процес призводить до фазового переходу гранул крохмалю з упорядкованого стану до невпорядкованого. Порівняльні дослідження показали, що температури желатинізації крохмалів із жолудів були нижчими, ніж у крохмалів маніоки та кукурудзи, і вищими, ніж у крохмалів із каштана. Ці відмін-

ності у властивостях желатинізації між різними крохмалями можна приписати таким факторам, як вміст амілози, кристалічність та вміст некрохмальних домішок. Вплив довжини ланцюга амілопектину в крохмалі із жолудів на желатинізацію залишається незрозумілим. Тому мають проводитися подальші дослідження для характеристики розподілу амілопектину в жолудевому крохмалі та визначення впливу розподілу довжини ланцюга амілопектину на його фізико-хімічні властивості.

Крохмаль із жолудів, виділений шляхом замочування в етанолі за допомогою ультразвуку, показав відносно вищі значення набухання та розчинності порівняно з іншими методами; вони склали близько 24,99 г/100 г і 15,22 % відповідно при температурі 90 °C. Крохмаль із жолудів має низький показник набухання у порівнянні з картопляним крохмалем. Це може бути пов'язане із різними факторами. Наприклад, високий вміст моноефіру фосфату в картопляному крохмалі значно сприяє більшій гідратації та набухання гранул картопляного крохмалю. Порівняльне дослідження показало, що набухання і розчинність крохмалю із жолудів при 90 °C були вищими, ніж у крохмалів гречки, вівса, і нижче, ніж у крохмалів кукурудзи та ін.

Крохмаль можна поділити на три категорії з погляду засвоюваності, залежно від його схильності до гідролізу під час транзиту кишківником через травні ферменти. Швидко засвоюваний крохмаль гідролізується протягом 20 хв, повільно засвоюваний – від 20 до 120 хв і резистентний крохмаль не гідролізується протягом 120 хв. Відмінності в засвоюваності нативних крохмалів між видами і всередині видів приписуються взаємодії багатьох факторів, таких як ступінь кристалічності та джерело крохмалю. Було відзначено різноманітність у вмісті резистентного крохмалю у жолуді (30,8-41,4 %), і цей показник сильно корелювався методом виділення. Повідомлялося, що гідролізовані таніни можуть бути основними активними сполуками, відповідальними за зниження засвоюваності жолудів. Висока кількість резистентного крохмалю в жолудях вказує на високий потенціал використання жолудів для приготування продуктів з низьким глікемічним індексом.

Дослідження показали можливість використання жолудевого крохмалю у виробництві паперу. Порошок із висушених очищених від шкаралупи плодів жолудів, мав світло-золотистий колір (рис. 2, *b*). Однак після екстракції розчинником нативний ізольований крохмаль трансформувався в біло-молочний порошок (рис. 2, *c*). Як видно (рис. 2, *d*), гранули жолудевого крохмалю були нерегулярними, сферичними, напівсферичними та в основному еліптичними, демонструючи поверхню з поглибленнями та численними отворами і тріщинками (рис. 2, *e, f*). Їх розподіл за розмірами був в діапазоні від 6 до 12 мкм (гранули типу B). Поліпшення властивостей жомової целюлози та паперу з використанням нативного жолудевого крохмалю, порівнювалось із звичайною добавкою катіонного кукурудзяного крохмалю. Показники утримання жомової целюлози та дренаж як ключові показники продуктивності та працездатності були кращими у жолудевого крохмалю порівняно з кукурудзяним. Найнижче дозування жолудевого крохмалю (0,5 %) показало кращі результати, ніж найвищі дозування кукурудзяного (1 та 1,5 %). Більш висока адсорбція жолудевого крохмалю на поверхні волокон порівняно з кукурудзяним може бути пов'язана з його більш високим значенням утримання води разом з вищою щільністю (до 20 %). Спостерігалися високі механічні властивості одержаного паперу, такі як індекси розтягування, продавлювання і розриву. Нативний жолудевий крохмаль здатний забезпечувати більшу продуктивність, ніж комерційний хімічно модифікований крохмаль, а жолуді – слугувати перспективним джерелом нативного крохмалю для паперової промисловості, навіть без хімічної модифікації [18].

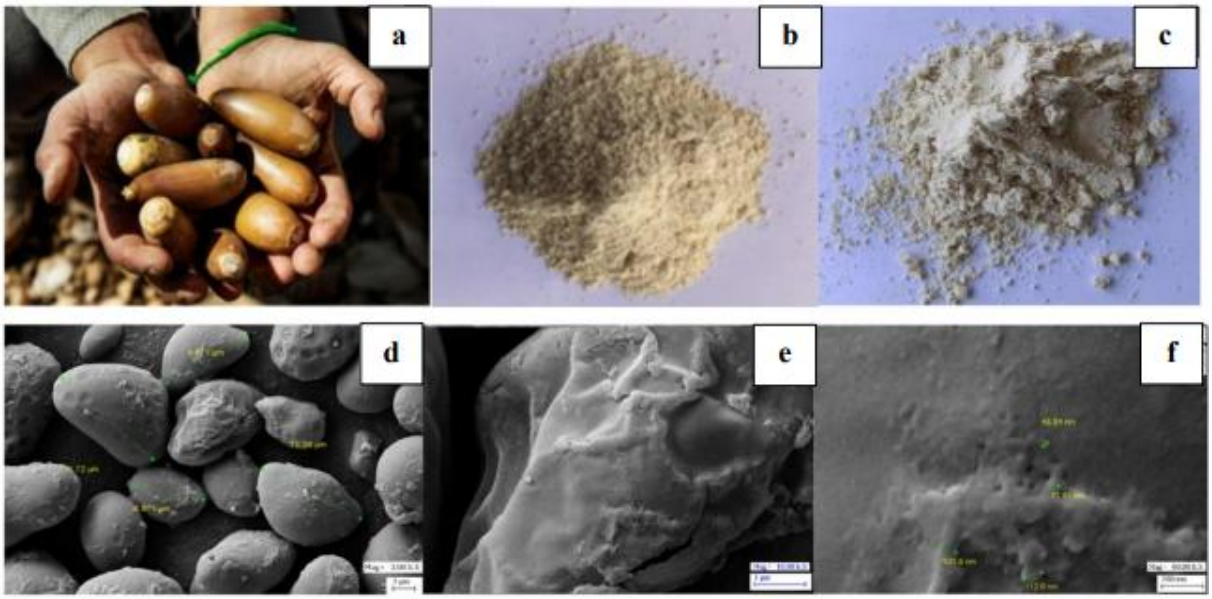


Рис. 2. Зображення продуктів перероблення жолудів:
a – необроблені жолуді Q. persica; б – жолудевий порошок; с – жолудевий крохмаль;
d – f – жолудевий крохмаль під мікроскопом

Джерело: [18].

Досліджено процес прямого виробництва етанолу з ксилану та жолудів з використанням ферментуючого крохмаль базидіального гриба *Phlebia acerina*. Базидіальний гриб білої гнилі *Phlebia acerina* SF23754, що використовувався в роботі, здатний засвоювати широкий спектр джерел вуглецю та ферментувати етанол з ксилану та крохмалю. Результати дослідження підтверджують можливість використання жолудів як сировини для ферментації етанолу з використанням гриба *Phlebia acerina*, що може сприяти ефективному переробленню невикористаної біомаси [19].

Жолудевий крохмаль може також слугувати сировиною для ферментативного виробництва лимонної кислоти. Враховуючи присутність в матеріалі таніну, здійснення процесу доцільно виконувати з використанням мутантного штаму з толерантністю до таніну *Aspergillus niger* AA120. Він забезпечує збільшення біомаси на 43,76 % і продуктивності виробництва лимонної кислоти на 20,34 % [20].

Жолудевий крохмаль використовують у полімерному виробництві. Досліджено властивості композитів з жолудевого крохмалю та полімолочної кислоти, модифікованих димерною жирною кислотою (ДЖК) або димерним поліамідом жирної кислоти (ДПЖК). Зразки були виготовлені методом екструзії гарячого розплаву. Вивчався вплив вмісту ДЖК та ДПЖК на механічні, гідрофобні, термічні властивості та плинність розплаву композитів при незмінному масовому співвідношенні жолудевого крохмалю до полімолочної кислоти 40:60. Результати досліджень показали, що сумісність композитів визначалася дозуванням ДЖК або ДПЖК. Гідрофобність та плинність розплаву композитів покращувалася при додаванні ДЖК та ДПЖК. Температури склування композитів значно знижувалася при додаванні ДЖК та ДПЖК. Однак ДЖК і ДПЖК показали різний вплив на механічні властивості композитів з жолудевого крохмалю і полімолочної кислоти. У системі, з модифікацією ДПЖК, міцність на розтягування та вигин спочатку збільшувалася, а потім зменшувалася зі збільшенням дозування ДПЖК; механічна міцність була максимальною, коли дозування ДПЖК становило 2 % від загальної маси. У системі, модифікованій ДЖК, міцність на розтяг та вигин зменшувалася зі збільшенням дозування ДЖК [21].

Плівки, отримувані з крохмалю та білків, використовуються як альтернатива пластику; проте це дещо посилює продовольчий дефіцит. Вивчається можливість використання жолудевого крохмалю для виготовлення склеюваної та термозварювальної композитної плівки [22]. Дослідні зразки були виготовлені з жолудевого порошку і *к*-карагенану. Одержані результати показали, що показники мутності та пропускання знизилися з 96,74 до 94,50 % та з 3,50 до 2,25 % відповідно, коли вміст гліцерину збільшився з 30 до 50 %. Плівка мала чудові властивості захисту від УФ-випромінювання (пропускання при 380-200 нм дорівнювало 0). Плівка мала максимальну міцність зварювання 5,09 ± 0,29 Н/15 мм при 0,3 МПа протягом 1 секунди при температурі 115 °С. Також у неї були високі показники захисту від УФ-випромінювання і така плівка була визначена як ефективна заміна пластикової упаковки для жирних продуктів.

Присутні в жолудях таніни також знаходять широке застосування. Їх можна вилучати різними методами, такими як: занурення у воду, термічним, хімічним та ферментативним способами [23]. Результати досліджень двох методи екстракції: занурення у воду при кімнатній температурі та термічний гідроліз шляхом кип'ятіння показують, що обидва методи екстракції є життєздатними варіантами для отримання танінів, хоча вони знижують вміст деяких важливих мінералів.

Процеси екстракції супроводжуються зменшенням кількості окремих мінералів, що підтверджують результати дослідження необроблених жолудів і зразків, які були піддані одноразовому та дворазовому варінню (табл. 3). Але при цьому спостерігається збільшення вмісту натрію, що пояснюється руйнуванням клітинних стінок і мембран під час кип'ятіння. Ця руйнація потенційно вивільняє натрій, який раніше утримувався в структурі. Кип'ятіння може вилуговувати мінерали та таніни з жолудів у воду, що призводить до відносного підвищення концентрації натрію. Це збільшення може бути результатом безлічі факторів, враховуючи склад жолудів і взаємодії під час кип'ятіння.

Таблиця 3 – Вміст мінералів у сирих зразках і після термічного оброблення

Вміст мінералів	Дослідні зразки		
	сирий	термічно оброблені	
		після першого кип’ятіння	після другого кип’ятіння
Вміст кальцію (Ca), мг/г	11,3 ± 0,2	0,688 ± 0,089	0,396 ± 0,086
Вміст міді (Cu), мг/г	0,0349 ± 0,0044	0,0227 ± 0,0037	0,0212 ± 0,0036
Вміст заліза (Fe), мг/г	0,351 ± 0,015	0,0609 ± 0,0080	0,0292 ± 0,0072
Вміст магнію (Mg), мг/г	0,299 ± 0,044	0,278 ± 0,075	0,332 ± 0,068
Вміст калію (K), мг/г	23,4 ± 0,3	19,4 ± 0,3	18,0 ± 0,3
Вміст натрію (Na), мг/г	0,142 ± 0,019	0,287 ± 0,033	0,256 ± 0,002
Міст цинку (Zn), мг/г	0,0193 ± 0,0025	0,00462 ± 0,00189	0,00352 ± 0,00179

Джерело: [23].

Таніни залишаються спірною групою біоактивних компонентів у рослинах через антипоживні властивості та несприятливі наслідки для здоров'я, які можуть спостерігатися при підвищеному споживанні танінів, з одного боку, і все більш документованого профілактичного та терапевтичного впливу на здоров'я людини, з іншого боку. Комплексоутворення основний антипоживний ефект, що приписується танінам, полягає у зниженні засвоюваності та біодоступності інгредієнтів їжі. Таніни утворюють комплекси як з основними поживними речовинами (вуглеводами та білками), так і з мінералами, такими як фосфор, кальцій, магній та залізо. Таніни самі можуть піддаватися ферментативному окисленню, що також збільшує їхню токсичність.

Крім негативних аспектів, пов'язаних зі споживанням танінів та їхнім впливом на організм людини, нові звіти підкреслюють також корисні для здоров'я властивості про-

дуктів розпаду танінів. Наприклад, елаготаніни, одна з груп танінів, присутніх у жолудях, піддаються гідролізу в тонкому кишечнику людини, і продукти їх гідролізу, насамперед елагова кислота, виявляють антиоксидантну, протизапальну та нейропротекторну дію. Крім того, елагова кислота використовується кишковою мікрофлорою людини як субстрат для виробництва уролітинів, які були ідентифіковані як агенти у боротьбі з раком товстої кишки. Також виявлені гіпоглікемічні сполуки жолудів *Quercus liaotungensis* і досліджена можливість використання їх для профілактики цукрового діабету [24].

Застосування коагулянтів на основі таніну в очищенні стічних вод по всьому світу показало успішне видалення забруднюючих речовин, включаючи мутність, барвники, зважені тверді частинки, водорості та важкі метали. Рівень ефективності танінів як коагулянтів пов'язаний з їхньою хімічною структурою та ступенем модифікації, які в свою чергу пов'язані з видом рослинного джерела, з якого таніни вилучаються. Найбільш ефективними є екстракти з жолудів дуба звичайного, вони показують найвищу коагуляційну активність, близько 70 %. Використання рослинних коагулянтів сприяє зниженню споживання хімікатів та їх корозійної дії на обладнання [25-27].

Жолудеві таніни затребувані у процесах оброблення шкіри [28]. Valonea, танін, що гідролізується, одержуваний з плодів дуба, що росте в західній частині Туреччини, має значну економічну цінність для шкіряної промисловості. Він тривалий час використовувався в комерційних цілях для вилучення елаготанінів як дубильного агента. Танін Valonea одержують із чашок та борідок жолудів шляхом традиційної екстракції гарячою водою. Він переважно знаходить застосування в натуральному дубленні шкіри як альтернативна процедура хромового дублення і є одним з відомих рослинних танінів, що використовуються для процесів додублювання у виробництві шкіри. Процес екстракції танінів з натуральної матриці найчастіше здійснювався емпіричними методами, де оптимізація процесу не проводилася. Тож комерціалізація використання цих танінів потребувала оптимізації умов екстракції. Були виконані дослідження з використанням жолудевих чашок. Коефіцієнт наповнення шкір, дублених з використанням екстрагованої валонії (57,81 %) і температура усадки (75,5 °C), були вищими, ніж у комерційної валонії (52,83 %, 73 °C), що вказує на значний вплив оптимізації процесу. Дубильні властивості екстрагованої валонії були задовільними для рослинного дублення у шкіряній промисловості.

Види роду *Quercus* тривалий час використовувалися в традиційній медицині в різних країнах і племенах. Повідомлялося, що кора, плоди та листя видів цього роду мають широкий спектр біологічних ефектів, таких як антиоксидантні, протидіабетичні, протиракові, протизапальні та антибактеріальні. Поточні фітохімічні дослідження видів роду *Quercus* показали, що фенольні кислоти (особливо галова, елагова кислоти та їх похідні), флавоноїди (особливо флаван-3-ол) і таніни присутні у всіх видах *Quercus.* Згідно з дослідженнями, ці сполуки, можна розглядати як перспективні кандидати для розроблення нових фармацевтичних препаратів [29].

Дослідження тритерпенів, виділених із жолудів, підтвердили їх протизапальну дію. При чому з десяти досліджуваних пентациклічних тритерпенів (рис. 3), три (1–3) були вперше виділеними із жолудів (*Quercus serrata*). Їхні структури були встановлені на основі інтерпретації хімічних та спектроскопічних аналізів [30]. Жолуді можуть бути також корисним продуктом при нейрозапальних захворюваннях, таких як хвороба Альцгеймера. [31].

Жолудеві білкові ізоляти як самостійно, так і в суміші з гуміарабіком забезпечують формування стійких водно-жирових емульсій прямого типу, властивості яких залежать від способу приготування і послідовності змішування компонентів [32].

Порошок з ядра жолудів є достойним замінником кави з привабливим мікро- і макроелементним складом Зважаючи на той факт, що вживання жолудевого напою у світі набуває поширення, виконується все більше робіт по вивченню біологічної активності,

безпечності, токсичності і поживної цінності напою з жолудів. Досліджуються питання впливу способів попереднього оброблення жолудів на склад і характеристики отримуваного напою [33; 34].

Плоди дуба можуть слугувати сировиною для виробництва твердого палива. Досліджено процес виготовлення паливних брикетів з обсмажених шкаралуп та чашок жолудів [35; 36]. Виготовлення брикетів з жолудів дуба звичайного (*Quercus robur*) не потребує додаткових сполучних матеріалів, а отриманий продукт відповідає чинним європейським стандартам.

Крім вищезгаданих застосувань жолудів у харчових виробництвах, вони також слугують кормом для диких і свійських тварин. Є позитивні результати досліджень щодо введення жолудів у раціон свиней інших тварин. Для вигодовування буйволів допускається до 47,3 % жолудів в складі кормів, для кіз молочної породи – до 40 %. Споживання зелених жолудів (*Quercus ilex*) позитивно впливає на засвоюваність поживних речовин і процес зростання ягнят, також жолуді (*Quercus pubescens*) розглядаються як джерело енергії в комбікормах для кроликів [37-44].

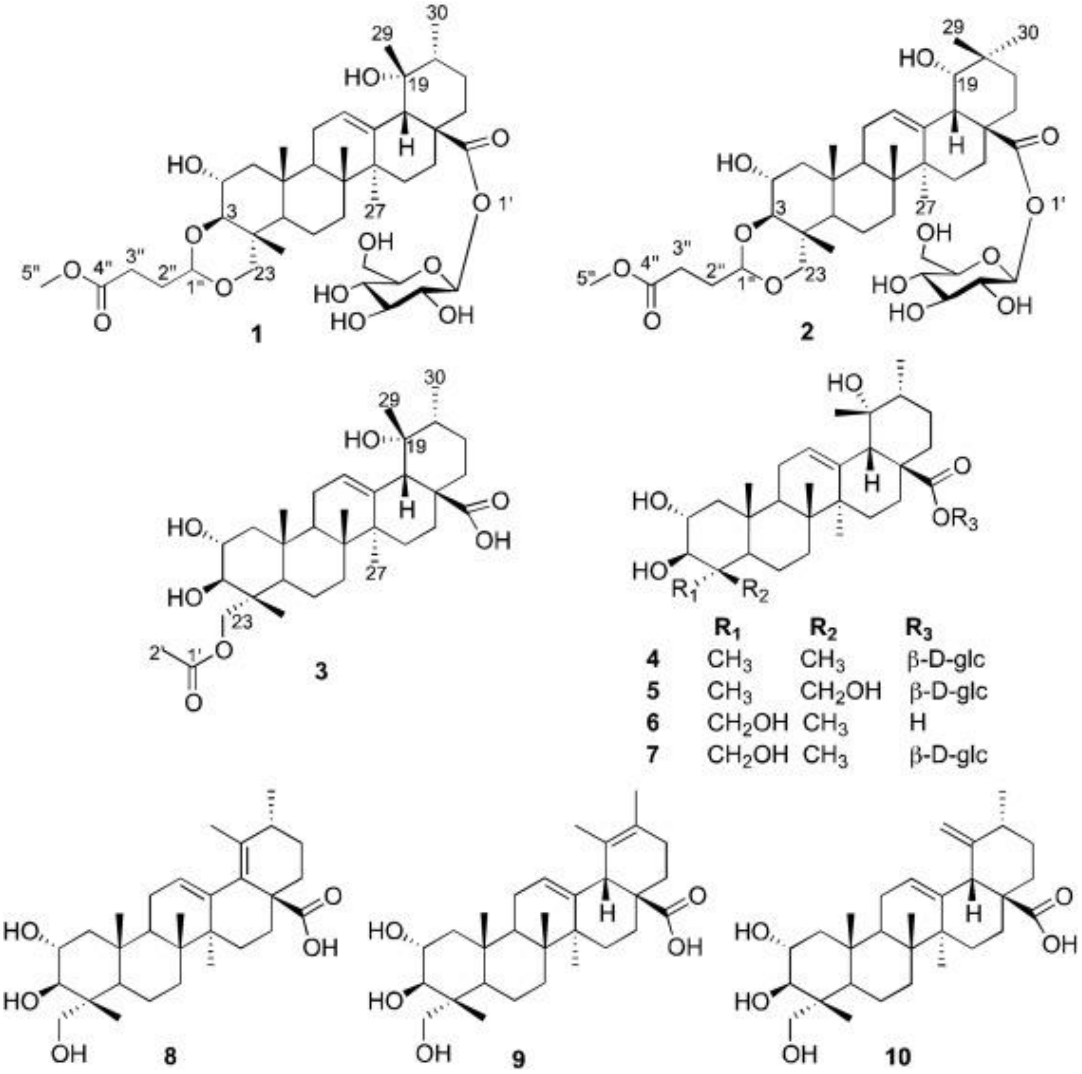


Рис. 3. Структурні формули тритерпенів жолудів Quercus serrata
Джерело: [30].

Вивчаються ефекти від введення жолудів і до складу кормів свійських птахів. Вивчено їхню позитивну дію в суміші з кукурудзою на показники зростання бройлерів, характеристики їхньої туші та жирнокислотний склад м'яса [45]. З тверджень практиків-птахівників, борошно з жолудів, яке дають курям, збільшує у них несення яєць; для цього печуть з жолудевого борошна невеликі хлібці й додають їх до корму, попередньо розмочивши у воді [46]. Проведені дослідження з використанням порошку жолудів (*Q. aegilops*) при розведенні звичайного коропа. Годування риб збагаченими кормами покращувало аквакультуру та гемато-біохімічні параметри, такі як збільшення кількості білих та червоних кров'яних тілець, значень гемоглобіну та гематокриту, а також зниження загального холестерину та тригліцеридів [47].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх публікацій показав, що на сьогодні приділяється значна увага питанням використання плодів дуба, як сировини багатоцільового призначення, Але слід зазначити, що дослідження в більшості своїй зосереджені на окремих процесах оброблення жолудів з метою вилучення одного типу речовин і вивченні їхніх властивостей та сфери застосування. Актуальним залишається питання комплексного перероблення жолудів та формування гнучкого підходу до розроблення технологічних схем з урахуванням запиту на кінцеві продукти.

Метою статті є систематизація інформації про сфери використання плодів дуба, про методи вилучення з них сполук та дослідження їхніх властивостей, а також формування сучасних підходів до розроблення схем комплексного перероблення всіх морфологічних частин жолудя з мінімальними відходами.

Виклад основного матеріалу. Переважна більшість процесів перероблення жолудів починається з очищення від чашок і шкаралупи. Плюски (чашки), що формують зовнішній шар навколо частини плоду дуба (діаметр 1,5…1,8 см завдовжки і 0,8…1,5 см завширшки), зазвичай належать до побічних продуктів перероблення, які найчастіше викидаються. Разом з іншими відходами перероблення дубів вони забруднюють навколишнє середовище, тому актуальними були дослідження їхнього складу та властивостей як вторинного матеріального ресурсу. У роботі з висушеними і подрібненими чашками дуба монгольського (*Quercus mongolica*) , поширеного в Азії, екстрагуванням вилучено й охарактеризовано біологічно активні речовини з високою антиоксидатною здатністю. Встановлено оптимальний склад водно-спиртового екстрагента, який забезпечив вилучення найбільшої кількості загальних фенолів, флавоноїдів і танінів з досліджуваних зразків порошку чашок дуба. Екстракти, отримані з використанням 50%-вого водно-спиртового розчину містили найбільші кількості екстрагованих компонентів [48]. Тож при розробленні схеми комплексного перероблення жолудів доцільно на першому етапі процесу включити стадії відділення чашок, їх сушіння, подрібнення та екстрагування водно-спиртовим розчином. Залишок після екстрагування можливо додавати до маси при виготовленні паливних брикетів.

Подальше перероблення плодів, звільнених від чашок, може здійснюватися різними способами, залежно від мети щодо одержання кінцевого продукту. Наприклад, процес вилучення крохмалю для виготовлення традиційного корейського желейного продукту з жолудів, включає низку технологічних операцій, послідовність яких може відрізнятися. Описаний спосіб, у якому не було попередньої стадії очищення від шкаралупи, а видалення терпких сполук (танінів) вимочуванням у холодній воді відбувалося після подрібнення неочищених жолудів [49].

Натомість при очищенні і наступному вилученні танінів, процес можливо прискорити термічним обробленням. Варіння при температурі (85-96 °С) показало кращі результати щодо смакових характеристик отримуваного продукту, ніж кип’ятіння при 100 °С. Жолуді після вилучення дубильних речовин кип’ятінням мали помітно гіркий смак, тоді як при варінні – були солодкуваті. Такий результат можна пояснити взаємодією (зв’язуванням) гірких на смак дубильних речовин з крохмалем жолудів при температурі кипіння.

При дії високих температур і води, крохмалі поглинають воду, що призводить до постійної та незворотної желатинізації і зв'язування дубильних речовин та крохмалю. Тож вилучення танінів кип'ятінням, ймовірно, є не надто ефективним методом вилуговування дубильних речовин [50]. Такі результати варто враховувати при визначенні не лише послідовності технологічних стадій комплексного перероблення жолудів, а і при встановленні технологічних параметрів процесу.

Як зазначалося вище, одержання жолудевої олії може здійснюватися пресовим і екстракційним способами. Отримуванні побічні продукти (макуха і шрот) доцільно переробляти у продукти з доданою вартістю за схемами, аналогічними для традиційних олійних культур. Наприклад, макуха може використовуватися не лише як добавка до кормів свійських тварин і птахів, а також і як сировина для одержання жолудевих білкових ізолятів. Виготовлення останніх безпосередньо з плодів дуба, включає стадії: очищення ядра, подрібнення, вилуговування (вилучення танінів), відділення крохмалю та жиру й одержання кінцевого продукту. У даному процесі відділені від білкового ізоляту компоненти мають бути перероблені і використані як поживні сполуки [32].

Процес виготовлення жолудевого борошна (а точніше жолудевого порошку) залежно від вмісту у сировині дубильних речовин, може відбуватися як зі стадією замочування, так і без неї. Наприклад, жолудеве борошно з *Quercus brantii*, яке використовували для виготовлення кексів, отримували подрібненням ядер після замочування їх протягом 48 годин з періодичною заміною води [51]. А борошно з плодів *Quercus ilex, Quercus suber і Quercus coccifera* для виготовлення зразків печива виготовляли лише подрібненням очищених ядер. Таке борошно було трохи солодким, зовсім не гірким і мало обмежений рівень терпкості, тому його виробництво не потребувало будь-якого попереднього оброблення для видалення танінів [52]. Тож важливе значення для обрання технології перероблення жолудів мають характеристики вихідної сировини, що вказує на потребу її попередніх досліджень.

Таніни мають широкий спектр застосувань, у тому числі і як харчова добавка Е181 (барвник). Присутні в жолудях таніни можна вилучати різними методами, такими як: занурення у воду; термічний, який здійснюється за різних температур; хімічний та ферментативний [42; 50]. Результати досліджень двох методів екстракції: занурення у воду при кімнатній температурі та термічний гідроліз шляхом кип'ятіння показують, що обидва методи екстракції є життєздатними варіантами для отримання танінів, хоча вони знижують вміст деяких важливих мінералів. Тож всі описані вище методи оброблення плодів дуба, де є стадія вилучення танінів, мають враховувати цей процес, як складову комплексного перероблення жолудів.

Висновки. На підставі викладеного матеріалу можемо зробити висновок, що жолуді мають високий потенціал у різних галузях промисловості. Вони є первинною ланкою у відгодівлі свійських тварин і впливають на якість продукції тваринництва. Вилучені з жолудів білки, жири, вуглеводи (крохмаль) використовують для виготовлення хлібобулочних, борошняних кондитерських та макаронних виробів, вони слугують функціональними й технологічними добавками у виробництві молочних, водно-жирових емульсійних продуктів та ін. Порошок жолудів стає поширеним замінником кави і входить до складу кавових напоїв, виробництво яких набуває широкої популярності. Розширюються сфери застосування продуктів перероблення жолудів і у виробництві технічних виробів та фармацевтичних препаратів. Різноманіття дуба супроводжується відмінностями у хімічному складі плодів, що потребує коригування процесу їх перероблення, а іноді введення додаткових технологічних операцій. Все це вказує на необхідність формування гнучкого підходу до розроблення схем комплексного та безвідходного перероблення плодів дуба з отриманням продуктів багатоцільового призначення з доданою вартістю.

Список використаних джерел

1. Wang, Y., Xu, C., Wang, Q., Jiang, Y., Qin. L. (2023). Germplasm Resources of Oaks (Quercus L.) in China: Utilization and Prospects. *Biology*, *12*(1), 76. https://doi.org/10.3390/biology12010076.

2. Ballesteros, D., & Pritchard, H. W. (2020). The cryobiotechnology of oaks: An integration of approaches for the long-term ex situ conservation of quercus species. *Forests*, *11*(12), 1281. https://doi.org/10.3390/f11121281.

3. Szabłowska, E., & Tańska, M. (2024). Acorns as a source of valuable compounds for food and medical applications: A review of quercus species diversity and laboratory studies. *Applied Sciences*, *14*(7), 2799. https://doi.org/10.3390/app14072799.

4. Castro, L. M. G., Ribeiro, T. B., Machado, M., Alexandre, E. M. C., Saraiva, J. A., & Pintado, M. (2022). Unraveling the effect of dehulling methods on the nutritional composition of acorn quercus spp. *Journal of Food Composition and Analysis*, *106*, 104354. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104354.

5. Makhlouf, F. Z., Squeo, G., Barkat, M., Trani, A., & Caponio, F. (2018). Antioxidant activity, tocopherols and polyphenols of acornoil obtained from Quercus species grown in Algeria. *Food Research International*, *114*, 208–213. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.08.010.

6. Martins, R. B., Gouvinhas, I., Nunes, M. C., Ferreira, L. M., Peres, J. A., Raymundo, A., & Barros, A. I. R. N. A. (2022). Acorn flour from holm oak (Quercus rotundifolia): Assessment of nutritional, phenolic, and technological profile. *Current Research in Food Science*. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.11.003.

7. Загальна характеристика лісів України. Державне агенство лісових ресурсів України. https://forest.gov.ua/napryamki-diyalnosti/lisi-ukrayini/zagalna-harakteristika-lisiv-ukrayini.

8. Гордієнко, М. І., Гузь, М. М., Дебринюк, Ю. М., & Маурер, В. М. (2005). *Лісові культури*. Львів: Камула. https://shron1.chtyvo.org.ua/Hordiienko_Mykhailo_Ivanovych/Lisovi_kultury.pdf.

9. Akcan, T., Gökçe, R., Asensio, M., Estévez, M., & Morcuende, D. (2017). Acorn (Quercus spp.) as a novel source of oleic acid and tocopherols for livestock and humans: Discrimination of selected species from Mediterranean forest. *Journal of Food Science and Technology*, *54*(10), 3050–3057. https://doi.org/10.1007/s13197-017-2740-3.

10. Taib, M., Bouyazza, L., & Lyoussi, B. (2020). Acorn oil: Chemistry and functionality. *Journal of Food Quality*, *2020*, 1–11. https://doi.org/10.1155/2020/8898370.

11. Makhlouf, F. Z., Squeo, G., Barkat, M., Pasqualone, A., & Caponio, F. (2019). Comparative study of total phenolic content and antioxidant proprieties of Quercus fruit: flour and oil. *The North African Journal of Food and Nutrition Research*, Vol. 3(5), p.148–155. https://doi.org/10.51745/najfnr.3.5.148-155.

12. Özdikicierler, O., Akcan, T. (2023). Bioactive phytochemicals from acorn (*Quercus* spp.) oil processing by-products. In: Ramadan Hassanien, M.F. (eds) *Bioactive phytochemicals from vegetable oil and oilseed processing by-products*. (p.739–752) Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91381-6_35.

13. Bernardo-Gil, G., Lopes, I. M. G., Casquilho, M., Ribeiro, M. A., Esquível, M. M., & Empis, J. (2007). Supercritical carbon dioxide extraction of acorn oil. *The Journal of Supercritical Fluids, 40*(3), 344–348. https://doi.org/10.1016/j.supflu.2006.07.026.

14. Karabas, H. (2013). Biodiesel production from crude acorn (Quercus frainetto L.) kernel oil: An optimisation process using the Taguchi method. *Renewable Energy*, *53*, 384–388. https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.002.

15. Vilpoux, O. F., & Santos Silveira Junior, J. F. (2023). Global production and use of starch. In *Starchy crops: Morphology, extraction, properties and applications* (pp. 43–66). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90058-4.00014-1.

16. Correia, P. R., Nunes, M. C., & Beirão-da-Costa, M. L. (2013). The effect of starch isolation method on physical and functional properties of Portuguese nut starches. II. Q. rotundifolia Lam. and Q. suber Lam. acorns starches. *Food Hydrocolloids*, *30*(1), 448–455. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.06.014.

17. Taib, M., & Bouyazza, L. (2021). Composition, physicochemical properties, and uses of acorn starch. *Journal of Chemistry*, *2021*, 1–9. https://doi.org/10.1155/2021/9988570.

18. Khaksaar, A. B., Jalali Torshizi, H., & Hamzeh, Y. (2022). Valorization and development of acorn starch as sustainable and high-performance papermaking additive for improving bagasse pulp and paper properties. *Waste and Biomass Valorization*. https://doi.org/10.1007/s12649-022-01912-9.

19. Okamoto, K., Goda, T., Yamada, T., & Nagoshi, M. (2021). Direct ethanol production from xylan and acorn using the starch-fermenting basidiomycete fungus *Phlebia acerina*. *Fermentation, 7*(3), 116. https://doi.org/10.3390/fermentation7030116.

20. Zhang, N., Jiang, J. C., Yang, J., et al. (2019). Citric acid production from acorn starch by tannin tolerance mutant *Aspergillus niger* AA120. *Applied Biochemistry and Biotechnology, 188*, 1–11. https://doi.org/10.1007/s12010-018-2902-4.

21. Li, S., Xia, J., Xu, Y., Yang, X., Mao, W., & Huang, K. (2016). Preparation and characterization of acorn starch/poly (lactic acid) composites modified with functionalized vegetable oil derivatives. *Carbohydrate Polymers, 142*, 250–258. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.01.031.

22. Chi, W., Ning, Y., Liu, W., Liu, R., Li, J., & Wang, L. (2023). Development of a glue- and heat-sealable acorn kernel meal/κ-carrageenan composite film with high haze and UV-shielding for packaging grease. *Industrial Crops and Products, 204*(Part A), 117250. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117250.

23. Monteiro, V., Soares, C., Grosso, C., Delerue-Matos, C., & Ramalhosa, M. J. (2023). From forest to table: Optimizing the nutritional value of acorns through effective tannin extraction. *Biology and Life Sciences Forum, 26*(1), 16. https://doi.org/10.3390/Foods2023-15036.

24. Xu, J., Cao, J., Yue, J., Zhang, X., & Zhao, Y. (2018). New triterpenoids from acorns of Quercus liaotungensis and their inhibitory activity against α -glucosidase, α -amylase and protein-tyrosine phosphatase 1B. *Journal of Functional Foods*, *41*, 232–239. https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.12.054.

25. Šćiban, M., Klašnja, M., Antov, M., & Škrbić, B. (2009). Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from chestnut and acorn. *Bioresource Technology*, *100*(24), 6639–6643. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.047.

26. Antov, M. G., Šćiban, M. B., Prodanović, J. M., Kukić, D. V., Vasić, V. M., Đorđević, T. R., & Milošević, M. M. (2018). Common oak (Quercus robur) acorn as a source of natural coagulants for water turbidity removal. *Industrial Crops and Products*, *117*, 340–346. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.022.

27. Ibrahim, A., Yaser, A. Z., & Lamaming, J. (2020). Synthesising tannin-based coagulants for water and wastewater application: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 105007. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105007.

28. Onem, E., Gulumser, G., Akay, S., & Yesil-Celiktas, O. (2014). Optimization of tannin isolation from acorn and application in leather processing. *Industrial Crops and Products*, *53*, 16–22. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.12.014.

29. Taib, M., Rezzak, Y., Bouyazza, L., & Lyoussi, B. (2020). Medicinal uses, phytochemistry, and pharmacological activities of quercus species. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, *2020*, 1–20. https://doi.org/10.1155/2020/1920683.

30. Huang, J., Wang, Y., Li, C., Wang, X., & He, X. (2016). Triterpenes isolated from acorns of Quercus serrata var. brevipetiolata exert anti-inflammatory activity. *Industrial Crops and Products*, *91*, 302–309. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.07.033.

31. Lei, Y., Huang, Y., Wang, Y., & He, X. (2018). Potential anti-neuroinflammatory triterpenoids isolated from chinese acorns (quercus serrata var. brevipetiolata). *Journal of Functional Foods*, *50*, 18–25. https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.09.022.

32. Naderi, B., Keramat, J., Nasirpour, A., & Aminifar, M. (2020). Complex coacervation between oak protein isolate and gum Arabic: Optimization & functional characterization. *International Journal of Food Properties*, *23*(1), 1854–1873. https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1825484.

33. Sekeroglu, N., Ozkutlu, F., & Kilic, E. (2017). Mineral composition of acorn coffees. *Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research, 51*(3), 504–507. https://doi.org/10.5530/ijper.51.3s.75.

34. Coelho, M., Silva, S., Rodríguez-Alcalá, L. M., Oliveira, A., Costa, E. M., Borges, A., Martins, C., Rodrigues, A. S., & Pintado, M. M. E. (2017). Quercus based coffee-like beverage: Effect of roasting process and functional characterization. *Journal of Food Measurement and Characterization*, *12*(1), 471–479. https://doi.org/10.1007/s11694-017-9660-9.

35. Allouch, M., Alami, M., & Boukhlifi, F. (2015). Production of fuel briquettes from acorn shells and acorn cups. In *Proceedings of the 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)* (pp. 1–7). IEEE. https://doi.org/10.1109/IRSEC.2015.7455026.

36. Іващук, О. С., Атаманюк, В. М., Чижович, Р. А., Манастирська, В. А., Барабах, С. А., & Собечко, І. Б. (2024). Дослідження використання жолудів дубу звичайного для виготовлення альтернативного твердого палива. *Journal of Chemistry and Technologies*, *32*(3), 599–604. https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i3.304213.

37. Nieto, R., Rivera, M., García, M. A., & Aguilera, J. F. (2002). Amino acid availability and energy value of acorn in the Iberian pig. *Livestock Production Science*, *77*(2-3), 227–239. https://doi.org/10.1016/s0301-6226(02)00040-4.

38. Rodríguez-Estévez, V., García, A., & Gómez-Castro, A. G. (2009). Intrinsic factors of acorns that influence the efficiency of their consumption by Iberian pigs. *Livestock Science*, *122*(2-3), 281–285. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2008.09.011.

39. Flores, P. G. (2023). Quality of pork meat fed with acorns (*Quercus* spp.). In *Nut crops – New insights*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.108867.

40. Sun, Z., Liu, D., An, S., Wu, X., Zhang, J., & Miao, Z. (2024). Effects of acorns on fatty acid composition and lipid metabolism in adipose tissue of yuxi black pigs. *Animals*, *14*(22), 3271. https://doi.org/10.3390/ani14223271.

41. Mohammadabadi, T., Azadi, M. S., & Babaei, M. (2020). Effect of diets containing oak kernel on the rumen fermentation and digestibility, blood metabolites and liver enzymes in Khuzestani buffalo. *The Indian Journal of Animal Sciences*, *90*(5), 734–738. https://doi.org/10.56093/ijans.v90i5.104616.

42. Sahi, S., Ouennes, H., Bayoud, A., & Boukraa, M. (2022). Effect of incorporating holm oak acorn in the feed of "Saanen" breed dairy goats in the wilaya of Batna. *Livestock Research for Rural Development, 34*, Article 96. http://www.lrrd.org/lrrd34/10/3496same.html.

43. Mekki, I., Smeti, S., Hajji, H., Mahouachi, M., & Atti, N. (2022). Effects of green oak acorn (<i>Quercus ilex</i>) intake on nutrient digestibility, lamb growth, and carcass and non-carcass characteristics. *Archives Animal Breeding*, *65*(1), 113–120. https://doi.org/10.5194/aab-65-113-2022.

44. Wolf, P., & Cappai, M. G. (2020). Response of fattening rabbits with acorns (quercus pubescens willd.) combined in the diet: First acquaintances on growth performance, carcass traits and perirenal fatty acid profile. *Animals*, *10*(8), 1394. https://doi.org/10.3390/ani10081394.

45. Bouderoua, K., Mourot, J., & Selselet-Attou, G. (2009). The effect of green oak acorn (*Quercus ilex*)-based diet on growth performance and meat fatty acid composition. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 22*(6), 843–848. https://doi.org/10.5713/ajas.2009.80571.

46. Подвальна О.О., Шаран А.В. (2017) Екструдування нетрадиційної крохмалевмісної сировини, *Молодий вчений*, *1*, 59-63. http://nbuv.gov.ua/UJRN/molv_2017_1_17

47. Abdel-Tawwab, M., Abdulrahman, N. M., Ahmad, V. M., Ramzi, D. O. M., & Hassan, B. R. (2021). Effects of dietary oak (Quercus aegilops L.) acorn on growth performance, somatic indices, and hemato-biochemical responses of common carp, Cyprinus carpio L., at different stocking densities. *Journal of Applied Aquaculture*, 1–17. https://doi.org/10.1080/10454438.2021.1902450.

48. Yin, P., Yang, L., Li, K., Fan, H., Xue, Q., Li, X., Sun, L., & Liu, Y. (2019). Bioactive components and antioxidant activities of oak cup crude extract and its four partially purified fractions by HPD-100 macroporous resin chromatography. *Arabian Journal of Chemistry*, *12*(2), 249–261. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.09.018.

49. An, T., Tang, M., & An, J. (2022). Ethnological approach to acorn utilization in prehistory: A case study of acorn mook making in South Korea. *Frontiers in Plant Science*, *13*. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.996649.

50. Hanson, K. E., Bryant, P. L., Painter, A. M., & Skibo, J. M. (2019). Acorn processing and pottery use in the upper great lakes: An experimental comparison of stone boiling and ceramic technology. *Ethnoarchaeology*, *11*(2), 170–185. https://doi.org/10.1080/19442890.2019.1642574.

51. Sasani, N., Kazemi, A., Babajafari, S., Amiri-Ardekani, E., Rezaiyan, M., Barati-Boldaji, R., Mazloomi, S. M., Cain, C. T., Clark, A., & Ashrafi-Dehkordi, E. (2023). The nutritional value and functional properties of acorn flour: A systematic review. *Food Science & Nutrition, 11*(2), 883–891. https://doi.org/10.1002/fsn3.3123.

52. Pasqualone, A., Makhlouf, F. Z., Barkat, M., Difonzo, G., Summo, C., Squeo, G., & Caponio, F. (2019). Effect of acorn flour on the physico-chemical and sensory properties of biscuits. *Heliyon*, *5*(8), e02242. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02242.

References

1. Wang, Y., Xu, C., Wang, Q., Jiang, Y., Qin. L. (2023). Germplasm Resources of Oaks (Quercus L.) in China: Utilization and Prospects. *Biology*, *12*(1), 76. https://doi.org/10.3390/biology12010076.

2. Ballesteros, D., & Pritchard, H. W. (2020). The cryobiotechnology of oaks: An integration of approaches for the long-term ex situ conservation of quercus species. *Forests*, *11*(12), 1281. https://doi.org/10.3390/f11121281.

3. Szabłowska, E., & Tańska, M. (2024). Acorns as a source of valuable compounds for food and medical applications: A review of quercus species diversity and laboratory studies. *Applied Sciences*, *14*(7), 2799. https://doi.org/10.3390/app14072799.

4. Castro, L. M. G., Ribeiro, T. B., Machado, M., Alexandre, E. M. C., Saraiva, J. A., & Pintado, M. (2022). Unraveling the effect of dehulling methods on the nutritional composition of acorn quercus spp. *Journal of Food Composition and Analysis*, *106*, 104354. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104354.

5. Makhlouf, F. Z., Squeo, G., Barkat, M., Trani, A., & Caponio, F. (2018). Antioxidant activity, tocopherols and polyphenols of acornoil obtained from Quercus species grown in Algeria. *Food Research International*, *114*, 208–213. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.08.010.

6. Martins, R. B., Gouvinhas, I., Nunes, M. C., Ferreira, L. M., Peres, J. A., Raymundo, A., & Barros, A. I. R. N. A. (2022). Acorn flour from holm oak (Quercus rotundifolia): Assessment of nutritional, phenolic, and technological profile. *Current Research in Food Science*. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.11.003.

7. Derzhavne ahenstvo lisovykh resursiv Ukrainy [State Agency of Forest Resources of Ukraine]. (n.d.). Zahalna kharakterystyka lisiv Ukrainy – General characteristics of the forests of Ukraine. https://forest.gov.ua/napryamki-diyalnosti/lisi-ukrayini/zagalna-harakteristika-lisiv-ukrayini.

8. Hordiienko, M. I., Huz, M. M., Debryniuk, Yu. M., & Maurer, V. M. (2005). *Lisovi kultury [Forest crops]*.

9. Akcan, T., Gökçe, R., Asensio, M., Estévez, M., & Morcuende, D. (2017). Acorn (Quercus spp.) as a novel source of oleic acid and tocopherols for livestock and humans: Discrimination of selected species from Mediterranean forest. *Journal of Food Science and Technology*, *54*(10), 3050–3057. https://doi.org/10.1007/s13197-017-2740-3.

10. Taib, M., Bouyazza, L., & Lyoussi, B. (2020). Acorn oil: Chemistry and functionality. *Journal of Food Quality*, *2020*, 1–11. https://doi.org/10.1155/2020/8898370.

11. Makhlouf, F. Z., Squeo, G., Barkat, M., Pasqualone, A., & Caponio, F. (2019). Comparative study of total phenolic content and antioxidant proprieties of Quercus fruit: flour and oil. *The North African Journal of Food and Nutrition Research*, Vol. 3(5), p.148–155. https://doi.org/10.51745/najfnr.3.5.148-155.

12. Özdikicierler, O., Akcan, T. (2023). Bioactive phytochemicals from acorn (*Quercus* spp.) oil processing by-products. In: Ramadan Hassanien, M.F. (eds) *Bioactive phytochemicals from vegetable oil and oilseed processing by-products*. (p.739–752) Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91381-6_35.

13. Bernardo-Gil, G., Lopes, I. M. G., Casquilho, M., Ribeiro, M. A., Esquível, M. M., & Empis, J. (2007). Supercritical carbon dioxide extraction of acorn oil. *The Journal of Supercritical Fluids, 40*(3), 344–348. https://doi.org/10.1016/j.supflu.2006.07.026.

14. Karabas, H. (2013). Biodiesel production from crude acorn (Quercus frainetto L.) kernel oil: An optimisation process using the Taguchi method. *Renewable Energy*, *53*, 384–388. https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.002.

15. Vilpoux, O. F., & Santos Silveira Junior, J. F. (2023). Global production and use of starch. In *Starchy crops: Morphology, extraction, properties and applications* (pp. 43–66). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90058-4.00014-1.

16. Correia, P. R., Nunes, M. C., & Beirão-da-Costa, M. L. (2013). The effect of starch isolation method on physical and functional properties of Portuguese nut starches. II. Q. rotundifolia Lam. and Q. suber Lam. acorns starches. *Food Hydrocolloids*, *30*(1), 448–455. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.06.014.

17. Taib, M., & Bouyazza, L. (2021). Composition, physicochemical properties, and uses of acorn starch. *Journal of Chemistry*, *2021*, 1–9. https://doi.org/10.1155/2021/9988570.

18. Khaksaar, A. B., Jalali Torshizi, H., & Hamzeh, Y. (2022). Valorization and development of acorn starch as sustainable and high-performance papermaking additive for improving bagasse pulp and paper properties. *Waste and Biomass Valorization*. https://doi.org/10.1007/s12649-022-01912-9.

19. Okamoto, K., Goda, T., Yamada, T., & Nagoshi, M. (2021). Direct ethanol production from xylan and acorn using the starch-fermenting basidiomycete fungus *Phlebia acerina*. *Fermentation, 7*(3), 116. https://doi.org/10.3390/fermentation7030116.

20. Zhang, N., Jiang, J. C., Yang, J., et al. (2019). Citric acid production from acorn starch by tannin tolerance mutant *Aspergillus niger* AA120. *Applied Biochemistry and Biotechnology, 188*, 1–11. https://doi.org/10.1007/s12010-018-2902-4.

21. Li, S., Xia, J., Xu, Y., Yang, X., Mao, W., & Huang, K. (2016). Preparation and characterization of acorn starch/poly (lactic acid) composites modified with functionalized vegetable oil derivatives. *Carbohydrate Polymers, 142*, 250–258. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.01.031.

22. Chi, W., Ning, Y., Liu, W., Liu, R., Li, J., & Wang, L. (2023). Development of a glue- and heat-sealable acorn kernel meal/κ-carrageenan composite film with high haze and UV-shielding for packaging grease. *Industrial Crops and Products, 204*(Part A), 117250. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117250.

23. Monteiro, V., Soares, C., Grosso, C., Delerue-Matos, C., & Ramalhosa, M. J. (2023). From forest to table: Optimizing the nutritional value of acorns through effective tannin extraction. *Biology and Life Sciences Forum, 26*(1), 16. https://doi.org/10.3390/Foods2023-15036.

24. Xu, J., Cao, J., Yue, J., Zhang, X., & Zhao, Y. (2018). New triterpenoids from acorns of Quercus liaotungensis and their inhibitory activity against α -glucosidase, α -amylase and protein-tyrosine phosphatase 1B. *Journal of Functional Foods*, *41*, 232–239. https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.12.054.

25. Šćiban, M., Klašnja, M., Antov, M., & Škrbić, B. (2009). Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from chestnut and acorn. *Bioresource Technology*, *100*(24), 6639–6643. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.047.

26. Antov, M. G., Šćiban, M. B., Prodanović, J. M., Kukić, D. V., Vasić, V. M., Đorđević, T. R., & Milošević, M. M. (2018). Common oak (Quercus robur) acorn as a source of natural coagulants for water turbidity removal. *Industrial Crops and Products*, *117*, 340–346. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.022.

27. Ibrahim, A., Yaser, A. Z., & Lamaming, J. (2020). Synthesising tannin-based coagulants for water and wastewater application: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 105007. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105007.

28. Onem, E., Gulumser, G., Akay, S., & Yesil-Celiktas, O. (2014). Optimization of tannin isolation from acorn and application in leather processing. *Industrial Crops and Products*, *53*, 16–22. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.12.014.

29. Taib, M., Rezzak, Y., Bouyazza, L., & Lyoussi, B. (2020). Medicinal uses, phytochemistry, and pharmacological activities of quercus species. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, *2020*, 1–20. https://doi.org/10.1155/2020/1920683.

30. Huang, J., Wang, Y., Li, C., Wang, X., & He, X. (2016). Triterpenes isolated from acorns of Quercus serrata var. brevipetiolata exert anti-inflammatory activity. *Industrial Crops and Products*, *91*, 302–309. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.07.033.

31. Lei, Y., Huang, Y., Wang, Y., & He, X. (2018). Potential anti-neuroinflammatory triterpenoids isolated from chinese acorns (quercus serrata var. brevipetiolata). *Journal of Functional Foods*, *50*, 18–25. https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.09.022.

32. Naderi, B., Keramat, J., Nasirpour, A., & Aminifar, M. (2020). Complex coacervation between oak protein isolate and gum Arabic: Optimization & functional characterization. *International Journal of Food Properties*, *23*(1), 1854–1873. https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1825484.

33. Sekeroglu, N., Ozkutlu, F., & Kilic, E. (2017). Mineral composition of acorn coffees. *Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research, 51*(3), 504–507. https://doi.org/10.5530/ijper.51.3s.75.

34. Coelho, M., Silva, S., Rodríguez-Alcalá, L. M., Oliveira, A., Costa, E. M., Borges, A., Martins, C., Rodrigues, A. S., & Pintado, M. M. E. (2017). Quercus based coffee-like beverage: Effect of roasting process and functional characterization. *Journal of Food Measurement and Characterization*, *12*(1), 471–479. https://doi.org/10.1007/s11694-017-9660-9.

35. Allouch, M., Alami, M., & Boukhlifi, F. (2015). Production of fuel briquettes from acorn shells and acorn cups. In *Proceedings of the 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)* (pp. 1–7). IEEE. https://doi.org/10.1109/IRSEC.2015.7455026.

36. Ivashchuk, O. S., Atamaniuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Manastyrska, V. A., Barabakh, S. A., & Sobechko, I. B. (2024). Doslidzhennia vykorystannia zholudiv dubu zvychainoho dlia vyhotovlennia alternatyvnoho tverdoho palyva [Doslidzhennia vykorystannia zholudiv dubu zvychainoho dlia vykorystannia alternativnoho tverdoho palyva.] *Journal of Chemistry and Technologies*, *32*(3), 599–604. https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i3.304213.

37. Nieto, R., Rivera, M., García, M. A., & Aguilera, J. F. (2002). Amino acid availability and energy value of acorn in the Iberian pig. *Livestock Production Science*, *77*(2-3), 227–239. https://doi.org/10.1016/s0301-6226(02)00040-4.

38. Rodríguez-Estévez, V., García, A., & Gómez-Castro, A. G. (2009). Intrinsic factors of acorns that influence the efficiency of their consumption by Iberian pigs. *Livestock Science*, *122*(2-3), 281–285. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2008.09.011.

39. Flores, P. G. (2023). Quality of pork meat fed with acorns (*Quercus* spp.). In *Nut crops – New insights*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.108867.

40. Sun, Z., Liu, D., An, S., Wu, X., Zhang, J., & Miao, Z. (2024). Effects of acorns on fatty acid composition and lipid metabolism in adipose tissue of yuxi black pigs. *Animals*, *14*(22), 3271. https://doi.org/10.3390/ani14223271.

41. Mohammadabadi, T., Azadi, M. S., & Babaei, M. (2020). Effect of diets containing oak kernel on the rumen fermentation and digestibility, blood metabolites and liver enzymes in Khuzestani buffalo. *The Indian Journal of Animal Sciences*, *90*(5), 734–738. https://doi.org/10.56093/ijans.v90i5.104616.

42. Sahi, S., Ouennes, H., Bayoud, A., & Boukraa, M. (2022). Effect of incorporating holm oak acorn in the feed of "Saanen" breed dairy goats in the wilaya of Batna. *Livestock Research for Rural Development, 34*, Article 96. http://www.lrrd.org/lrrd34/10/3496same.html.

43. Mekki, I., Smeti, S., Hajji, H., Mahouachi, M., & Atti, N. (2022). Effects of green oak acorn (<i>Quercus ilex</i>) intake on nutrient digestibility, lamb growth, and carcass and non-carcass characteristics. *Archives Animal Breeding*, *65*(1), 113–120. https://doi.org/10.5194/aab-65-113-2022.

44. Wolf, P., & Cappai, M. G. (2020). Response of fattening rabbits with acorns (quercus pubescens willd.) combined in the diet: First acquaintances on growth performance, carcass traits and perirenal fatty acid profile. *Animals*, *10*(8), 1394. https://doi.org/10.3390/ani10081394.

45. Bouderoua, K., Mourot, J., & Selselet-Attou, G. (2009). The effect of green oak acorn (*Quercus ilex*)-based diet on growth performance and meat fatty acid composition. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 22*(6), 843–848. https://doi.org/10.5713/ajas.2009.80571.

46. Подвальна О.О., Шаран А.В. (2017) Екструдування нетрадиційної крохмалевмісної сировини, *Молодий вчений*, *1*, 59-63. http://nbuv.gov.ua/UJRN/molv_2017_1_17

47. Abdel-Tawwab, M., Abdulrahman, N. M., Ahmad, V. M., Ramzi, D. O. M., & Hassan, B. R. (2021). Effects of dietary oak (Quercus aegilops L.) acorn on growth performance, somatic indices, and hemato-biochemical responses of common carp, Cyprinus carpio L., at different stocking densities. *Journal of Applied Aquaculture*, 1–17. https://doi.org/10.1080/10454438.2021.1902450.

48. Yin, P., Yang, L., Li, K., Fan, H., Xue, Q., Li, X., Sun, L., & Liu, Y. (2019). Bioactive components and antioxidant activities of oak cup crude extract and its four partially purified fractions by HPD-100 macroporous resin chromatography. *Arabian Journal of Chemistry*, *12*(2), 249–261. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.09.018.

49. An, T., Tang, M., & An, J. (2022). Ethnological approach to acorn utilization in prehistory: A case study of acorn mook making in South Korea. *Frontiers in Plant Science*, *13*. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.996649.

50. Hanson, K. E., Bryant, P. L., Painter, A. M., & Skibo, J. M. (2019). Acorn processing and pottery use in the upper great lakes: An experimental comparison of stone boiling and ceramic technology. *Ethnoarchaeology*, *11*(2), 170–185. https://doi.org/10.1080/19442890.2019.1642574.

51. Sasani, N., Kazemi, A., Babajafari, S., Amiri-Ardekani, E., Rezaiyan, M., Barati-Boldaji, R., Mazloomi, S. M., Cain, C. T., Clark, A., & Ashrafi-Dehkordi, E. (2023). The nutritional value and functional properties of acorn flour: A systematic review. *Food Science & Nutrition, 11*(2), 883–891. https://doi.org/10.1002/fsn3.3123.

52. Pasqualone, A., Makhlouf, F. Z., Barkat, M., Difonzo, G., Summo, C., Squeo, G., & Caponio, F. (2019). Effect of acorn flour on the physico-chemical and sensory properties of biscuits. *Heliyon*, *5*(8), e02242. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02242.

Дата першого надходження статті до видання: 05.01.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.01.2026

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

UDC 634.0.8:664:66.0

Tetiana Filinska[1], Tetyana Kovalchuk,[2]Antonina Filinska[3], Oleh Chervakov[4], Dmytro Filinskyi [5], Sergii Pavliuk[6]

[1]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products Ukrainian State University of Science and Technology (Dnipro, Ukraine)
E-mail: f111nskaya@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0009-7921-1989

[2]PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Bioresources, Animal Husbandry and Aquaculture Polesie National University (Zhytomyr, Ukraine)
E-mail: tanyana72@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-8682-3280

[3]senior lecturer of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products Ukrainian State University of Science and Technology (Dnipro, Ukraine)
E-mail: antoniyafilin@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0001-6975-6186

[4]Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of department of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products Ukrainian State University of Science and Technology, Educational and Scientific Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology" (Dnipro, Ukraine)
E-mail: ochervakov@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1631-3592

[5]postgraduate of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products Ukrainian State University of Science and Technology (Dnipro, Ukraine)
E-mail: filinskyi.dmytro@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0003-6301-0695

[6]postgraduate of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products Ukrainian State University of Science and Technology (Dnipro, Ukraine)
E-mail: serpik07@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0004-7615-963X

OAK FRUITS – A PROMISING RAW MATERIAL FOR FOOD AND TECHNICAL PURPOSES

All morphological parts of the oak tree, including fruit, bark, wood and leaves, have many uses. Acorns are rich in nutrients, making them an important raw material resource. Since ancient times, oak fruits have been a valuable food product and today have great potential for use in various industries.

Acorn flour is an important gluten-free component of bakery, flour confectionery and pasta products. Acorn starch can be used not only for food purposes, but also find application in the production of bioethanol, in paper production, in the manufacture of composites and polymer films. Acorn extracts exhibit antioxidant properties and are used for medicinal purposes. Oak fruit protein isolates have prospects in the production of food water-fat emulsion products, acorn oil is a source of valuable fatty acids. Acorn drinks - coffee substitutes - are becoming increasingly popular.

The analysis of recent publications has shown that the issue of using oak fruits as a multipurpose raw material is given considerable attention. Scientific research is focused on individual processes, or the study of the properties and areas of application of certain compounds of oak fruits. The work is carried out using advanced research methods, they are characterized by the depth of study of the nutritional and technological characteristics of the resulting acorn products. The predictability of their behavior in multicomponent systems is an important characteristic that affects the technology and implementation of innovations in food production.

An important task is not to implement separate processes for extracting acorn components, but a comprehensive, ecologically and economically justified waste-free processing of oak fruits into food, pharmaceutical and technical products. Solving this task requires systematization of research results and the formation of flexible approaches to the issue of complex processing of oak fruits.

Keywords: *acorns; flour; starch; tannin; oil; protein isolate.*

Fig.: 3. References: 52.

Філінська Т. Г., Ковальчук Т. І., Філінська А. О., Черваков О. В., Філінський Д. Г., Павлюк С. К. Плоди дуба – перспективна сировина харчового і технічного призначення. *Технічні науки та технології.* 2026. № 2(44). С. 345-365. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-345-365.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-366-388
УДК 66.047.57:66.011.4:661.872.953:519.863

Вячеслав Леонідович Кірний[1], Микола Петрович Юхименко[2]

[1]аспірант кафедри хімічної інженерії
Сумський державний університет (Суми, Україна)
E-mail: v.kirnyi@pohnp.sumdu.edu.ua. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0003-1490-0600

[2]кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічної інженерії
Сумський державний університет (Суми, Україна)
E-mail: m.yukhymenko@pohnp.sumdu.edu.ua. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-1405-1269

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ДЕГІДРАТАЦІЇ ЗАЛІЗА(II) СУЛЬФАТ ГЕПТАГІДРАТУ В БАГАТОСЕКЦІЙНОМУ АПАРАТІ КИПЛЯЧОГО ШАРУ

Розроблено математичну модель процесу термічної дегідратації кристалогідратів на прикладі заліза(II) сульфат гептагідрату в горизонтальному багатосекційному апараті киплячого шару. Запропонована модель враховує кінетику реакції, термічну усадку частинок та їх винесення газовим потоком. Досліджено вплив теплових і гідродинамічних параметрів на ефективність процесу. За допомогою розробленого алгоритму визначено оптимальні режими подачі теплоносія по секціях. Доведено, що керування швидкістю та температурою газу по довжині апарата дозволяє мінімізувати енерговитрати та запобігти термічній деструкції цільового продукту.

Ключові слова: *дегідратація; залізний купорос; киплячий шар; секціонований апарат; математичне моделювання; багатокритеріальна оптимізація.*

Рис.: 7. Табл.: 1. Бібл.: 31.

Актуальність теми дослідження. Білий пігментний діоксид титану є одним із найважливіших неорганічних матеріалів у сучасній промисловості, світовий попит на який демонструє стабільне щорічне зростання. Попри інтенсивний розвиток хлоридної технології, сульфатний спосіб виробництва діоксиду титану досі утримує близько 45 % світових потужностей. Одним із головних недоліків цієї технології є утворення значних обсягів побічних відходів, домінуючу частку яких становить залізо(II) сульфат гептагідрат ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$), відомий як залізний купорос. Зважаючи на багаторічну експлуатацію заводів, у світі накопичені значні обсяги залізного купоросу, що створює серйозні екологічні ризики у вигляді забруднення ґрунтів та ґрунтових вод кислотними стоками. Існують різні технологічні напрямки перероблення та валоризації відходів купоросу [1]. Основними промисловими сегментами є виробництво коагулянтів для очищення стічних вод та питної води, виробництво червоних, жовтих, чорних залізоокисних пігментів, цементна промисловість, сільське господарство та кормовиробництво, але вологий купорос схильний до злежування та малопридатний для точного дозування. Тому найбільш масовим та енергоефективним шляхом вирішення проблеми для багатьох сфер промисловості є термічна дегідратація до стабільної форми моногідрату сульфату заліза ($FeSO_4 \cdot H_2O$).

Постановка проблеми. Термічна дегідратація залізного купоросу є складним фізико-хімічним процесом через яскраво виражену термолабільність кристалогідрата при досягненні температури 64-68 °C [2]. Матеріал починає плавитися у власній кристалізаційній воді, що призводить до інтенсивної агломерації, налипання на стінки обладнання та повної зупинки технологічного процесу. Схожі механізми притаманні для широкого спектра промислових неорганічних кристалогідратів, наприклад, натрій сульфат декагідрату [3] ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$, сіль Глаубера), який інконгруентно плавиться у власній воді вже при 32,4 °C, магній сульфат гептагідрату ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) та мідь сульфат пентагідрату ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) [4]. Це накладає жорсткі обмеження на вибір гідродинамічного режиму та температурного профілю сушіння, вимагаючи точного контролю за кінетикою масо- та теплообміну.

Класичне апаратурне оформлення процесу сушіння великотоннажних сипучих матеріалів часто базується на використанні конвективних барабанних сушарок. Однак для перероблення термолабільних кристалогідратів такі апарати виявляються малоефективними. Низький коефіцієнт заповнення барабана та тривалий час контакту матеріалу з

© В. Л. Кірний, М. П. Юхименко, 2026

високотемпературними теплоносіями й нагрітими стінками неминуче призводять до локальних перегрівів, часткового плавлення матеріалу та утворення масивних налипань [5]. Ефективною альтернативою конвективному сушінню в перемішуваних шарах є метод фільтраційного сушіння у стаціонарному шарі [6]. Експериментальні дослідження гідродинаміки та кінетики процесу дегідратації залізного купоросу фільтраційним методом [7] довели ефективність цього підходу завдяки рівномірному пронизуванню нерухомого шару матеріалу тепловим агентом при жорстко контрольованих швидкостях та температурах. Метод гарантує збереження первинної кристалічної структури продукту без його агломерації. Важливою перевагою стаціонарного шару є також мінімізація механічної руйнації частинок та відсутність вторинного пилоутворення.

Водночас при проєктуванні хіміко-технологічних систем для безперервного перероблення промислових обсягів матеріалу виникає потреба в інтенсифікації міжфазного обміну. У таких випадках широкого застосування набувають апарати з псевдозрідженим (киплячим) шаром [8]. Вони забезпечують максимально розвинену площу міжфазної поверхні та інтенсивне перемішування, що сприяє миттєвому вирівнюванню температурних градієнтів та запобігає локальним перегрівам частинок. Проте традиційні вертикальні циліндричні сушарки киплячого шару безперервної дії працюють у гідродинамічному режимі, наближеному до ідеального змішування для твердої фази [8]. Це зумовлює надзвичайно широкий розподіл часу перебування частинок (Residence time distribution, RTD) в апараті. Як наслідок, частина матеріалу залишає апарат передчасно у недосушеному стані, тоді як інша частина перебуває в зоні високих температур надто довго, зазнаючи термічної деструкції або небажаних фазових перетворень. Для забезпечення стабільної якості цільового продукту критично важливим є контроль часу перебування частинок та оптимізація профілю підведення теплоти. Оптимальним інженерним рішенням для таких систем є використання багатосекційних горизонтальних апаратів киплячого шару [9]. Завдяки секціонуванню поздовжній рух дисперсного матеріалу наближається до гідродинамічного режиму ідеального витіснення, що радикально звужує RTD дисперсної фази та гарантує рівномірність обробки всієї маси продукту. Крім того, наявність автономних газорозподільних камер дозволяє реалізувати зонний градієнтний підхід до термообробки: подавати теплоносій з різною температурою та швидкістю в кожну секцію. Це створює умови для «м’якої» дегідратації на початкових стадіях у зоні максимальної вологості, де ризик плавлення найвищий та інтенсивного досушування на фінальних етапах, що дозволяє максимізувати ексергетичну ефективність процесу та уникнути недоліків як перегріву, так і недосушування матеріалу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Моделювання та оптимізація процесів сушіння у псевдозрідженому шарі є предметом інтенсивних досліджень. Незважаючи на значний прогрес у розумінні гідродинаміки та тепломасообміну дисперсних систем [8; 10], термообробка кристалогідратів, зокрема залізного купоросу, залишається складною інженерною задачею. Більшість існуючих математичних моделей сушіння зосереджена на процесах видалення вільної поверхневої або капілярно-зв’язаної вологи. Однак дегідратація кристалогідратів має принципово іншу фізико-хімічну природу – це ендотермічна хімічна реакція розкладання твердого тіла, кінетика якого супроводжується перебудовою кристалічної ґратки [4]. Сучасні кінетичні дослідження доводять, що використання спрощених емпіричних моделей швидкості сушіння для таких матеріалів призводить до критичних похибок у визначенні локальних температурних профілів та не дозволяє коректно передбачити момент фазового переходу плавлення [11]. Для адекватного опису таких систем необхідно застосування моделі стиснення ядра (Shrinking core model, SCM), яка враховує дифузійний термічний опір шару нижніх гідратів (скоринки), що формується на поверхні частинки [12].

Іншою проблемою є математичний опис безперервних апаратів киплячого шару. Основа 1D–моделювання таких систем представлена в роботі [13]. У ній показана можливість використання систем звичайних диференціальних рівнянь для розрахунку локальних параметрів. Для горизонтальних сушарок, де повздовжнє переміщування твердої фази мінімізується за рахунок геометрії або секціонування, виправданим є застосування моделі ідеального витіснення для матеріалу [9; 14]. У роботі [15] представлено 1D–модель витіснення для безперервного сушіння зерна та підтверджено її високу точність та низькі обчислювальні витрати порівняно з повноцінними 3D CFD–симуляціями. Проте слабким місцем існуючих 1D–моделей є статичний підхід до врахування полідисперсності та еволюції гранулометричного складу. У більшості інженерних розрахунків еквівалентний діаметр частинок приймається як статична константа [8]. Сучасні експериментальні дослідження, зокрема із застосуванням інфрачервоної термографії, доводять інтенсивну сегрегацію в полідисперсних шарах [16]. Внаслідок термічної усадки та винесення пилу газовим потоком дисперсний склад безперервно змінюється вздовж апарату. Для врахування цієї динаміки застосовуються [17] рівняння популяційного балансу (Population balance modeling, PBM), але їх інтеграція з жорсткою хімічною кінетикою вимагає значних обчислювальних ресурсів, що унеможливлює використання таких моделей для ітераційної багатокритеріальної оптимізації режимів.

З іншого боку, сучасне проєктування вимагає пошуку ефективних режимів на основі ексергетичного аналізу [5; 18], а у випадку багатосекційних апаратів, де профілі теплоносія можуть незалежно формуватись вздовж решітки, – розв’язання задачі багатокритеріальної оптимізації.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз сучасних досліджень виявляє відсутність комплексних математичних інструментів, які б поєднували строгий фізико-хімічний опис процесу термообробки кристалогідратів з алгоритмами багатокритеріальної оптимізації в горизонтальному секціонованому апараті киплячого шару. Існує нагальна потреба в розробці дворівневих обчислювальних алгоритмів для секціонованих сушарок, першим рівнем (математичною основою) має слугувати 1D–модель з аналітичним розрахунком динамічної зміни гранулометричного складу, гідродинаміки киплячого шару, кінетики сушіння, що дозволить уникнути ресурсомістких PBM–розрахунків без втрати фізичної адекватності. Другим рівнем надбудови має стати еволюційний алгоритм оптимізації просторових теплових і гідродинамічних профілів.

Мета дослідження полягає в підвищенні масової та енергетичної ефективності процесу дегідратації заліза(II) сульфат гептагідрату в багатосекційному апараті киплячого шару шляхом розробки комплексної детермінованої 1D–математичної моделі та проведення багатокритеріальної оптимізації керуючих профілів тепломасообміну.

Матеріали та методи досліджень.

Структура 1D–моделі та розрахункова схема апарата. Розробка математичного забезпечення для розрахунку процесу термічної дегідратації полідисперсного залізного купоросу базується на одномірному 1D–підході. Фізичним об’єктом моделювання є горизонтальний апарат киплячого шару безперервної дії без внутрішніх фізичних перегородок. Згідно з результатами експериментальних досліджень (RTD–аналізу) розподілу часу перебування у горизонтальних псевдозріджених шарах [9; 17], рух дисперсного матеріалу в таких системах не може розглядатись як ідеальне витіснення. Тому гідродинамічна структура потоків у розробленій моделі прийнята наступною: для твердої фази в межах локального елементарного об’єму секції діє модель ідеального перемішування, що враховує інтенсивну циркуляцію частинок, рух сушильного агента крізь шар (по вертикальній осі «*y*») розглядається за моделлю ідеального витіснення. Важливою

конструктивною особливістю розрахункової схеми (рис. 1) є використання принципу аеродинамічного секціонування. Вздовж повздовжньої осі апарата (вісь «*x*») під газорозподільною решіткою передбачено наявність автономних камер. Це дозволяє формувати незалежні профілі швидкості $U_{g,in}(x)$ та температури $T_{g,in}(x)$ сушильного агента для різних зон апарата без встановлення фізичних перегородок у самому шарі матеріалу, які є джерелом небажаних застійних зон.

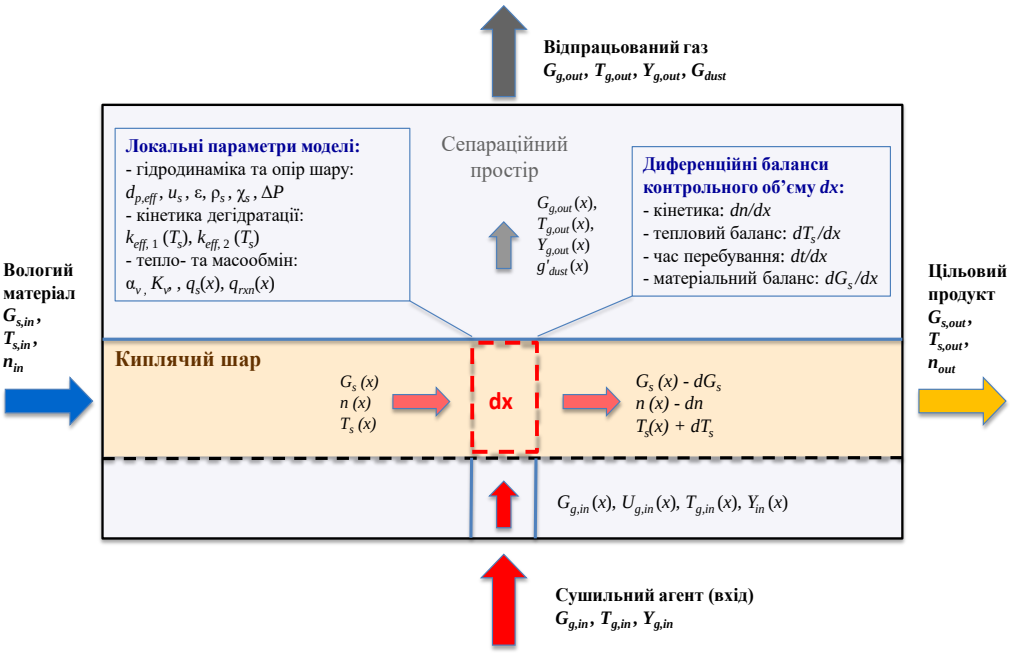


Рис. 1. Розрахункова схема апарата

Математичне ядро моделі базується на розв'язанні системи звичайних диференціальних рівнянь балансу маси та енергії, складених для елементарного контрольного об'єму шару довжиною *dx*. Система описує зміну ключових параметрів твердої фази вздовж апарата і включає:

1. Рівняння зміни вологовмісту матеріалу (dn / dx) внаслідок хімічної реакції дегідратації;
2. Рівняння теплового балансу для визначення градієнта температури твердої фази (dT_s / dx), що враховує теплоту, підведену сушильним агентом, та ендотермічний ефект фазових перетворень;
3. Рівняння масового балансу (dG / dx), яке фіксує зміну масового потоку матеріалу за рахунок втрати вологи та винесення дрібних фракцій газовим потоком;
4. Кінетичне рівняння локального часу перебування (dt / dx), що визначається швидкістю повздовжнього переміщення шару.

З погляду обчислювальної математики сформована система диференціальних рівнянь належить до класу жорстких систем. Жорсткість зумовлена специфікою хімічної кінетики процесу дегідратації: наявністю нелінійних експоненціальних членів з високими енергіями активації та різкими температурними тригерами фазових переходів. При досягненні матеріалом температур активації градієнти вологості та температури (dn / dx, dT_s / dx) локально значно змінюються. Використання класичних явних методів інтегрування, наприклад, методів Рунге–Кутта, для таких систем приводить до втрати стійкості або вимагає нескінченно малого кроку розрахунку. Тому для чисельного розв'язання цієї системи застосовано алгоритм ode15s у середовищі MATLAB, заснований на формулах чисельного диференціювання. Це гарантує високу точність та обчислювальну стійкість моделі.

Фізико-хімічна динаміка: TGA–кінетика та еволюція властивостей частинок. Переважна більшість існуючих інженерних моделей, що описують конвективне сушіння у псевдозрідженому шарі, базується на використанні емпіричних або напівемпіричних рівнянь кінетики сушіння [19]. Такі підходи є фізично адекватними, однак, лише для процесів видалення вільної поверхневої або капілярно-зв'язаної вологи. У випадку з залізним купоросом волога є структурним елементом кристалічної ґратки. Відповідно, процес її видалення є не просто фазовим переходом першого роду (випаровуванням), а ендотермічною топохімічною реакцією розкладання твердого тіла. Тому базою для математичного опису кінетики масообміну в розробленій моделі слугують результати термогравіметричного аналізу (TGA), які дозволяють застосувати суворі рівняння макрокінетики [11].

Згідно з даними диференційної скануючої калориметрії (DSC) та TGA, отриманими у роботі [20], термічна дегідратація гептагідрату сульфату заліза до цільового моногідрату протікає у дві послідовні стехіометричні стадії з утворенням проміжного тетрагідрату:

1. $FeSO_4 \cdot 7H_2O \rightarrow FeSO_4 \cdot 4H_2O + 3H_2O \uparrow$
2. $FeSO_4 \cdot 4H_2O \rightarrow FeSO_4 \cdot 1H_2O + 3H_2O \uparrow$

Швидкість зміни вологовмісту матеріалу n у часі описується кінетичним рівнянням першого порядку відносно рушійної сили [20]:

$$\frac{dn}{dt} = -k_{eff}(T_s)\left(n - n_{eq}\right),$$

де n – поточний вологовміст матеріалу, моль H_2O / моль $FeSO_4$;

t – час процесу, с;

$-k_{eff}(T_s)$ – ефективна константа швидкості реакції, $с^{-1}$, яка залежить від температури твердої фази T_s, К;

n_{eq} – рівноважний вологовміст матеріалу, моль / моль.

Ефективна константа швидкості реакції підпорядковується закону Арреніуса. Для першої стадії при n > 4 процес лімітується енергією активації відриву перших трьох молекул води [20]:

$$k_{eff} = k_1 \exp\left(-\frac{E_{a1}}{RT_s}\right),$$

де k_1 – передекспоненційний множник першої стадії, $с^{-1}$;

E_{a1} – енергія активації першої стадії, кДж / моль;

R – універсальна газова стала, R = 8,314 Дж / (моль·К).

Перехід до другої стадії вимагає розриву міцніших координаційних зв'язків молекул води з іоном Fe^{2+}, що супроводжується зростанням енергії активації E_{a2} [20]. Фізично ця стадія інтенсифікується лише після досягнення матеріалом температури активації T_{act2} [20].

Для уникнення математичної жорсткості, пов'язаної з розривами функцій, застосовано гладкий температурний перехід:

$$k_{eff} = k_2 \exp\left(-\frac{E_{a2}}{RT_s}\right) \cdot 0{,}5 \cdot \left[1 + \tanh\left(\frac{T_s - T_{act}}{\Delta T}\right)\right],$$

де ΔT – діапазон згладжування, прийнято ΔT = 1,0 К.

Одночасно з хімічним перетворенням відбувається зміна теплофізичних та механічних властивостей частинок. У процесі втрати кристалізаційної вологи молярна маса частинки зменшується від M_7 до M_1, істинна густина твердого каркаса нелінійно зростає від вихідного значення гептагідрату ρ_7 до густини моногідрату ρ_1 [21]. Поточний молярний об'єм твердої фази розраховується як:

$$V_c(n) = \frac{M_{FeSO_4} + n \cdot M_{H_2O}}{\rho_s(n)},$$

де $M_{\mathrm{FeSO_4}}$ – молярна маса безводного сульфату заліза, г/моль;

$M_{\mathrm{H_2O}}$ – молярна маса води, г/моль.

$\rho_s(n)$ – локальна густина твердої фази як функція поточного вологовмісту, кг/м^3.

Зменшення молярного об'єму призводить до макроскопічної термічної усадки частинок. Допущенням моделі є збереження цілісності частинок у процесі обробки. Не розглядаються зміна кількості частинок у шарі за рахунок механізму агломерації, злипання або вторинного пилоутворення внаслідок механічних факторів деструкції та стирання [8]. Згідно з класичною макрокінетичною теорією [12], виключно за умови відсутності руйнування та злипання гранул, правомірним є застосування принципу суворої пропорційності між об'ємною усадкою частинки та зміною її маси і густини внаслідок дегідратації [22]. Для математичного опису пропорційності введено коефіцієнт об'ємної усадки, що визначається відношенням поточного молярного об'єму до вихідного молярного об'єму гептагідрату:

$$\xi_{vol}(x) = \frac{(M_{\mathrm{FeSO_4}} + n(x) \cdot M_{\mathrm{H_2O}}) \cdot \rho_7}{(M_{\mathrm{FeSO_4}} + 7 \cdot M_{\mathrm{H_2O}}) \cdot \rho_s(x)},$$

де $\xi_{vol}(x)$ – коефіцієнт об'ємної усадки частинки на координаті x.

Відповідно, на основі принципу пропорційності, локальний еквівалентний діаметр кожної індивідуальної частинки зменшується пропорційно коефіцієнту об'ємної усадки:

$$d_p(x) = d_{p,0} \cdot \sqrt[3]{\xi_{vol}(x)}.$$

Цей взаємозв'язок між втратою маси, зростанням густини та геометричною усадкою без зміни загальної популяції частинок формує базис для подальшого розрахунку аеродинамічних сил та швидкості витання в блоці гідродинаміки.

Розподіл Розіна–Раммлера, межі псевдозрідження та винесення частинок з киплячого шару. На початковому етапі розробки математичної моделі було здійснено спробу апроксимувати інтегральну криву розсіву за допомогою емпіричного полінома третього ступеня. Хоча поліноміальна функція забезпечувала високий коефіцієнт детермінації $R^2 \approx 0{,}81$ при описі самої кривої, її використання в гідродинамічному розрахунку виявилося фізично некоректним. Інтегрування полінома для знаходження математичного сподівання (центру мас розподілу) призводило до штучного зсуву середнього діаметра в бік крупних фракцій. Розрахунковий середній діаметр сягав ≈ 1,0 мм. Це вимагало введення нефізичного поправочного коефіцієнта 0,61 для узгодження з реальною питомою поверхнею кристалів, що є неприпустимим для побудови детермінованих моделей. Тому, для узгодження з експериментальними даними ситового аналізу залізного купоросу в розробленій моделі базовий дисперсний склад апроксимовано двопараметричною функцією розподілу Розіна–Раммлера [23]. Цей розподіл дозволяє аналітично визначити початковий еквівалентний поверхнево-об'ємний діаметр d_{32}, який є ключовим параметром для розрахунку міжфазної поверхні обміну через повну Гамма-функцію:

$$d_{32} = \frac{d_{RR}}{\Gamma(1 - 1/k)},$$

де d_{RR} – масштабний параметр розподілу Розіна–Раммлера, м;

k – індекс однорідності розподілу;

Г – повна Гамма-функція Ейлера.

Для розрахунку гідродинамічного стану шара на кожному кроці інтегрування використовуються локальні критерії Архімеда та Рейнольдса:

$$\mathrm{Ar} = \frac{g \cdot d_{p,eff}^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_s - \rho_g)}{\mu_g^2}, \quad \mathrm{Re} = \frac{d_{p,eff} \cdot U_g \cdot \rho_g}{\mu_g}.$$

Для визначення меж гідродинамічної стійкості важливим є розрахунок швидкості початку псевдозрідження U_{mf}. Цей параметр визначає нижню межу робочої швидкості газу, за якої шар переходить із нерухомого стану в псевдозріджений. Критерій Рейнольдса для початку псевдозрідження обчислюється на основі поточного критерію Архімеда за класичною напівемпіричною залежністю Вен-Ю [8]:

$$\mathrm{Re}_{mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 \cdot \mathrm{Ar}} - C_1,$$

де C_1, C_2 –емпіричні константи рівняння Вен-Ю, для широкого спектра дисперсних матеріалів, C_1 = 33,7, C_2 =0,0408 [3].

На основі Re_{mf} визначається локальна швидкість початку псевдозрідження:

$$U_{mf} = \frac{\mathrm{Re}_{mf} \cdot \mu_g}{d_{p,eff} \cdot \rho_g}.$$

Поточна поризність активного псевдозрідженого шару обчислюється за критеріальним рівнянням Тодеса, яке довело надійність для полідисперсних систем при різних режимах кипіння:

$$\varepsilon = \left(\frac{18\mathrm{Re} + 0{,}36\mathrm{Re}^2}{\mathrm{Ar}}\right)^{0{,}21}.$$

Механізм винесення частинок у моделі описано залежностями [24]:

$$\mathrm{Re}_t = \frac{\mathrm{Ar}_{cr}}{18 + 0{,}61\sqrt{\mathrm{Ar}_{cr}}},\ U_t = \frac{\mathrm{Re}_t \cdot \mu_g}{d_{cr} \cdot \rho_g},$$

де d_{cr} – критичний діаметр частинки, що виноситься потоком, м.

Однак використання лише локального значення d_{cr} є помилковим в умовах змінного профілю швидкостей та безперервної втрати маси частинками внаслідок сушіння. Для розв'язання цієї проблеми в алгоритм інтегровано логіку «пам'яті» газового потоку. Фактичний діаметр відсікання d_{cut}, який формує усічену функцію розподілу, визначається оператором максимуму між здатністю потоку винести частинку на вході в апарат та його локальною здатністю з урахування об'ємної усадки частинки ξ_{vol}:

$$d_{cut}(x) = \max\left(d_{cr,in}, \frac{d_{cr}(x)}{\xi_{vol}(x)}\right).$$

Моделювання таких динамічних систем вимагає застосування ресурсомістких рівнянь популяційного балансу [25]. У представленій моделі застосовано аналітичний перерахунок зсунутого діаметра d_{32}. Відсікання лівого (дрібнодисперсного) хвоста функції Розіна–Раммлера по межі d_{cut} дозволяє визначити новий ефективний d_{32}^{rem} через інтегрування залишку функції розподілу за допомогою неповної верхньої Гамма-функції:

$$d_{32}^{rem} = d_{RR} \frac{\exp(-t_{cut})}{\Gamma(1 - 1/k, t_{cut})},$$

де d_{32}^{rem} – ефективний діаметр для залишкової (невинесеної) маси матеріалу, м;

t_{cut} – безрозмірна межа відсікання винесеної фракції, $t_{cut} = (d_{cut}/d_{RR})^k$.

Остаточний ефективний геометричний діаметр у локальному об'ємі dx, який повертається в гідродинамічний та тепловий баланси становить:

$$d_{p,eff} = d_{32}^{rem} \cdot \sqrt[3]{\xi_{vol}(x)}.$$

Тепломасообмін. Інтенсивність процесів перенесення маси та теплоти між дисперсною фазою та сушильним агентом у псевдозрідженому шарі визначається локальними гідродинамічними умовами та теплофізичними властивостями фаз. У цій моделі локальні коефіцієнти міжфазного обміну розраховуються на основі безрозмірних критеріальних рі-

внянь, специфічних для киплячого шару [8]. Для розрахунка зовнішнього коефіцієнту масовіддачі використовується критерій Шервуда, а для розрахунку поверхневого коефіцієнта тепловіддачі – критерій Нуссельта. Обидва критерії є функціями режимних параметрів потоку , фізичних властивостей середовища та локальної порозності шару [8]:

$$\mathrm{Nu} = (7 - 10\varepsilon + 5\varepsilon^2) \cdot (1 + 0{,}7\mathrm{Re}^{0{,}2}\mathrm{Pr}^{0{,}33}) + (1{,}33 - 2{,}4\varepsilon + 1{,}2\varepsilon^2) \cdot \mathrm{Re}^{0.7}\mathrm{Pr}^{0{,}33},$$

$$\mathrm{Sh} = (7 - 10\varepsilon + 5\varepsilon^2) \cdot (1 + 0{,}7\mathrm{Re}^{0{,}2}\mathrm{Sc}^{0{,}33}) + (1{,}33 - 2{,}4\varepsilon + 1{,}2\varepsilon^2) \cdot \mathrm{Re}^{0.7}\mathrm{Sc}^{0{,}33},$$

де Nu – локальний критерій Нуссельта, $\mathrm{Nu} = \frac{\alpha_f \cdot d_{p,eff}}{\lambda_g}$;

Sh – локальний критерій Шервуда, $\mathrm{Sh} = \frac{\beta \cdot d_{p,eff}}{D_{AB}}$;

Pr – локальний критерій Прандтля для газової фази, $\mathrm{Pr} = \frac{C_{p,g} \cdot \mu_g}{\lambda_g}$;

Sc – локальний критерій Шмідта для газової фази, $\mathrm{Sc} = \frac{\mu_g}{\rho_g \cdot D_{AB}}$;

α_f – поверхневий коефіцієнт тепловіддачі від газу до поверхні частинки, Вт / (м^2·К);

β – поверхневий коефіцієнт масовіддачі, м/с;

λ_g – коефіцієнт теплопровідності газу, Вт / (м·К);

D_{AB} – коефіцієнт дифузії водяної пари у повітрі, м^2/с.

Особливістю дегідратації є формування на поверхні частинок шару твердого продукту реакції. Оскільки цільовим продуктом процесу є моногідрат сульфату заліза, а не повністю безводна сіль – ангідрит, процес розкладання в математичній моделі зупиняється на стадії формування стабільної кристалічної структури моногідрату. Для адекватного математичного опису для цього застосовано концепцію стиснення частинки SCM. Згідно з цією моделлю реакція дегідратації відбувається на фронті поділу фаз між непрореагованим гідратним ядром та утвореною пористою скоринкою моногідрату. Ключовим припущенням розробленого математичного алгоритму є те, що утворення скоринки моногідрату не змінює параметри самої хімічної кінетики і рівняння Арреніуса залишаються незмінними. Однак цей шар створює суттєвий додатковий термічний опір для підведення тепла до зони реакції [22]. Вплив цього термічного опору враховується шляхом введення ефективного коефіцієнта теплопередачі α_{eff}, який лімітується значенням критерію Біо для твердої фази:

$$\mathrm{Bi} = \frac{\alpha_f \left({}^{d_{p,eff}}/_{2} \right)}{\lambda_s},$$

де Bi – критерій Біо, що характеризує співвідношення між термічним опором твердого тіла та термічним опором пограничного шару газу;

λ_s – теплопровідність моногідрату, Вт / (м·К);

Ефективний коефіцієнт теплопередачі розраховується за рівнянням для сферичної частинки з оболонкою:

$$\alpha_{eff} = \frac{\alpha_f}{1 + \mathrm{Bi}\left(\frac{1}{\xi_{core}} - 1\right)},$$

де ξ_{core} – безрозмірний радіус непрореагованого гідратного ядра.

Значення ξ_{core} динамічно змінюється від 1 на вході в апарат до нуля при повному перетворенні на моногідрат пропорційно ступеню протікання хімічної реакції. Чим товщою стає скоринка моногідрату, тим більше ефективний коефіцієнт α_{eff} відхиляється від ідеального поверхневого α_f, що фізично уповільнює процес нагрівання ядра.

Отримані значення ефективного коефіцієнта теплопередачі та коефіцієнта масовіддачі перераховуються в об'ємні коефіцієнти обміну α_v, K_v з урахуванням питомої міжфазної поверхні полідисперсного шару $a_v = \frac{6\cdot(1-\varepsilon)}{d_{p,eff}\cdot\varphi}$. Ці об'ємні коефіцієнти інтегруються у диференціальні баланси математичної системи для розрахунку локальних температурних та концентраційних градієнтів.

Блок диференціальних балансів та розрахунку енергетичних потоків. Математична основа являє собою систему звичайних диференційних рівнянь, яка інтегрує локальні гідродинамічні, кінетичні, теплофізичні параметри у єдиний баланс елементарного контрольного об'єму *dx* вздовж осі апарата. Для замикання системи рівнянь енергії необхідно розрахувати динамічну теплоємність твердої фази. Оскільки матеріал є сумішшю безводного сульфату заліза та кристалізаційної вологи, його локальна молярна теплоємність $c_{p,mol}(x)$ обчислюється за правилом адитивності Неймана–Коппа для твердих тіл [3]:

$$c_{p,mol}(x) = c_{p,anh} + n(x)\cdot c_{p,w},$$

де $c_{p,mol}(x)$ – поточна молярна теплоємність кристалогідрата, Дж/(моль·К);
$c_{p,anh}$ – молярна теплоємність безводного сульфату заліза, Дж/(моль·К);
$c_{p,w}$ – молярна теплоємність зв'язаної кристалізаційної води, Дж/(моль·К);

Відповідно, питома масова теплоємність твердої фази $c_{p,s}(x)$ у кожному перерізі становить:

$$c_{p,s}(x) = c_{p,mol}(x)/M_c(x),$$

де $M_c(x)$ –поточна молярна маса гідрату, кг/моль.

Для визначення ефективного локального теплового потоку, що передається від газу до частинок на ділянці *dx*, застосовано метод числа одиниць перенесення [26]:

$$NTU(x) = \frac{\alpha_v(x)H}{\dot{m}'_g(x)c_{p,g}},$$

де $NTU(x)$ – локальне число одиниць перенесення;
$\alpha_v(x)$ – об'ємний ефективний коефіцієнт теплопередачі, $\alpha_v = \alpha_{eff}\cdot a_v$, Вт / (м^3·К);
H – висота псевдозрідженого шару, м;
$\dot{m}'_g(x)$ – питома масова витрата сушильного агента на одиницю площі, кг / (м^3·с);

Теплова ефективність шару (термічний ККД локального об'єму) визначається як:

$$\eta_{th}(x) = 1 - exp\big(-NTU(x)\big).$$

Питомий лінійний тепловий потік, що передається твердій фазі від сушильного агента на ділянці *dx*, в моделі розраховується рівнянням:

$$q_s(x) = \dot{m}_{g,L}\cdot c_{p,g}\cdot\big[T_{g,in}(x) - T_s(x)\big]\cdot\eta_{th}(x),$$

де $\dot{m}_{g,L}$ – масова витрата газу на 1 погонний метр довжини апарату, кг / (м·с);
$T_{g,in}(x)$ – температура сушильного агента на вході у поточній секції, К;
$T_s(x)$ – поточна температура твердої фази, К.

Паралельно з нагріванням відбувається інтенсивне поглинання теплоти хімічною реакцією дегідратації. Питома лінійна витрата теплоти на реакцію становить:

$$q_{rxn}(x) = F_s(x)\cdot\left|\frac{dn}{dx}\right|\cdot\Delta H_{rxn}(n),$$

де $F_s(x)$ – локальна молярна витрата твердої фази, моль/с;
$\frac{dn}{dx}$ – градієнт вологовмісту за довжиною апарату, моль/(моль·м);

$\Delta H_{rxn}(n)$ – молярна ентальпія (тепловий ефект) реакції дегідратації для поточної стадії, яка включає енергію розриву координаційних зв'язків та приховану теплоту пароутворення води, Дж/(моль) [20].

Повна математична модель процесу зводиться до системи чотирьох зв'язних звичайних диференціальних рівнянь, які одночасно інтегруються вздовж координати *x*:

1. Рівняння масообміну (кінетика дегідратації). Для інтегрування в одновимірну стаціонарну модель часова похідна перетворюється на просторову вздовж осі «*x*» через локальну швидкість поздовжнього руху твердої фази:

$$\frac{dn}{dx} = -\frac{k_{eff}(T_S)}{u_s(x)}\left(n - n_{eq}\right),$$

де x – поздовжня координата, м;

u_s – локальна лінійна швидкість поздовжнього руху твердої фази у шарі, м/с.

2. Рівняння теплового балансу твердої фази:

$$\frac{dT_S}{dx} = \frac{q_s(x) - q_{rxn}(x)}{G_S(x)\cdot c_{p,s}(x)},$$

де $G_s(x)$ – поточна масова витрата твердої фази, кг/с.

3. Рівняння матеріального балансу твердої фази з урахуванням винесення:

$$\frac{dG_S}{dx} = -G_S(x)\cdot\left|\frac{dn}{dx}\right|\cdot\frac{M_{H_2O}}{M_c} - g'_{dust}(x),$$

де $g'_{dust}(x)$ – інтенсивність винесення пилу з шару на одиницю довжини, кг / (м·с).

4. Кінетичне рівняння локального часу перебування:

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{u_s(x)} = \frac{\chi_s(x)\cdot B\cdot H}{G_s(x)},$$

де $\chi_s(x)$ – масова концентрація частинок, кг / м^3;

B – ширина апарата, м.

Розв'язання сформованої системи рівнянь, що становить задачу Коші з початковими умовами при x=0 (t=0, n=7, T_s=T_{in}, G_s=G_{in}), реалізовано в середовищі MATLAB при застосуванні алгоритму ode15s. Завершення інтегрування в точці x=L (де L – загальна довжина апарата) формує вихідний вектор характеристик цільового продукту, який передається на верхній рівень алгоритму в модуль багатокритеріальної оптимізації.

Надбудова: алгоритм багатокритеріальної оптимізації на базі NSGA–II. Сучасне проєктування хіміко-технологічних систем вимагає переходу від ітераційного емпіричного підбору параметрів до математичного синтезу оптимальних рішень. У розробленій дворівневій обчислювальній архітектурі система нелінійних диференціальних рівнянь виконує роль детермінованого математичного ядра нижнього рівня, який генерує просторові профілі процесу дегідратації для будь-яких закладених вихідних умов. Верхнім рівнем є надбудова багатокритеріальної оптимізації, яка реалізує глобальний пошук раціональних режимних параметрів у багатовимірному просторі на основі оцінки відгуку цільових функцій [27; 28]. Враховуючи конструктивні особливості аеродинамічно секціонованого горизонтального апарата керування процесом здійснюється не лише статичними параметрами на вході, а й формуванням безперервних поздовжніх профілів. Тому простором пошуку є багатовимірний вектор керуючих змінних X, який включає масове навантаження по сировині, початкові параметри теплоносія та поліноміальні коефіцієнти просторових профілів швидкості й температури:

$$\mathrm{X} = [G_{in}, U_{in}, T_{in}, a_T, b_T, c_1, c_2],$$

де a_T, b_T – коефіцієнти функції температурного профілю:

$$T_{g,in}(x) = T_{g,in}(0) - a_T\cdot x^{bT};$$

c_1, c_2 – коефіцієнти параболічного профілю швидкості газу:

$$U_g(x) = U_g(0) - c_1 \cdot x + c_2 \cdot x^2.$$

Як критерії оптимальності обрано дві конкуруючі цільові функції, що відображають фундаментальний компроміс між інтенсифікацією виробництва та його енергетичною досконалістю.

Перша цільова функція спрямована на пошук режимів, які забезпечують максимальний вихід сухого цільового продукту моногідрату з одиниці об'єму апарата в одиницю часу. У термінах математичного програмування алгоритм мінімізує від'ємне значення продуктивності:

$$f_1(\mathrm{X}) = -G_{out}(\mathrm{X}) \to \min.$$

Друга цільова функція відображає сукупні витрати енергії на випаровування одиниці маси вологи. В алгоритм додатково інтегровано механічну потужність газодувок, зведених до єдиного енергетичного еквівалента [29]:

$$f_2(\mathrm{X}) = q_\Sigma = \frac{Q_{s,\Sigma}+N}{W} \to \min,$$

де q_Σ –сумарні енерговитрати, кДж / кг випареної вологи;

$Q_{s,\Sigma}$ –загальний тепловий потік, витрачений на нагрівання сушильного агента в усіх секціях, кВт;

W – загальна витрата видаленої в апараті кристалізаційної вологи, кг/с;

N – ефективна механічна потужність приводів газодувок, кВт.

Фізико-математичний конфлікт і термодинамічний аналіз. Коректність постановки задачі гарантується наявністю фізичного антагонізму між першою та другою функцією. Збільшення подачі сировини для максимізації продуктивності вимагає інтенсифікації дуття та підняття температур. Проте, згідно з другим законом термодинаміки та ексергетичним аналізом процесів сушіння [3; 5], підняття температури і надмірне зростання швидкості газу призводять до зниження часу контакту фаз. Внаслідок цього сушильний агент залишає поверхню шару з високим залишковим тепловим потенціалом. Це супроводжується масштабним термічним знищенням ексергії через викид відпрацьованих газів в атмосферу [5] та зростанням механічної потужності вентиляторів. Як наслідок, інтенсифікація продуктивності неминуче призводить до різкого погіршення другого критерію – зростання питомих енерговитрат.

Оскільки цільові функції є конфліктуючими, а простір пошуку є багатовимірним, використання класичного методу сіткового сканування є обчислювально неможливим через розмірності. Для розв'язання цієї задачі застосовано швидкий алгоритм недомінованого сортування NSGA–II [30]. Перевага NSGA–II полягає у його здатності підтримувати високе різноманіття популяції рішень та застосуванню підходу, що запобігає втраті знайдених оптимальних точок при зміні поколінь. Еволюційний алгоритм стартує з популяції випадкових або інформованих векторів і шляхом ітераційних операцій генерує множину недомінованих рішень – фронт Парето. Кожна точка на фронті Парето представляє такий технологічний режим, за якого неможливо збільшити продуктивність апарата без одночасного погіршення енергетичної ефективності. Це створює строгий математичний баланс для прийняття остаточного інженерного рішення щодо робочих профілів у багатосекційному апараті.

Вихідні фізико-хімічні та кінетичні параметри моделі. Для забезпечення прозорості та можливості повного відтворення чисельних результатів математичного моделювання всі базові фізико-хімічні властивості матеріалу, кінетичні константи дегідратації та рівняння для розрахунку теплофізичних властивостей сушильного агента зведені в табл. 1.

Параметри гранулометричного складу залізного купоросу не є статичними апріорними даними і визначаються в розділі результатів на основі математичної обробки експериментальних даних ситового аналізу [21].

Таблиця 1 – Фізико-хімічні властивості матеріалу, кінетичні константи дегідратації та теплофізичні властивості сушильного агента

Параметр	Позначення	Значення / Рівняння	Джерело
1. Властивості твердої фази:			
Молярна маса безводного $FeSO_4$	M_{FeSO_4}	151,91 г/моль	[2]
Молярна маса води	M_{H_2O}	18,015 г/моль	[2]
Істинна густина гептагідрату	ρ_7	1890 кг/м^3	[2, 21]
Істинна густина моногідрату	ρ_1	3000 кг/м^3	[2, 21]
Теплопровідність твердих частинок	λ_s	0,50 Вт/(м·К)	[31]
Молярна теплоємність безводного $FeSO_4$	$c_{p,anh}$	92,05 Дж/(моль·К)	[3]
Молярна теплоємність зв'язаної води	$c_{p,w}$	44,30 Дж/(моль·К)	[3]
2. Кінетика дегідратації:			
Стадія 1:			
Енергія активації	E_{a1}	93,4 кДж/моль	[20]
Передекспоненційний множник	k_1	exp(24,5) с$^{-1}$	[20]
Молярна ентальпія реакції дегідратації	$\Delta H_{rxn,1}$	48,56 кДж/(моль води)	[20]
Стадія 2:			
Енергія активації	E_{a2}	111,8 кДж/моль	[20]
Передекспоненційний множник	k_2	exp(28,2) с$^{-1}$	[20]
Молярна ентальпія реакції дегідратації	$\Delta H_{rxn,2}$	60,13 кДж/(моль води)	[20]
Температура активації стадії 2	T_{act2}	363 К	[20]
Температура активації стадії 3	T_{act3}	≈493–523 К	[20]
3. Властивості газової фази (повітря):			
Динамічна в'язкість	μ_g(T)	$1{,}8\cdot10^{-5}$(T/293)^{0,7} Па·с	[26]
Питома ізобарна теплоємність повітря	$C_{p,g}$(T)	1005+0,2(T-293) Дж/(кг·К)	[26]
Коефіцієнт дифузії водяної пари в повітрі	D_{AB}(T)	$2{,}2\cdot10^{-5}$(T/273)^{1,75} м^2/с	[26]
4. Геометричні характеристики фізичного об'єкта моделювання:			
Довжина х Ширина газорозподільної решітки	L x B	1 x 0,1 м	Дані авторів
Висота шару матеріалу	H	0,1 м	

Результати та обговорення.

Апроксимація вихідного гранулометричного складу. Основою для моделювання гідродинаміки псевдозрідження та процесів тепломасообміну залізного купоросу став математичний опис початкового гранулометричного складу. За результатами ситового аналізу вихідного матеріалу встановлено, що матеріал є полідисперсним з домінуючою масовою часткою фракції в діапазоні 0,3–0,8 мм [21]. Розподіл частинок у моделі описано двопараметричною функцією Розіна–Раммлера. На основі лінеаризації експериментальних даних у подвійних логарифмічних координатах визначено константи розподілу: масштабний параметр (розмір при якому залишок на ситі становить 36,8 %) d_{RR} = 0,813 мм та індекс однорідності k = 2,188. Значення $k > 2$ свідчить про відносно вузький спектр розмірів основної маси кристалів.

Застосування функції Розіна–Раммлера дозволило аналітично без використання емпіричних поправок розрахувати початковий еквівалентний діаметр d_{32}:

$$d_{32} = \frac{0{,}813\cdot10^{-3}}{\Gamma(1-1/2{,}188)} = 0{,}4965 \text{ мм}.$$

Отримане значення d_{32} узгоджується з результатами прямого розрахунку за експериментальними масовими частками на ситах [21]. Значення d_{32} було прийнято як базова точка відліку для подальшого розрахунку локальних критеріїв Ar, Re та питомої поверхні міжфазового обміну α_v.

Аналіз базового технологічного режиму, верифікація динаміки фазових перетворень. Перед проведенням комплексного багатовимірного синтезу оптимальних керуючих впливів критично важливим етапом визначено верифікацію розробленої моделі на предмет фізичної адекватності. Було розраховано базовий технологічний режим роботи апарату загальною довжиною 1 м. Вихідна продуктивність по сирому матеріалу була зафіксована на рівні $G_{s,in} = 7 \cdot 10^{-3}$ кг/с. З метою стрес-тестування диференційної системи на чутливість до просторових градієнтів профілі теплоносія були задані у вигляді штучних нелінійних функцій. Профіль температури сушильного агента під газорозподільною решіткою було задано у вигляді спадної параболи $T_{g,in}(x) = 220 - 50x^2$ від 220 °С на вході до 170°С на виході. Профіль фіктивної швидкості газу задано синусоїдальним характером $U_g(x) = 1{,}3 - 0{,}4 \cdot \sin(\pi x)$, що імітує різну інтенсивність дуття по довжині сушарки з примусовим мінімумом швидкості 0,9 м/с у центрі апарата (x = 0,5 м).Просторові профілі ключових параметрів, згенеровані розрахунковим блоком моделі (рис. 2) демонструють нелінійний характер топохімічної дегідратації.

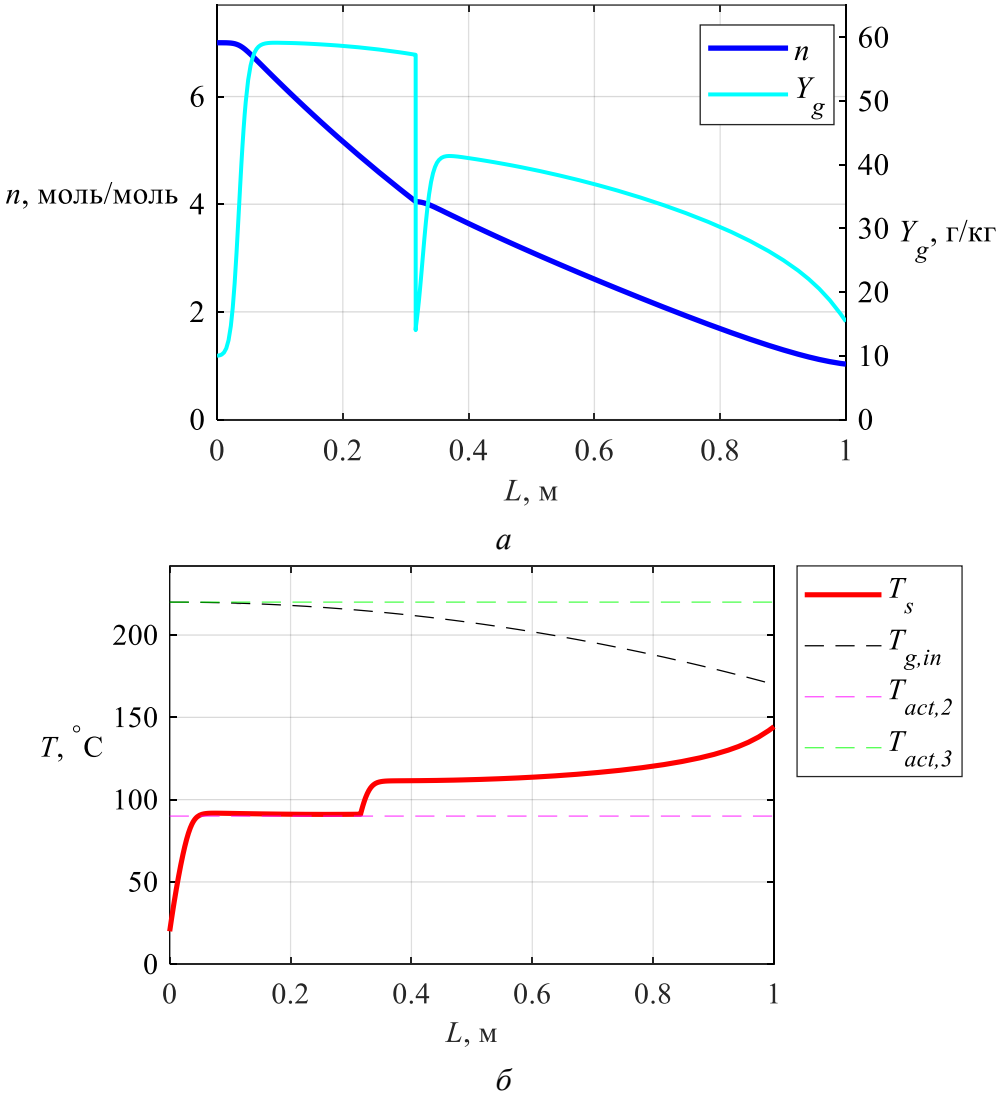


Рис. 2. Профілі для базового технологічного режиму: а – вологовмісту матеріалу; б – температур фаз

На початковій ділянці апарату (до $x \approx 0{,}35$) спостерігається інтенсивне падіння вологовмісту матеріалу $n(x)$ від початкових 7,0 до 4,0 моль/моль. Ця зона характеризується перебігом першої стадії реакції, ентальпія якої становить 48,56 кДж/(моль випареної

води). Температурний профіль твердої фази у цій зоні зазнає різкого нагрівання від 20 °C до 90 °C, після чого фіксується на цьому рівні, демонструючи ефект термічного вирівнювання. Незважаючи на контакти з високотемпературним газом матеріал не перегрівається, оскільки підведений тепловий потік повністю поглинається потужним ендотермічним ефектом хімічної реакції. При зниженні вологовмісту нижче 4,0 активізується друга стадія дегідратації ($4H_2O \rightarrow 1H_2O$). Оскільки енергія активації цієї стадії значно вища ($E_{a,2}$ = 111,8 кДж/моль), а ентальпія реакції зростає до 60,13 кДж/(моль води), подальше видалення вологи вимагає вищих температур частинки. Температура матеріалу T_s починає плавно зростати досягаючи 112°C на відмітці x = 0,35 м. Розрахунковий кінцевий вологоміст на виході з апарата для базової продуктивності становить 1,03 моль H_2O/моль $FeSO_4$ при фінальній температурі продукту 142°C. Матеріал плавно наближається до цільового стану моногідрату, при цьому реакція дегідратації природно сповільнюється завдяки зменшенню рушійної сили (n – 1). Досягнутої температури абсолютно недостатньо для активації третьої стадії дегідратації ($T_{act,3} \approx 220$ °C, $E_{a,3}$ = 217,1 кДж/моль), що верифікує здатність моделі прогнозувати безпечний режим без утворення пересушеного ангідриту.

Ключовим фактором, що лімітує швидкість процесу наприкінці апарата, є еволюція внутрішнього термічного опору частинок. Розрахунки показують, що у міру наближення вологовмісту до моногідрату, товщина пористої скоринки стає максимальною. Ефективна теплопередача всередину частинки гальмується, що пояснює асимптотичний характер кривої сушіння $n(x)$ на фінальних секціях апарата і підтверджує фізичну адекватність моделі SCM.

Динаміка об'ємних коефіцієнтів тепло- та масообміну ілюструє цей перехідний механізм (рис. 3).

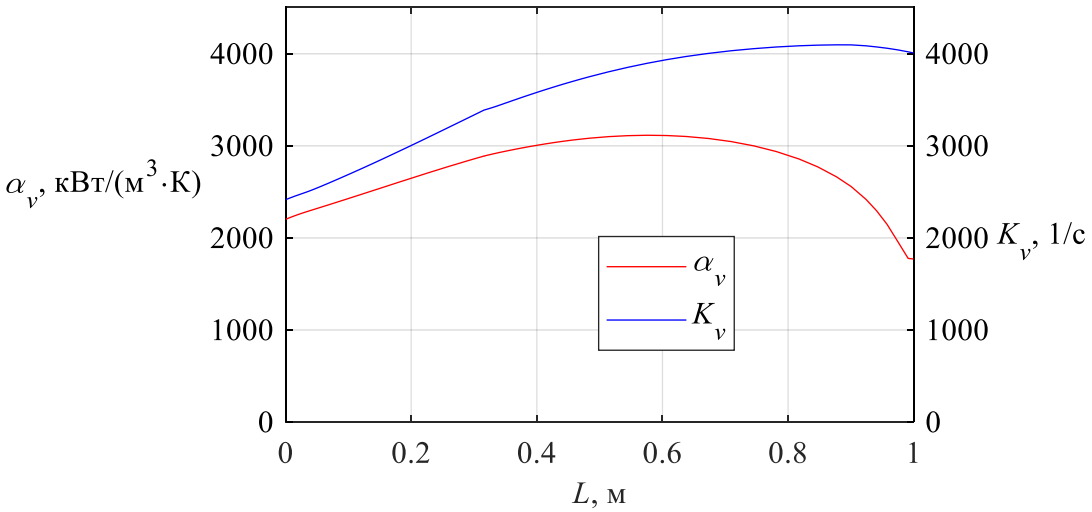


Рис. 3. Профілі об'ємних коефіцієнтів тепло- та масообміну

Об'ємний коефіцієнт масовіддачі K_v, який контролюється переважно зовнішньою аеродинамікою, стабільно зростає майже на всій довжині сушарки (до x = 0,9 м). Це зумовлено безперервним збільшенням питомої міжфазної поверхні шару a_v внаслідок термічної усадки частинок. Його спад на самій кінцевій ділянці викликаний розширенням шару через зростання швидкості газу та відповідним зменшенням об'ємної концентрації дисперсної фази. Натомість об'ємний коефіцієнт теплопередачі та α_v зростає лише на ділянці до середини апарату (до x = 0,57 м). Після проходження цієї координати товщина пористої скоринки моногідрату стає настільки великою, що її внутрішній опір повністю нівелює збільшення міжфазної поверхні. Відбувається падіння ефективного коефіцієнта

теплопередачі, що відображається у спадному тренді α_v і підтверджує лімітуючу роль внутрішньотермічної стадії теплопровідності наприкінці процесу.

Одночасно з інтенсивним тепломасообміном, глибока дегідратація супроводжується перебудовою фізичної структури матеріалу. Втрата 6 молів кристалізаційної вологи приводить до суттєвої об'ємної усадки частинок, при цьому істинна густина твердої фази безперервно зростає від початкових 1890 кг/м^3 до значень близьких до 3000 кг/м^3 при зменшенні еквівалентного діаметра d_{32}, що кардинально змінює локальну гідродинаміку.

Задане синусоїдальне падіння швидкості газу U_g від 1,3 до 0,9 м/с у середній частині апарата призводить до локального зменшення порозності шару ε від початкових 0,65 до 0,59. У комбінації зі зростанням істинної густини частинок це викликає стрімке зростання концентрації маси частинок від 670 кг/м^3 на вході до 954 кг/м^3 у центрі апарата. На другій половині апарату розрахункова швидкість газу знову зростає, розширюючи шар до ε = 0,65, що уповільнює темп зростання концентрації маси частинок до фінального значення 1031 кг/м^3.

Особливої уваги заслуговує механіка винесення частинок з апарату з відпрацьованим сушильним газом (рис. 4). Алгоритм реалізує концепцію динамічного усічення функції розподілу, де локальний критичний діаметр відсікання d_{cut} безперервно змінюється. На вході в апарат (x = 0) при швидкості газу 1,3 м/с очікувано відбувається первинне видування найдрібніших фракцій, у середній частині апарату завдяки штучному зниженню швидкості процес винесення призупиняється. Проте, на другій половині апарата, де швидкість газу знов зростає, спостерігається інтенсивне вторинне винесення. Частинки, які на вході в апарат уникли винесення, за час проходження перших секцій зазнали глибокої усадки і зменшилися в об'ємі. При відновленні високої швидкості дуття частинки вже меншого діаметру, але значно більшої істинної густини, долають межу швидкості витання і захоплюються газовим потоком.

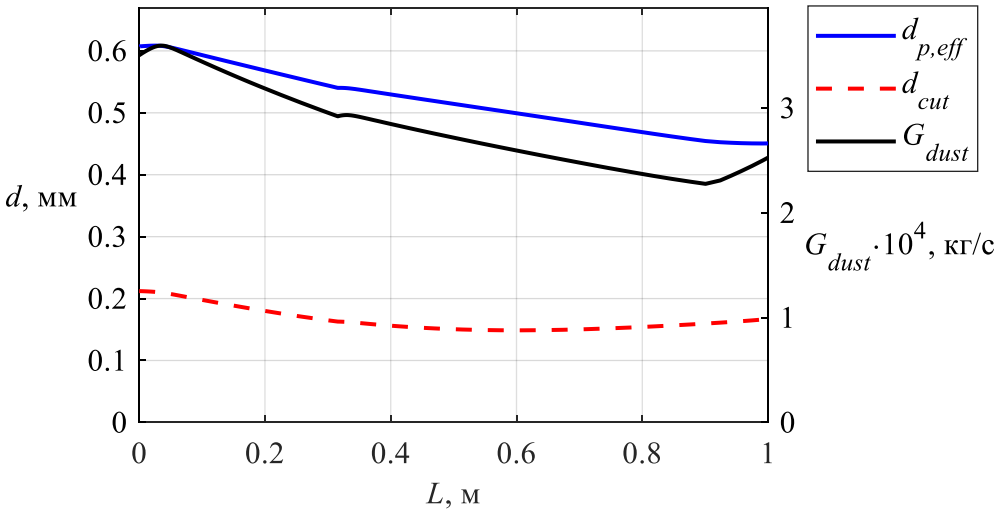


Рис. 4. Зміна діаметрів та інтенсивності винесення в апараті

Зміна гранулометричного складу матеріалу внаслідок одночасної дії термічної усадки та механізму винесення представлена на рис. 5 у вигляді 3D-поверхні. Для переходу від диференціальної функції щільності розподілу до масових часток фракцій ΔQ_3 розрахунок проводився кроком 0,1 мм.

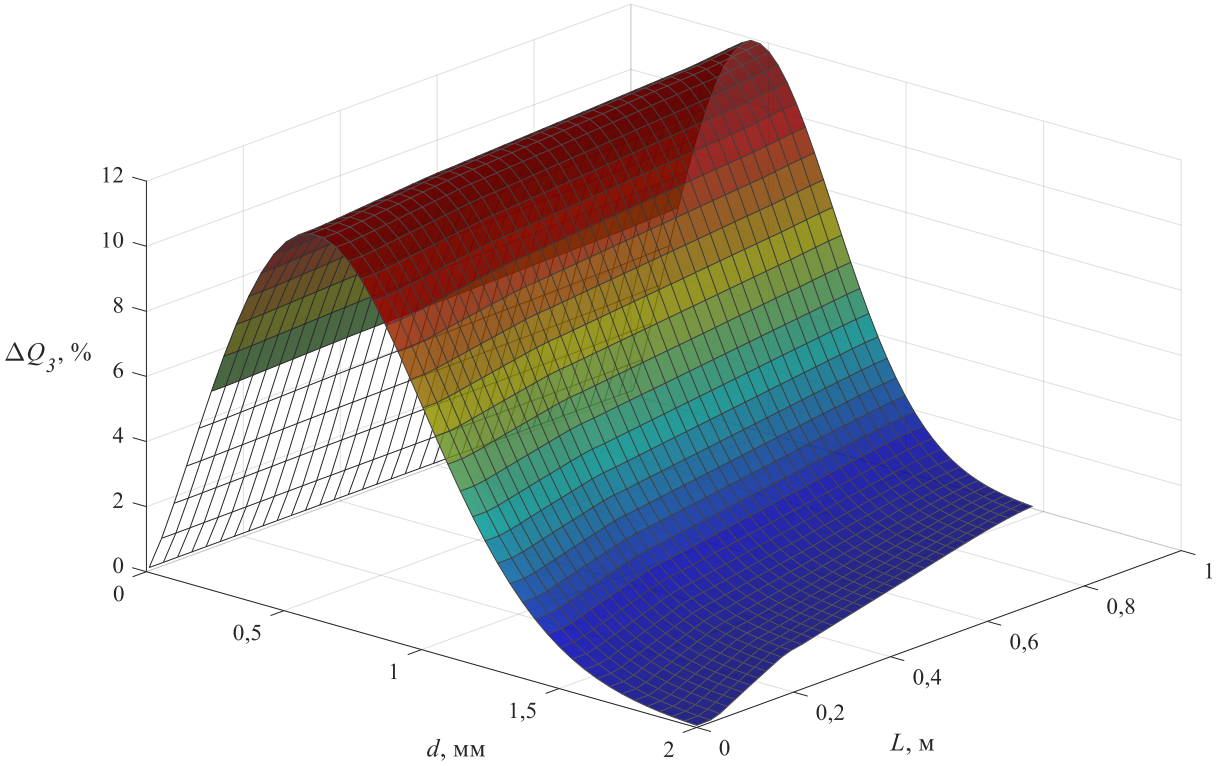


Рис. 5. Зміна діаметрів та інтенсивності винесення в апараті

Сітка графіку ілюструє повний теоретичний розподіл частинок, пік якого плавно зміщується від ≈0,6 мм до ≈0,4 мм виключно через втрату кристалізаційної вологи та ущільнення. Суцільна кольорова поверхня відображає фактичну наявність матеріалу в шарі, Відсутність кольорової заливки у зоні дрібних фракцій візуалізує динамічне усічення спектра розмірів газовим потоком. Найбільша деформація гранулометричного складу відбувається на вході в апарат і на його фінальній стадії, де швидкість газу є максимальною.

Результати аналізу базового технологічного режиму повністю верифікують працездатність створеної математичної моделі. Водночас емпіричний підбір вхідних параметрів дозволяє отримати якісний продукт, проте не гарантує досягнення технологічного максимуму продуктивності. Наявність верифікованої обчислювальної бази відкриває шлях до машинного синтезу оптимальних режимів у багатовимірному просторі рішень.

Багатокритеріальна оптимізація профілів керування в багатовимірному просторі. Вибір раціонального режиму роботи горизонтальної багатосекційної сушарки полягає в забезпеченні визначеної кінцевої якості продукту та необхідності балансувати між інтенсифікацією виробництва та енергетичною ощадністю. Оскільки конструкція апарата дозволяє формувати незалежні аеродинамічний та температурний профілі вздовж решітки, простір пошуку було суттєво розширено. Вектор керуючих змінних X складався із наступних незалежних параметрів: масового навантаження по сировині ($G_{s,in} \in [0{,}003;\ 0{,}012$ кг/с]), початкової (в першій секції) швидкості газу ($U_{g,in} \in [0{,}8;\ 1{,}3$ м/с]), початкової (в першій секції) температури теплоносія ($T_{g,in} \in [150;\ 250$°C]), а також чотирьох поліноміальних коефіцієнтів ($c_{1,U}$, $c_{2,U}$, a_T, b_T), які математично формулювали просторові профілі.

З двох конкуруючих цільових функцій перша спрямовувалась на максимізацію масової продуктивності апарата за готовим продуктом, друга полягала у мінімізації сумарних питомих енерговитрат, що включали як теплову потужність, так і еквівалентну механічну роботу дуттьового обладнання.

На модель накладено наступні обмеження:

1. Захист від недосушування та пересушування: $0{,}85 \le n_{out} \le 1{,}15$;
2. Запобігання термічній деструкції: $T_s \le 150$°C.
3. Лімітування інтенсивності пневмотранспорту: $U_g / U_{mf} \le 6{,}0$.
4. Захист від залягання шару $U_g / U_{mf} > 2{,}0$.

Для глобального пошуку було застосовано генетичний алгоритм недомінованого сортування NSGA-II, який згенерував множину $2 \cdot 10^4$ недомінованих компромісних рішень (фронт Парето) (рис. 6). Кожна точка на фронті представляє режим за якого неможливо збільшити продуктивність без погіршення енергетичної ефективності.

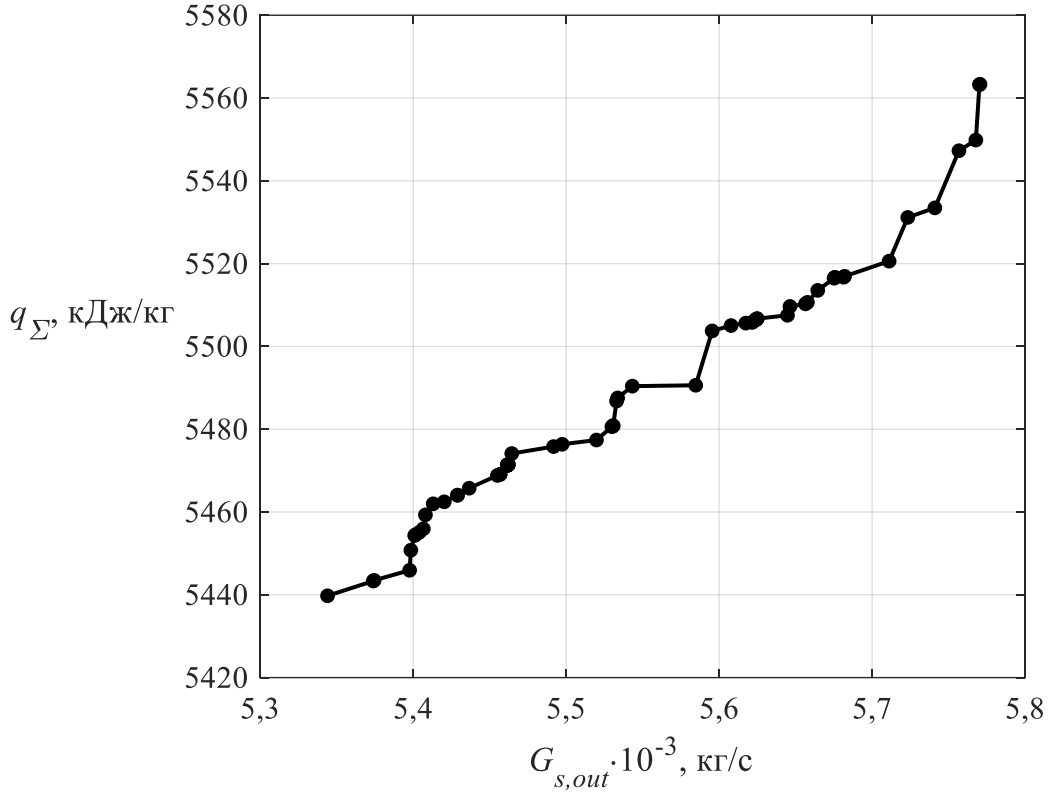


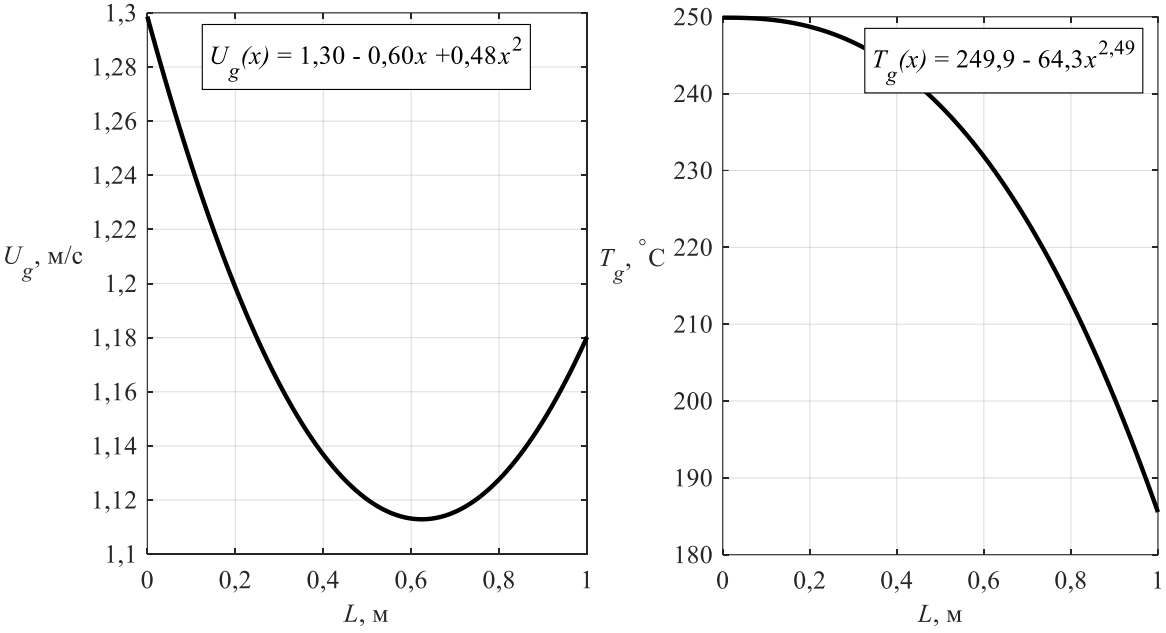
Рис. 6. Фронт Парето

Подолання стохастичної нестабільності. Метод інформованої ініціалізації. Первинні запуски алгоритму NSGA-II з повністю випадковою генерацією початкової популяції виявили схильність системи до передчасної конвергенції в локальних екстремумах. Висока нелінійність моделі та наявність фізичних обмежень перетворила простір рішень на вузький коридор зі складною топологією. За відсутності апріорних даних «сліпий» алгоритм часто потрапляв у пастку низьких швидкостей псевдозрідження $U_{g,in} \approx 0{,}9$ м/с. За таких умов газова фаза була фізично не здатна передати достатню кількість теплоти для випаровування значних мас вологи навіть при температурах 240...250°C. Щоб уникнути недосушування, алгоритм штучно знижував витрату вологого гептагідрату. Внаслідок цього еволюційний пошук припинявся на заниженій масовій продуктивності $G_{s,out} \approx 0{,}0035$ кг/с при високих енерговитратах (понад 6500 кДж/кг).

Для усунення стохастичної нестабільності та розширення простору пошуку було імплементовано метод початкової ініціалізації. Суть полягала в інтеграції до базової матриці першого покоління (початкової популяції) координат перспективного технологічного вектору, виявленого під час попереднього аналізу ($G_{s,in} = 0{,}0095$ кг/с, $U_{g,in} = 1{,}28$ м/с, $T_{g,in} = 245$°C). Цей крок дозволив алгоритму миттєво покинути локальну гідродинамічну пастку і сфокусувати обчислювальні ресурси NSGA-II на вдосконаленні області глобального технологічного оптимуму.

Аналіз глобального оптимуму та топології просторових рішень. Впровадження початкової ініціалізації забезпечило понад 44 400 успішних інтегрувань (результатів розрахунків). Алгоритм сформував високо розташований фронт Парето, що характеризується масовою ефективністю $G_{s,out}$ = 0,00534–0,00577 кг/с при стабільно низьких питомих енерговитратах qΣ, що знизилися до рівня 5440...5563 кДж/кг.

Аналіз режиму абсолютної максимальної продуктивності розкриває фізичну суть синтезованих алгоритмів керуючих впливів (рис. 5).



а *б*

Рис. 7. Синтезовані оптимальні профілі для режиму максимальної продуктивності: а – швидкості; б – температури газу

Гідродинамічний профіль сушильного агента набуває вираженої форми параболічної кривої: $U_g(x) = 1{,}3 – 0{,}60 \cdot x + 0{,}48 \cdot x^2$. Виявлений локальний мінімум швидкості в центральній зоні апарата є точним відгуком системи на еволюцію аеродинамічних характеристик. На вході алгоритм формує форсоване дуття (1,3 м/с) для руйнування агломератів вологого гептагідрату. У центральній зоні алгоритм автоматично ініціює спад швидкості до 1,11 м/с, блокуючи значне винесення пилу. На виході фіксується компенсаційне зростання швидкості до 1,18 м/с для надійного утримання ущільненого моногідрату. Температурний профіль газу $T_{g,in}(x) = 250 – 64{,}3 \cdot x^{2{,}49}$ реалізує стратегію пролонгованого впливу. Максимальний тепловий потенціал утримується вздовж основної частини робочої камери. Стрімкий експоненційний температурний спад до 186 °C, локалізований виключно наприкінці апарата, гарантує стабілізацію температури твердої фази на безпечному рівні 132,8 °C. Важливо підкреслити, що наведені числові значення поліноміальних коефіцієнтів не слід розглядати як жорстко детерміновані константи. Їхня головна цінність полягає у математичному відображенні загальної макродинаміки, векторної спрямованості та ключових градієнтів тепломасообміну. У межах знайденого Парето-оптимального діапазону точні значення цих коефіцієнтів мають певну варіативність.

Побудований тривимірний ландшафт для простору керуючих змінних (рис. 7) наочно візуалізує конкурентний конфлікт цілей та складність оптимізації. Точка максимальної продуктивності (червона маркерна позначка) розташована на крутому схилі площини енерговитрат на межі допустимої технологічної зони. Рух у зону абсолютного енергетичного мінімуму (зелена маркерна позначка q_Σ = 5440 кДж/кг) супроводжується стрімким звуженням допустимого коридору параметрів і експоненційним падінням масової ефективності.

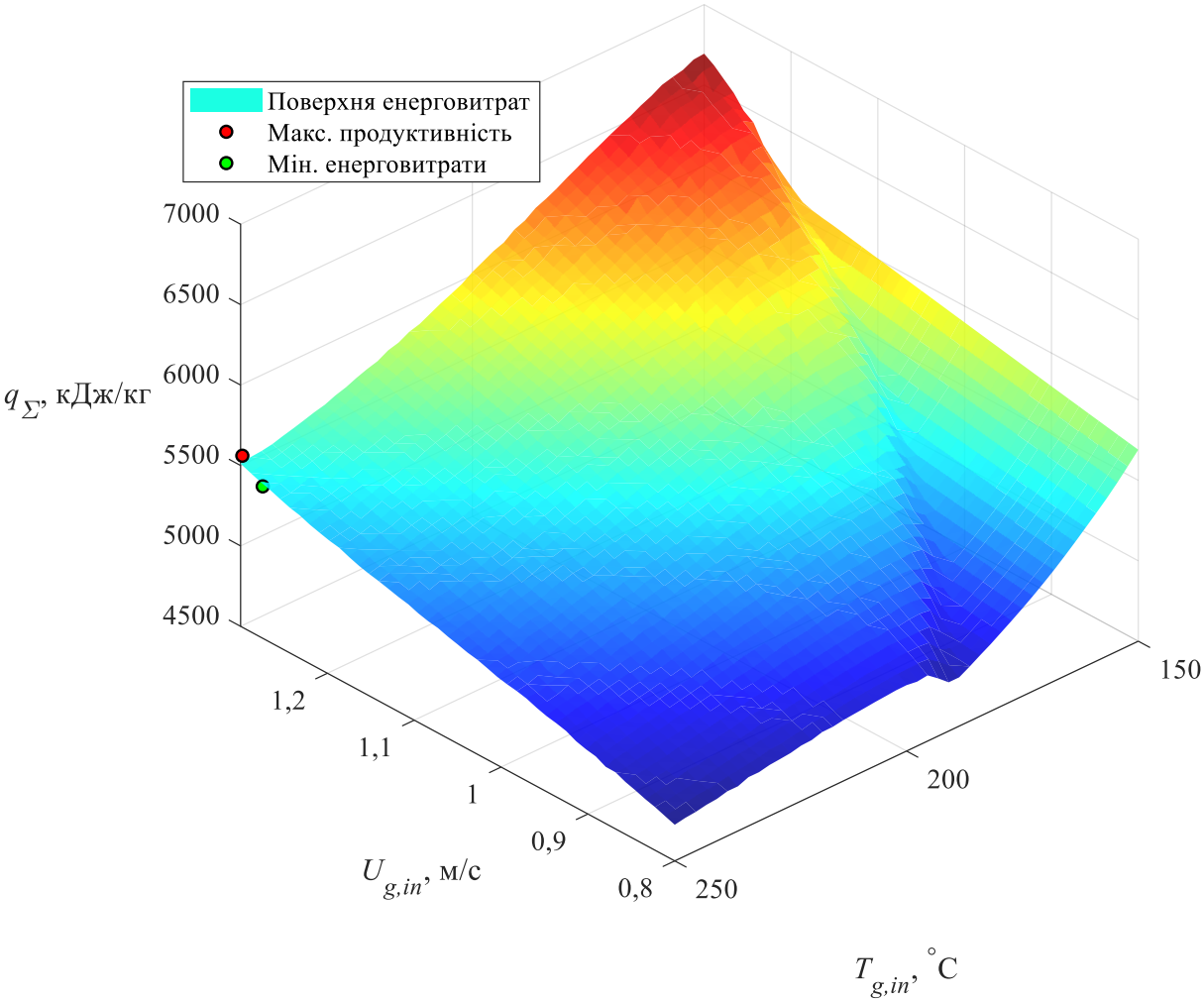


Рис. 7. Ландшафт рішень і конкурентний конфлікт цільових функцій

Отримані результати доводять, що шлях конструювання технологічного обладнання для дегідратації термолабільних кристалогідратів лише з використанням традиційних статичних параметрів може бути енергетично й технологічно хибним. Ефективне ведення процесу вимагає застосування методів багатовимірного машинного синтезу для динамічного управління просторовими профілями тепломасообміну.

Обмеження результатів та перспективи подальших досліджень. Попри високу точність та обчислювальну стійкість розробленої 1D–моделі результати досліджень мають інтерпретуватися з урахуванням прийнятих припущень.

По-перше, кінетичний модуль та блок винесення базується на ідеалізованій моделі стиснення частинки, яка враховує виключно термічну об’ємну усадку. У реальних промислових апаратах кристалогідрати зазнають додаткового вторинного пилоутворення внаслідок механічного стирання між собою та стінками обладнання, а також можливого термічного розтріскування при різкому нагріванні. Відповідно, фактична інтенсивність винесення пилу в реальних умовах може бути вищою за розраховану по функції Розіна–Раммлера.

По-друге, динамічна структура потоку твердої фази в горизонтальному апараті прийнята за моделлю ідеального витіснення. Хоча широке аеродинамічне секціонування суттєво звужує розподіл часу перебування, у реальному киплячому шарі завжди присутнє зворотне перемішування та повздовжня дисперсія.

Перспективи подальшого розвитку даного дослідження полягають у переході від 1D–до CFD–DEM моделювання. Отримані в цій роботі оптимальні профілі швидкості та температур слугуватимуть оптимальними вихідними даними та граничними умовами, що дозволить дослідити динаміку псевдозрідження, кінетику дегідратації, верифікувати процеси змішування полідисперсної фази, що недоступно в рамках цієї одновимірної моделі.

Висновки. Розроблено математичну модель для розрахунку та оптимізації процесу безперервної дегідратації залізного купоросу в горизонтальному багатосекційному апараті киплячого шару. Обґрунтовано застосування детермінованої одновимірної моделі, що поєднує еволюцію гранулометричного складу матеріалу, розрахунки динамічної зміни тепло-фізичних властивостей частинок, кінетики дегідратації кристалогідрата з хімічно зв'язаною вологою. Це дозволило оцінити гідродинаміку псевдозрідження, інтенсивність винесення дрібних фракцій матеріалу із сушильним агентом, зміни тепло- та масообміну вздовж локальних секцій та в апараті загалом. Модель на основі алгоритму ode15s у середовищі MATLAB дозволила провести розрахунки без залучення ресурсомістких методів популяційного балансу PBM, забезпечила обчислювальну стійкість, необхідну для ітераційної оптимізації.

Сформульовано та, із застосуванням алгоритму NSGA–II, розв'язано задачу багатокритеріальної оптимізації у визначеному просторі керуючих змінних. Виявлено схильність алгоритму до передчасної конвергенції у локальних гідродинамічних пастках із заниженою масовою продуктивністю. Доведено, що впровадження методу попередньої ініціалізації успішно долає стохастичну нестабільність алгоритму.

Проведено аналіз синтезованого фронту Парето множини рішень, що забезпечують високу масову продуктивність при мінімізації сумарних питомих енерговитрат.

З урахуванням прийнятих у моделі припущень і технологічних обмежень встановлено оптимальний гідродинамічний та температурний профіль сушильного агента, що подається в апарат.

Отримані результати доводять технологічну й енергетичну ефективність, а також доцільність застосування методів багатовимірного пошуку оптимальних параметрів і режимів.

Список використаних джерел

1. Gázquez, M. J., Bolívar, J. P., Garcia-Ten, J., & Vaca, F. (2021). A review of the commercial uses of sulphate minerals from the titanium dioxide pigment industry: The case of Huelva (Spain). *Minerals*, 11(6), Article 575.

2. Lide, D. R. (Ed.). (2004). *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (85th ed.). CRC Press.

3. Green, D. W., & Perry, R. H. (Eds.). (2008). *Perry's chemical engineers' handbook* (8th ed.). McGraw-Hill.

4. Gálwey, A. K., & Brown, M. E. (1999). *Thermal decomposition of ionic solids*. Elsevier.

5. Mujumdar, A. S. (Ed.). (2014). *Handbook of industrial drying* (4th ed.). CRC Press.

6. Атаманюк, В. М., & Гумницький, Я. М. (2013). *Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів*. Видавництво Львівської політехніки.

7. Tsiura, N., Kindzera, D., Huzova, I., & Atamanyuk, V. (2021). Study of the kinetics of drying iron (II) sulfate heptahydrate by filtration method. *ScienceRise*, (1), 11–21.

8. Kunii, D., & Levenspiel, O. (1991). *Fluidization engineering* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

9. Bachmann, P., & Tsotsas, E. (2015). Analysis of residence time distribution data in horizontal fluidized beds. *Procedia Engineering*, 102, 790–798.

10. Gidaspow, D. (1994). *Multiphase flow and fluidization: Continuum and kinetic theory descriptions*. Academic Press.

11. Rego, A. S. C. (2022). *Kinetic study on thermal decomposition of sulfates: TGA experiments and modelling* [Doctoral dissertation, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro]. PUC-Rio Digital Repository.

12. Levenspiel, O. (1998). *Chemical reaction engineering* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

13. Burgschweiger, J., & Tsotsas, E. (2002). Experimental investigation and modelling of continuous fluidized bed drying under steady-state and dynamic conditions. *Chemical Engineering Science*, 57(24), 5021–5038.

14. Nilsson, L., & Wimmerstedt, R. (1988). Residence time distribution and particle dispersion in a longitudinal-flow fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, 43(5), 1153–1160.

15. Alonso, J., & Picado, A. (2021). Simulation of a continuous fluidised bed dryer for shelled corn. *Nexo Revista Científica*, 34(03), 58–70.

16. de Munck, M. J. A., Dullemond, M., Peters, E. A. J. F., & Kuipers, J. A. M. (2023). Experimental gas-fluidized bed drying study on the segregation and mixing dynamics for binary and ternary solids. *Chemical Engineering Journal*, 465, Article 142756.

17. Chen, K., Bachmann, P., Bück, A., Jacob, M., & Tsotsas, E. (2017). Experimental study and modeling of particle drying in a continuously-operated horizontal fluidized bed. *Particuology*, 34, 14–26.

18. Dincer, I., & Sahin, A. Z. (2004). A new model for thermodynamic analysis of a drying process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(4), 645–652.

19. Friso, D. (2021). Mathematical modelling of conveyor-belt dryers with tangential flow for food drying up to final moisture content below the critical value. *Inventions*, 6(2), 43.

20. Wang, T., Debelak, K. A., & Roth, J. A. (2007). Dehydration of iron(II) sulfate heptahydrate. *Thermochimica Acta*, 462(1-2), 89–93.

21. Kirnyi, V., & Yukhymenko, M. (2025). Physical and chemical properties of iron(II) sulfate heptahydrate as factors for selecting the drying process mode in a fluidized bed apparatus. *Technology Audit and Production Reserves*, 4(3(84)), 18–25.

22. Neugebauer, C., Bück, A., Palis, S., Mielke, L., Tsotsas, E., & Kienle, A. (2018). Influence of thermal conditions on particle properties in fluidized bed layering granulation. *Processes*, 6(12), 233.

23. Allen, T. (2003). *Powder sampling and particle size determination* (1st ed.). Elsevier Science.

24. Geldart, D. (Ed.). (1986). *Gas fluidization technology*. John Wiley & Sons.

25. Meyer, K., Bück, A., & Tsotsas, E. (2015). Dynamic multi-zone population balance model of particle formulation in fluidized beds. *Procedia Engineering*, 102, 1456–1465.

26. Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer* (7th ed.). John Wiley & Sons.

27. Rangaiah, G. P., & Bonilla-Petriciolet, A. (Eds.). (2013). *Multi-objective optimization in chemical engineering: developments and applications*. John Wiley & Sons.

28. Bhaskar, V., Gupta, S. K., & Ray, A. K. (2000). Applications of multiobjective optimization in chemical engineering. *Reviews in Chemical Engineering*, 16(1), 1–54.

29. Nazghelichi, T., Jafari, A., Kianmehr, M. H., & Aghbashlo, M. (2013). CFD simulation and optimization of factors affecting the performance of a fluidized bed dryer. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 32(4), 115–129.

30. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197.

31. Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251–283.

References

1. Gázquez, M. J., Bolívar, J. P., Garcia-Ten, J., & Vaca, F. (2021). A review of the commercial uses of sulphate minerals from the titanium dioxide pigment industry: The case of Huelva (Spain). *Minerals*, 11(6), Article 575.

2. Lide, D. R. (Ed.). (2004). *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (85th ed.). CRC Press.

3. Green, D. W., & Perry, R. H. (Eds.). (2008). *Perry's chemical engineers' handbook* (8th ed.). McGraw-Hill.

4. Gálwey, A. K., & Brown, M. E. (1999). *Thermal decomposition of ionic solids*. Elsevier.

5. Mujumdar, A. S. (Ed.). (2014). *Handbook of industrial drying* (4th ed.). CRC Press.

6. Atamaniuk, V. M., & Humnytskyi, Ya. M. (2013). *Naukovi osnovy filtratsiinoho sushinnia dyspersnykh materialiv* [Scientific basis of filtration drying of dispersed materials]. Lviv Polytechnic Publishing House.

7. Tsiura, N., Kindzera, D., Huzova, I., & Atamanyuk, V. (2021). Study of the kinetics of drying iron (II) sulfate heptahydrate by filtration method. *ScienceRise*, (1), 11–21.

8. Kunii, D., & Levenspiel, O. (1991). *Fluidization engineering* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

9. Bachmann, P., & Tsotsas, E. (2015). Analysis of residence time distribution data in horizontal fluidized beds. *Procedia Engineering*, 102, 790–798.

10.Gidaspow, D. (1994). *Multiphase flow and fluidization: Continuum and kinetic theory descriptions*. Academic Press.

11.Rego, A. S. C. (2022). *Kinetic study on thermal decomposition of sulfates: TGA experiments and modelling* [Doctoral dissertation, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro]. PUC-Rio Digital Repository.

12.Levenspiel, O. (1998). *Chemical reaction engineering* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

13.Burgschweiger, J., & Tsotsas, E. (2002). Experimental investigation and modelling of continuous fluidized bed drying under steady-state and dynamic conditions. *Chemical Engineering Science*, 57(24), 5021–5038.

14.Nilsson, L., & Wimmerstedt, R. (1988). Residence time distribution and particle dispersion in a longitudinal-flow fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, 43(5), 1153–1160.

15.Alonso, J., & Picado, A. (2021). Simulation of a continuous fluidised bed dryer for shelled corn. *Nexo Revista Científica*, 34(03), 58–70.

16.de Munck, M. J. A., Dullemond, M., Peters, E. A. J. F., & Kuipers, J. A. M. (2023). Experimental gas-fluidized bed drying study on the segregation and mixing dynamics for binary and ternary solids. *Chemical Engineering Journal*, 465, Article 142756.

17.Chen, K., Bachmann, P., Bück, A., Jacob, M., & Tsotsas, E. (2017). Experimental study and modeling of particle drying in a continuously-operated horizontal fluidized bed. *Particuology*, 34, 14–26.

18.Dincer, I., & Sahin, A. Z. (2004). A new model for thermodynamic analysis of a drying process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(4), 645–652.

19.Friso, D. (2021). Mathematical modelling of conveyor-belt dryers with tangential flow for food drying up to final moisture content below the critical value. *Inventions*, 6(2), 43.

20.Wang, T., Debelak, K. A., & Roth, J. A. (2007). Dehydration of iron(II) sulfate heptahydrate. *Thermochimica Acta*, 462(1-2), 89–93.

21.Kirnyi, V., & Yukhymenko, M. (2025). Physical and chemical properties of iron(II) sulfate heptahydrate as factors for selecting the drying process mode in a fluidized bed apparatus. *Technology Audit and Production Reserves*, 4(3(84)), 18–25.

22.Neugebauer, C., Bück, A., Palis, S., Mielke, L., Tsotsas, E., & Kienle, A. (2018). Influence of thermal conditions on particle properties in fluidized bed layering granulation. *Processes*, 6(12), 233.

23.Allen, T. (2003). *Powder sampling and particle size determination* (1st ed.). Elsevier Science.

24.Geldart, D. (Ed.). (1986). *Gas fluidization technology*. John Wiley & Sons.

25.Meyer, K., Bück, A., & Tsotsas, E. (2015). Dynamic multi-zone population balance model of particle formulation in fluidized beds. *Procedia Engineering*, 102, 1456–1465.

26.Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer* (7th ed.). John Wiley & Sons.

27.Rangaiah, G. P., & Bonilla-Petriciolet, A. (Eds.). (2013). *Multi-objective optimization in chemical engineering: developments and applications*. John Wiley & Sons.

28.Bhaskar, V., Gupta, S. K., & Ray, A. K. (2000). Applications of multiobjective optimization in chemical engineering. *Reviews in Chemical Engineering*, 16(1), 1–54.

29.Nazghelichi, T., Jafari, A., Kianmehr, M. H., & Aghbashlo, M. (2013). CFD simulation and optimization of factors affecting the performance of a fluidized bed dryer. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 32(4), 115–129.

30.Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197.

31.Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251–283.

Дата першого надходження статті до видання: 22.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.03.2026

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

UDC 66.047.57:66.011.4:661.872.953:519.863

***Viacheslav Kirnyi*[1], *Mykola Yukhymenko*[2]**

[1]PhD student of the Department of Chemical Engineering
Sumy State University (Sumy, Ukraine)
E-mail: v.kirnyi@pohnp.sumdu.edu.ua. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0003-1490-0600

[2]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Engineering
Sumy State University (Sumy, Ukraine)
E-mail: m.yukhymenko@pohnp.sumdu.edu.ua. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-1405-1269

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF IRON(II) SULFATE HEPTAHYDRATE DEHYDRATION IN A SECTIONAL FLUIDIZED BED DRYER

This article addresses the mathematical modeling and multi-objective optimization of the continuous dehydration process of iron(II) sulfate heptahydrate to produce a stable monohydrate. A comprehensive, deterministic 1D model has been developed for a horizontal sectional fluidized bed dryer. The model considers the impact of thermal conductivity on heat transfer kinetics, as well as the stepwise nature of chemically bound moisture dehydration. It also incorporates an analytical calculation of the dynamic evolution of particle size distribution. This approach enables the highly accurate prediction of the intensity of material particle elutriation from the fluidized bed due to the upward flow of the drying agent. This method avoids the use of resource-intensive population balance methods and provides the computational stability necessary for iterative optimization.

A multi-objective optimization problem was formulated in a multidimensional space of control variables to determine the rational operating regimes. The Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) was used to solve this problem. The solution space was found to have a highly complex topology due to four nonlinear physicochemical constraints that prevent under-drying, over-drying, defluidization, and pneumatic transport. Additionally, the algorithm's tendency to prematurely converge in local hydrodynamic traps with underestimated mass efficiency was revealed. To overcome the algorithm's stochastic instability, an informed initialization method was implemented to ensure a transition to the global optimum zone. Analysis of the Pareto front identified a set of non-dominated trade-off solutions that maximize the dryer's mass productivity while minimizing total specific energy consumption. The optimal hydrodynamic profile of the drying agent is parabolic. It forms an aerodynamic minimum in the central zone that compensates for particle mass loss and blocks massive dust elutriation. The optimal temperature profile exhibits exponential decay, implementing a prolonged kinetic forcing strategy while preventing thermal degradation of the target monohydrate.

Keywords: *dehydration; iron(II) sulfate; horizontal sectional fluidized bed dryer; mathematical modeling; multi-objective optimization.*

Fig.: 7. Table: 1. References: 31.

Кірний В. Л., Юхименко М. П. Багатокритеріальна оптимізація процесу дегідратації заліза(ii) сульфат гептагідрату в багатосекційному апараті киплячого шару. *Технічні науки та технології,* 2026. № 2(44). С. 366-388. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-366-388.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-389-399
UDC 621.357

Serhii Nelipovych[1], Dmytro Ushchapovskyi[2], Victoria Vorobyova[3], Georgii Vasyliev[4]

[1] Student, Department of Electrochemical Productions Technology
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: serik.meshok@gmail.com. **ORCID**: https://orcid.org/0009-0005-6972-1521

[2] PhD in Technical Sciences, Professor Associate, Department of Electrochemical Productions Technology
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: soltdim@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-2809-2774. **SCOPUS Author ID:** 57207984741

[3] Doctor in Technical Sciences, Professor, Department of Physical Chemistry Technology
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: vorobyovavika1988@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7479-9140. **SCOPUS Author ID:** 55808771000

[4] Doctor in Technical Sciences, Professor, Department of Electrochemical Productions Technology,
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: g.vasyliev@kpi.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-4056-5551. **SCOPUS Author ID:** 56105504500

THE NICKEL PLATING OF 3D-PRINTED PLA-PLASTIC PARTS

This work demonstrates the possibility of obtaining a finely crystalline and well-adhered conductive layer of copper sulfide, the value of the resistivity of which is comparable to the corresponding parameter for conductive layers obtained from graphite by a mechanical method.

The effect of various commercial surface-active additives to the nickel-plating electrolyte on the quality of the nickel coating obtained at the galvanic metallization stage was investigated. It has been established that the addition of an anti-pitting additive, a dispersant-wetting agent, accelerates the process of nickel electrodeposition on the copper sulfide activated dielectric surface. A significant improvement in the uniformity of the coating and obtaining a fine-crystalline structure is ensured by the use of a complex of bright-forming additives based on saccharin, which provides a high throwing power of the nickel-plating electrolyte in the range of low current densities up to 0,5 A/dm^2.

Keywords: *chemical-galvanic metallization; conductive layer; copper sulfide; nickel coating; PLA-plastic; 3D-printing. Fig.: 9. Table: 1. References: 15.*

Relevance of the research. Electrodeposition of galvanic coatings on dielectric surfaces is carried out to give the surface of plastic patrs a decorative appearance, light-reflecting properties, as well as to create electrical contact in printed circuit boards and radio-electronic devices [1; 2]. In addition, the dielectrics metallization process can be applied to obtain various nanomaterials with a highly developed surface [3; 4].

Problem statement. In the case of chemical-galvanic metallization of dielectric materials, it is necessary to create catalytic properties in order to selectively deposit the metal on the surface of the corresponding material. For this purpose, an activation process is used, which involves the use of high-cost palladium-based chemical compounds [5]. Thus, replacing the expensive palladium catalyst during activation with palladium-free conductive compounds is relevant. An alternative to this are conductive layers based on metal sulfides such as zinc, copper, and nickel.

Analysis of recent research and publications. In work [6] it was proposed to obtain conductive layers based on copper sulfides by the adsorption-diffusion method using higher polythionium acids. In [7], the synthesis of copper sulfide nanowires is proposed using a hydrothermal method using thiourea as a sulfur source. Also known [8] is the production of nanostructured sulfide from solutions in which the source of sulfur is thiosulfate. In all cases, copper-containing solutions for the synthesis of sulfides contain complex compounds of the latter, and the synthesis of sulfide materials involves the use of hard-to-reach components and additional heating of solutions to a temperature of 50…90 °C.

On the other hand, the next main stage of chemical-galvanic metallization of dielectrics is the electrodeposition of a high-quality, continuous and fine-crystalline galvanic coating on the formed conductive layer. Despite the high conductivity of the materials used to create conductive layers, due to the relatively small thickness of the latter, their conductivity can be an order

© S. Nelipovych, D. Ushchapovskyi, V. Vorobyova, G. Vasyliev, 2026

of magnitude lower than that of the corresponding bulk material. In particular, a study of the mechanism of the nickel electrodeposition process on a paraffin-impregnated graphite electrode is proposed in [9]. The electroplating conditions in this case may be similar to those implemented during electrodeposition of nickel onto a surface activated by a graphite conductive layer. In addition, in some cases [10], copper sulfides, similar to graphite, can exhibit hydrophobic properties.

Uninvestigated parts of a common problem. In [11], to create a conductive layer, a simpler method is presented, which involves the deposition of copper sulfide with the use of ammonium copper complexes and sodium sulfide solutions, which also does not require additional heating of the solutions. However, it is important to establish the sequence of operations and the duration of processing to form a homogeneous fine-crystalline conductive layer with a sufficient level of conductivity. The introduction of the latest technology for producing plastic products by 3D-printing is becoming widespread, however, the influence of appropriate processing on the adhesion and quality of conductive layers obtained on such products is poorly studied. In addition, it is important to study the influence of the electrolyte composition on the nickel electrodeposition process on the surface of the conductive layer formed from copper sulfide.

Research objective. The purpose of this work is to investigate the possibility of obtaining a highly conductive copper sulfide layer on PLA-plastic parts obtained by 3D-printing, as well as to establish the influence of surface-active additives in the nickel-plating electrolyte on the electrochemical parameters and quality of the nickel coating on a copper sulfide-activated dielectric base.

The statement of basic materials

1.1 Deposition of a copper sulfide conductive layer. The deposition of a copper sulfide conductive layer was carried out by a two-stage treatment, which consisted of the initial treatment of the plastic product in a solution of ammonium copper (II) complex, followed by rinsing and treatment in a solution of sodium sulfide [11]. For primary treatment, two types of copper ammonium complex solutions were used, which contained 0.4 M divalent copper (in the form of sulfate or basic copper carbonate) and NH_4OH (25%) 100 ml/l. The alkalinity of the corresponding solution was around pH 11. According to the data described in [11], after initial treatment in an ammonium complex solution and rinsing, the surface of plastic samples was treated in a sodium sulfide solution with a concentration of 100 g/l. The mechanism of formation of the sulfide conductive layer can be described as follows. At the first stage, the solution containing copper complex compounds is mechanically captured by the surface. As a result of further rinsing, which leads to a decrease in pH, the ammonium complex is destroyed with the formation of colloidal copper hydroxide according to the reaction [12]:

$$[Cu(NH_3)_4]SO_4 + 4H_2O = Cu(OH)_2 + (NH_4)_2SO_4 + 2NH_4OH.$$

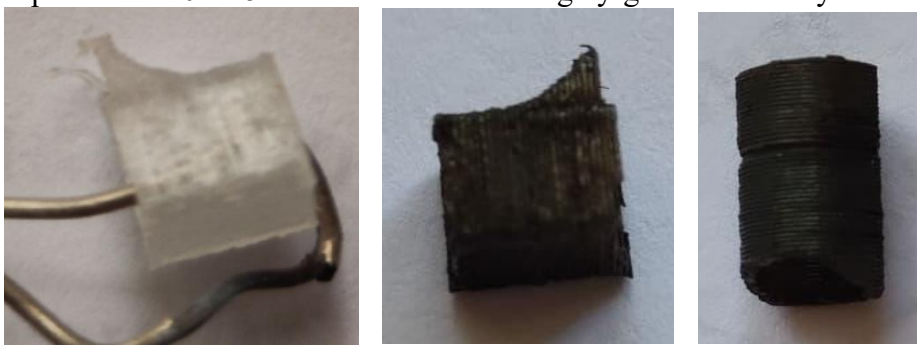
The formed copper hydroxide has a colloidal form, as a result of which it binds well to the surface of plastic samples. As a result of further treatment in a sodium sulfide solution, the following reaction occurs, which leads to the formation of a sulfide layer:

$$Cu(OH)_2 + Na_2S = CuS + 2NaOH.$$

Copper sulfides are also formed by direct interaction of residues of unhydrolyzed complex copper ions with a sodium sulfide solution.

Since the main focus of this work was to improve the technology of metallization of plastic products obtained by 3D-printing, fragments of products printed from transparent PLA-plastic were used as the test samples. On average, the area of the samples studied was 2...4 cm^2. The studied plastic samples, placed on a copper wire, were sequentially immersed in solutions of the ammonium complex of copper and sodium sulfide with intermediate washing in distilled water.

Due to the high alkalinity of the solutions, preliminary degreasing was not used. The above operations were repeated for 10…15 min until a continuous gray-green sulfide layer was formed.



a *b* *c*

Fig. 1. Initial sample made of PLA-plastic (a) and with deposited copper sulfide conductive layer (b, c)

Source: developed by the authors.

An important parameter of the conductive layer is its resistance; the lower the corresponding parameter, the more uniform is the current distribution over the surface of the sample and the faster the process of electrodeposition of the primary metal layer. The resistance of the obtained conductive layer was estimated based on the measurement of the resistance of the samples using a Baku BK-9205A digital multimeter. When measuring the resistance, the distance between the electrodes of the multimeter was 5 mm. The results of measuring the resistance of the conductive layer of copper sulfide on eight identical samples are shown in Fig. 2.

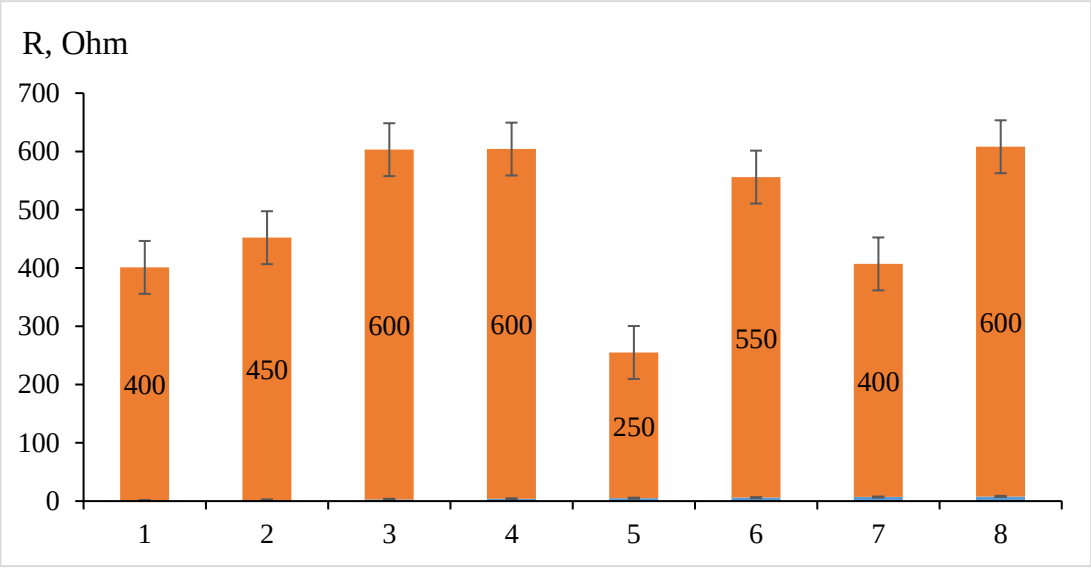


Fig. 2. Histogram of the resistances of the conductive layer of the studied samples (1-8)

Source: developed by the authors.

From Fig. 2 it can be seen that for most of the obtained samples the resistance value is on average about 500 Ohms, given the value of the interelectrode distance, it can be concluded that the approximate resistivity of the samples can be of the order of 10^3 Ohm·cm. This resistivity value is comparable to the corresponding value for graphite conductive layers obtained by mechanical rubbing of graphite [13].

1.2 The influence of electrolyte composition on the nickel electrodeposition process. In this work, industrial nickel-plating electrolytes were studied, the electrolyte of basic composition № 1 contained (g/l): $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ – 200; $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ – 60; H_3BO_3 – 40. Electrolyte № 2

additionally contained the wetting additive Nitech Netzmittel – 2 ml/l. Electrolyte № 3 additionally contained the wetting additive Nitech Netzmittel – 2 ml/l and a complex of brightener additives: saccharin – 5 g/l; main brightener additive TSL – 3 ml/l; additive that increases the throwing power in the range of low current densities TRSL – 3 ml/l. Electrolyte № 4 additionally contained a complex of brightener additives: saccharin – 1 g/l; butenediol – 1 ml/l [14].

To study the influence of surface-active additives on the structure and quality of electroplated nickel coatings, linear, cyclic, and chronoamperometric current-voltage measurements were performed on nickel and graphite electrodes. The corresponding measurements were performed on a digital potentiostat PGStat500n in a standard three-electrode cell. The ohmic losses were leveled by using the Luggin capillary placed close to the surface of the nickel electrode. The working electrodes were nickel and graphite rods pressed into dielectric housings, respectively. The working surface – the end face of the nickel electrode had an area of 0,28 cm^2, and the graphite electrode had an area of 0,4 cm^2, respectively. An electrode made of nickel foil of the nickel Grade 1 was used as an auxiliary electrode, which was placed along the contour of the cylindrical cell. A saturated silver-chloride electrode served as a reference electrode, the potentials on the current-voltage curves are given in the scale of the reference electrode. The measurement temperature was 18 °C. The potential scanning rate during the recording of cyclic and linear current-voltage dependences was 2 mV/s.

The result of cyclic current-voltage measurements on a nickel electrode is shown in Fig. 3.

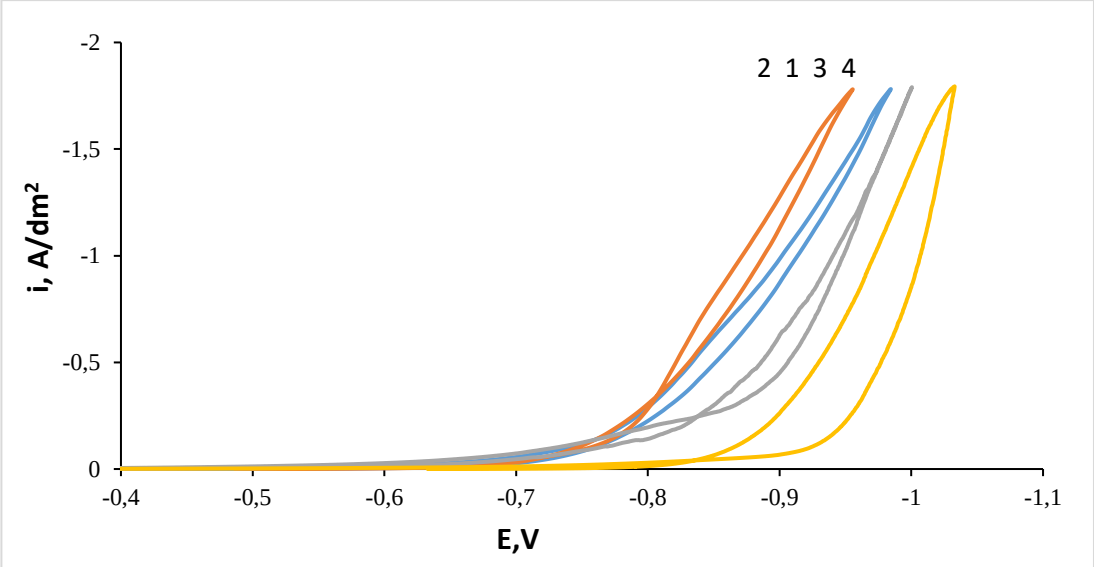


Fig. 3. Cyclic current-voltage curves on a nickel electrode in the studied nickel-plating electrolytes:
1 – electrolyte № 1; 2 – electrolyte № 2; 3 – electrolyte №3; 4 – electrolyte № 4
Source: developed by the authors.

From the polarization curves (Fig. 3.) the following conclusions can be drawn. Depending on the type of additive, the overvoltage of nickel electrodeposition changes. The lowest overvoltage is observed in electrolyte solutions № 1 and № 2. Moreover, the presence of an antipitting wetting additive (electrolyte № 2) leads to an additional reduction in cathodic overvoltage, which is greater the higher the cathodic current density. This may be a consequence of both a reduction in the overvoltage of the side cathodic hydrogen evolution process and a facilitation of the formation of a new metallic phase. In electrolyte № 3, the overvoltage increases slightly and a region of moderate increase in current density is observed in the potential range of -0.6…-0.9 V to cathodic current density values of 0.5 A/dm^2. This may indicate an earlier

onset of the nickel electrodeposition process and an increased throwing power of the corresponding electrolyte in the range of low current densities, caused by the action of the corresponding complex of bright-forming additives. For the other studied electrolytes, such a region is not observed. In electrolyte № 4 with the addition of saccharin and butenediol, the highest overvoltage of nickel deposition is observed, however, the course of the curve is similar to those obtained in solutions № 1 and № 2 without additives.

Given that the resistance of the copper sulfide conductive layer is comparable to the resistance of the graphite conductive layer, in addition, the resulting surface was quite hydrophobic. In view of this, for a simulation study in the process of nickel electrodeposition, polarization measurements were carried out on a graphite electrode, the surface of which is also poorly wetted. The cathodic polarization curves obtained on a graphite electrode in the studied nickel-plating electrolytes are shown in Fig. 4.

As can be seen from Fig. 4, the introduction of surface-active additives into the nickel-plating electrolyte affects the value of the stationary potential of the graphite electrode. However, the process of active electrodeposition or electroreduction of nickel ions in all the electrolytes studied begins at very close potential values within -0.7…-0.75 V. And at current densities of 0.5…1.5 A/dm^2 the difference between the course of the polarization curves is insignificant. Since the formation of a metallic phase on the surface of a graphite electrode can be significantly difficult, for a deeper understanding of the course of electrodeposition processes, the cathodic overvoltage values at a current density of 1 A/dm^2 were calculated and are given in Table 1.

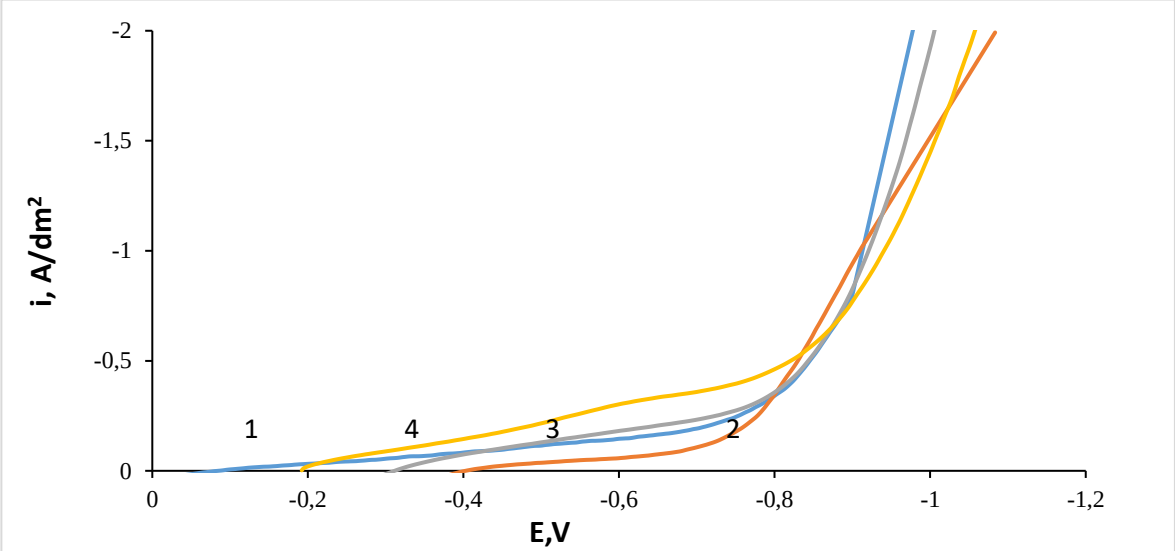


Fig. 4. Cathodic polarization curves on a graphite electrode:
1 – electrolyte № 1; 2 – electrolyte № 2; 3 – electrolyte № 3; 4 – electrolyte № 4
Source: developed by the authors.

Table 1 – Cathodic overvoltage values on a graphite electrode

№ of electrolyte	Ec, V	E (i =1 A/dm^2), V	η (i =1 A/dm^2), V
1	-0,08	-0,93	-0,85
2	-0,4	-0,92	-0,52
3	-0,3	-0,92	-0,62
4	-0,19	-0,94	-0,75

Table 1 shows that the largest cathodic overvoltage is observed for the basic nickel-plating electrolyte № 1 and the electrolyte with the introduced bright-forming complex containing butenediol (electrolyte № 4). It should also be noted that these electrolytes do not contain a dispersant-wetting additive. The corresponding additive affects the surface tension and wettability of the electrode surface and, as a result, the overvoltage of the formation of a new metallic phase

on the surface of the graphite electrode. This may be the reason for the increased values of the total overvoltage of nickel electrodeposition on the graphite electrode, in addition to the known suppressive effect of butenediol. An alternative explanation may also be the following. Simultaneously with nickel, electrochemical reduction of hydrogen occurs. Hydrogen is released primarily in more energetically favorable areas (micro-unevennesses) and blocks them as a separate phase. The wetting agent, by reducing the surface tension, promotes the desorption of hydrogen from the surface and its conditional unlocking, which also accelerates the process of electrodeposition and the formation of a new nickel phase on the free electrode surface [6]. Considering that the values of the cathode potential at a current density of 1 A/dm^2 are close to -1 V (see Table 1), chronoamperometric measurements were additionally carried out at the corresponding value of the cathode potential, the results of which are shown in Fig. 5.

From Fig. 5 it is seen that for electrolytes № 2 and № 3 a characteristic form of chronoamperometric curve with two clearly expressed maxima is observed [15]. The presence of a pronounced second maximum (electrolytes № 2 and № 3) indicates the activation of the nucleation process and their spread over the surface of the graphite electrode with the formation of a new nickel phase. In contrast, in the chronoamperometric dependences obtained in electrolyte № 4 the second maximum is absent at all, and for electrolyte №. 1 it is weakly expressed. Photographic images of the graphite electrode surfaces after chronoamperometric measurements are shown in Fig. 6.

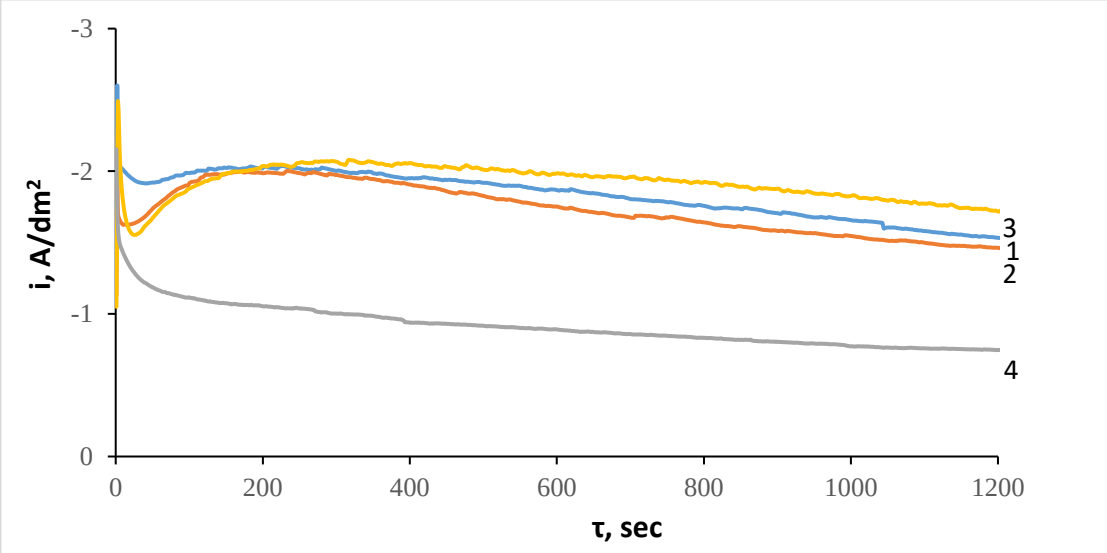


Fig. 5. Chronoamperometric dependences on a graphite electrode at a potential of E = -1 V: 1 – electrolyte №1; 2 – electrolyte № 2; 3 – electrolyte № 3; 4 – electrolyte № 4
Source: developed by the authors.

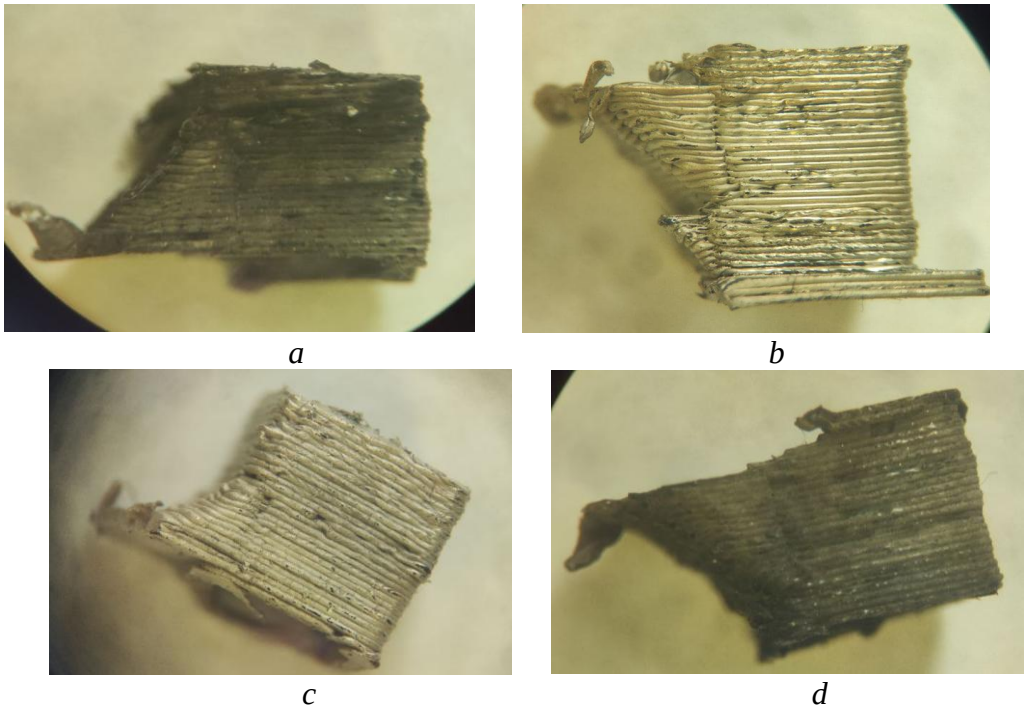


A *b* *c* *d*

Fig. 6. Photos of the graphite electrode surface after chronoamperometric measurements conducted for 1200 s (E = -1 V):
a – electrolyte № 1; b – electrolyte No. 2; c – electrolyte No. 3; d – electrolyte No. 4
Source: developed by the authors.

From Fig. 6 it is seen that in electrolyte № 1 nickel deposition occurs very slowly, the deposit is present only in the central part fragmentarily. In electrolyte № 2 matte nickel is deposited over the entire surface of the electrode. As expected, a fine-crystalline nickel coating is deposited in electrolyte № 3. At the same time, at the corresponding potential in electrolyte № 4 nickel deposition does not occur.

1.3. Electrodeposition of nickel coatings on PLA plastic samples. The next stage of the research was the testing of electrodeposition of galvanic nickel coatings on PLA-plastic samples with a copper sulfide conductive layer. The nickel coating process was carried out in a polymer electrochemical cell with a volume of 250 cm^3. A PLA-plastic sample with deposited conductive layer on a copper wire power supply was placed at the same distance between two parallel flat nickel anodes, the interelectrode distance was 35 mm. A DC source B5 – 43A was used for electrodeposition. In all experiments, electrodeposition was carried out at a voltage of 1.2 V. During experimental studies, it was found that this voltage corresponds to the optimal current density of the electrodeposition process of the primary nickel layer - about 1 A/dm^2. Electrodeposition was carried out for 20 min. The temperature of electrodeposition of coatings was 18 °C. The morphology of the obtained coatings was studied using an optical microscope MBS-9 at 36x magnification. The results of experiments on electrodeposition of nickel coatings are shown in Fig. 7.



a *b* *c* *d*

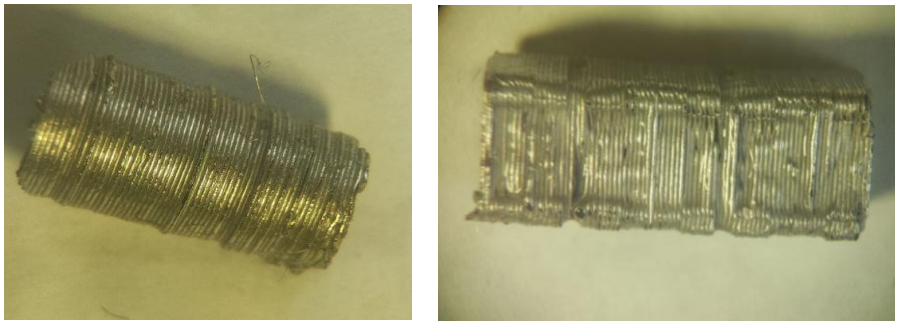
Fig. 7. PLA-plastic sample after electrodeposition of nickel coating in electrolytes: a – № 1; b – № 2; c – № 3; d – № 4. The geometric surface area of the samples is about 2 cm^2

Source: developed by the authors.

From Fig. 7, the following conclusions can be drawn. The results of nickel electrodeposition on a graphite electrode (Fig. 6) are actually reproduced on PLA plastic samples covered with a sulfide conductive layer. When nickel is plating in electrolyte № 1, nickel deposition on the surface occurred to a very small extent. When a wetting additive was introduced into the electrolyte (electrolyte № 2), a fine-crystalline nickel coating was deposited on the surface of the sample after 20 min of electrolysis. However, gaps and partial delamination of the coating were observed on the surface of the sample, which indicates the tension of the resulting nickel deposit. Also, the coating in the inner part of such samples was dull or partially absent, which

indicated a low throwing power of the corresponding electrolyte. In electrolyte №3, the highest quality fine-crystalline solid nickel coatings were obtained, delamination was not observed at all, and the number of gaps was insignificant. The percentage of coverage of the inner surface was also higher than in the previous two electrolytes. The use of industrial bright nickel-plating electrolyte №4 also did not bring a positive result, the surface of the sample after 20 min of electrolysis was also almost not covered with nickel. In this case, similar to the experiments with a graphite electrode, the voltage of 1.2 V and, accordingly, the cathode potential that was set at the same time, is not sufficient for the electrodeposition of a nickel coating.

As a final test, nickel coatings were electrodeposited on samples with a slightly larger surface area and electrolysis continued for 50 min (Fig. 8). The chronoamperometric dependence was also recorded during electrodeposition (Fig. 9).



a *b*

Fig. 8. Samples of PLA plastic after electrodeposition of a nickel coating in electrolyte № 3, electrodeposition time - 50 min, geometric surface area of the sample: a – 3.76 cm^2; b – 3.84 cm^2

Source: developed by the authors.

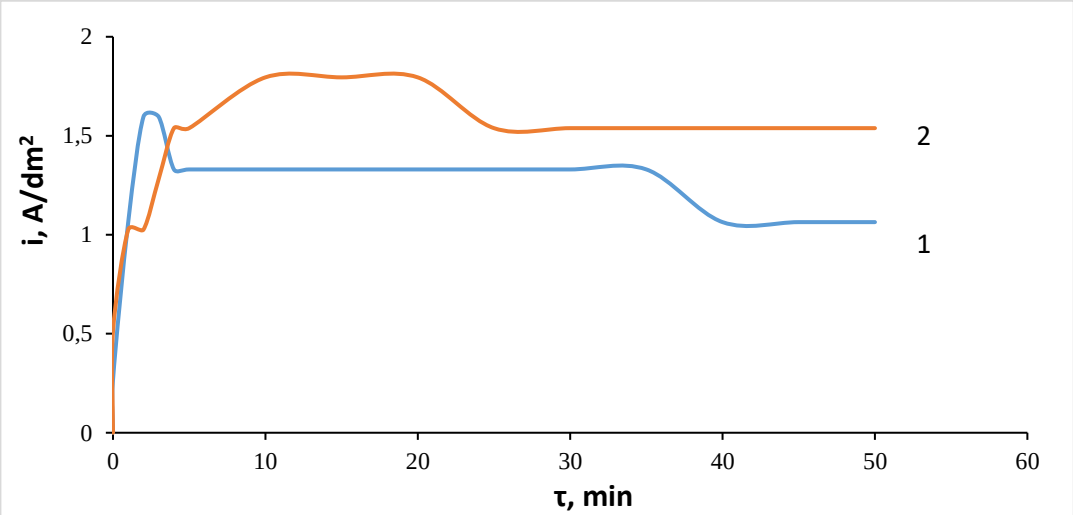


Fig. 9. Chronoamperometric dependences of electrodeposition of nickel coating in electrolyte № 3 for 50 minutes: 1 – sample a (Fig. 8); 2 – sample b (Fig. 8)

Source: developed by the authors.

In the course of the conducted research, high-quality fine-crystalline coatings were obtained (Fig. 8), the inner surface of the corresponding samples was also completely covered. Given the appearance of the chronoamperometric dependences (Fig. 9), the sharp increase in current density ends after 5 min of electrodeposition, respectively, which coincides with the completion of the formation of a solid metal layer on the outer surface of the sample with the

corresponding area. The average values of the current densities (calculated on the basis of Fig. 9) for the sample from Fig. 8 a – 1.26 A/dm^2, for the sample from Fig. 8 b – 1.6 A/dm^2, the thickness of the nickel coatings is about 12 μm and 15 μm. These results are consistent with the generally known statement that the porosity of the galvanic coating is significantly reduced when the thickness exceeds 10 μm.

Thus, the possibility of chemical-galvanic nickel metallization of PLA plastic products obtained by 3D printing, with the involvement of the stage of deposition of a conductive layer from copper sulfides, was established, which enables the direct electrodeposition of a nickel coating on the conductive layer without the involvement of the stage of chemical deposition of metal.

Conclusions. The nickel-plating process of PLA-plastic parts obtained by 3D printing was investigated. The possibility of electrodeposition of a high-quality fine-crystalline nickel coating directly onto the conductive layer of copper sulfide was established.

During the investigation of the influence of the nickel-plating solution composition on the surface of the studied plastic samples with a conductive sulfide layer, it was established that an important component that activates the process of electrodeposition of the coating on the surface of the conductive layer is the wetting additive Nitech Netzmittel at a concentration of 2 ml/l. Significant grinding of the crystalline structure and improvement of the quality of nickel coatings was achieved by additional introduction of a complex of gloss-forming additives with a saccharin content of 5 g/l.

References

1. Islam, A., Hansen, H. N., & Tang, P. T. (2017). Direct electroplating of plastic for advanced electrical applications. *CIRP Annals*, 66(1), 209–212. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.124.

2. Bezuhlyy M., Linyucheva O., Bezuhla N., Byk M., Kostyuk S. (2017). Kontrol′ formy elipsoyidal′nykh reflektoriv biomedychnykh fotometriv. *Visnyk Kyyivs'koho politekhnichnoho instytutu. Seriya Pryladobuduvannya, (53(1)),* 62–69. https://doi.org/10.20535/1970.53(1).2017.106543.

3. Sang, W., Zhang, R., Shi, X., & Da, Y. (2023). Advanced metallized nanofibers for biomedical applications. *Advanced Science*, 10, 2302044. https://doi.org/10.1002/advs.202302044.

4. Kara, G. K., & Tadjarodi, A. (2022). Designing a novel method for metallization of polyacrylonitrile nanofiber surface by noble metallic nanoparticles: A study of synergistic relation between structural features and the mechanical/wetting properties. *Express Polymer Letters*, 16(5), 500–523. https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2022.38.

5.Chiang, Y.-Y., Wang, Y.-Y., & Wan, C.-C. (2000). Research on applying direct plating to additive process for printed circuit board. *Journal of Electronic Materials*, 29(8), 1001–1006. doi:10.1007/s11664-000-0164-7.

6. Ancutiene I., Janickis V., Ivanauskas R. (2006), Formation and characterization of conductive thin layers of copper sulfide (CuxS) on the surface of polyethylene and polyamide by the use of higher polythionic acids. *Applied Surface Science*. 252(12), 4218-4225 https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.06.028.

7. Anichini, C., Czepa, W., Aliprandi, A., Consolaro, V. G., Ersen, I.-O., et al. (2021). Synthesis and characterization of ultralong copper sulfide nanowires and their electrical properties. *Journal of Materials Chemistry C*, 9, 12133-12140 https://doi.org/10.1039/D1TC03004C.

8. Lu, Y.-J., & Jia, J.-H. (2014). The effect of complexing agent on crystal growth, structure and properties of nanostructured Cu_2−xS thin films. *Chinese Chemical Letters*, *25*(11), 1473–1478. https://doi.org/10.1016/J.CCLET.2014.06.003.

9. Strečková, M., Oriňáková, R., Rozik, R., Trnková, L., & Gálová, M. (2006). *A study of nickel electrodeposition on paraffin-impregnated graphite electrode*. *Helvetica Chimica Acta*, 89, 622–634. https://doi.org/10.1002/hlca.200690065.

10. Liu L., Chen R., Liu W., Zhang Y., Shi X., Pan Q. (2015). Fabrication of superhydrophobic copper sulfide film for corrosion protection of copper. *Surface and Coatings Technology*, 272, 221-228 https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.04.003.

11. Ushchapovskyi, D. Yu., & Motronyuk, T. I. (2024). Hal′vanoplastyka. Laboratornyy praktykum. *Vydannya onovlene ta dopovnene [Elektronnyy resurs]: navchal'nyy posibnyk dlya zdobuvachiv stupenya bakalavra za osvitn'oyu prohramoyu «Elektrokhimichni tekhnolohiyi neorhanichnykh i orhanichnykh materialiv» spetsial'nosti 161 Khimichni tekhnolohiyi ta inzheneriya*. Kyyiv: KPI im. Ihorya Sikors′koho. https://ela.kpi.ua/handle/123456789/65736.

12. Cai, J., Su, C., Yu, X., Peng, R., Liu, R., Zhang, X., Shen, P., & Liu, D. (2022). Understanding the mechanism for promoting azurite sulfurization with ammonium sulfate. *Minerals Engineering*, 177, 107368. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107368.

13. Lee, K., Henry, P., Fleming, S., & Blows, J. L. (2006). Drawing of optical fiber with internal codrawn wire and conductive coating and electrooptic modulation demonstration. *IEEE Photonics Technology Letters*, 18(8), 914–916. https://doi.org/10.1109/LPT.2006.872290.

14. Thorzhevsky D. P., Zabaluyev A.S., Uschapovskyi D.Yu., Vasiliev G.S., Vorobyova V.I., Limuicheva O.V. (2025). The influence of electrolyte composition on the corrosion resistance of nickel-based metal-resistive coatings. *Visnyk of Kherson National Technical University*,1(92), 2025, 249-256. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.33.

15.Grujicic, D., & Pesic, B. (2006). Electrochemical and AFM study of nickel nucleation mechanisms on vitreous carbon from ammonium sulfate solutions. *Electrochimica Acta*, 51(13), 2678–2690. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.08.017.

Список використаних джерел

1. Islam, A., Hansen, H. N., & Tang, P. T. (2017). Direct electroplating of plastic for advanced electrical applications. *CIRP Annals*, 66(1), 209–212. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.124.

2. Безуглий М., Лінючева О., Безугла Н., Бик М., Костюк С. (2017). Контроль форми еліпсоїдальних рефлекторів біомедичних фотометрів. *Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування*, (53(1)), 62–69. https://doi.org/10.20535/1970.53(1).2017.106543

3. Sang, W., Zhang, R., Shi, X., & Da, Y. (2023). Advanced metallized nanofibers for biomedical applications. *Advanced Science*, 10, 2302044. https://doi.org/10.1002/advs.202302044.

4. Kara, G. K., & Tadjarodi, A. (2022). Designing a novel method for metallization of polyacrylonitrile nanofiber surface by noble metallic nanoparticles: A study of synergistic relation between structural features and the mechanical/wetting properties. *Express Polymer Letters*, 16(5), 500–523. https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2022.38.

5.Chiang, Y.-Y., Wang, Y.-Y., & Wan, C.-C. (2000). Research on applying direct plating to additive process for printed circuit board. *Journal of Electronic Materials*, 29(8), 1001–1006. doi:10.1007/s11664-000-0164-7.

6. Ancutiene I., Janickis V., Ivanauskas R. (2006), Formation and characterization of conductive thin layers of copper sulfide (CuxS) on the surface of polyethylene and polyamide by the use of higher polythionic acids. *Applied Surface Science*. 252(12), 4218-4225 https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.06.028.

7. Anichini, C., Czepa, W., Aliprandi, A., Consolaro, V. G., Ersen, I.-O., et al. (2021). Synthesis and characterization of ultralong copper sulfide nanowires and their electrical properties. *Journal of Materials Chemistry C*, 9, 12133-12140 https://doi.org/10.1039/D1TC03004C.

8. Lu, Y.-J., & Jia, J.-H. (2014). The effect of complexing agent on crystal growth, structure and properties of nanostructured $Cu_{2-x}S$ thin films. *Chinese Chemical Letters*, 25(11), 1473–1478. https://doi.org/10.1016/J.CCLET.2014.06.003.

9. Strečková, M., Oriňáková, R., Rozik, R., Trnková, L., & Gálová, M. (2006). A study of nickel electrodeposition on paraffin-impregnated graphite electrode. *Helvetica Chimica Acta*, 89, 622–634. https://doi.org/10.1002/hlca.200690065.

10. Liu L., Chen R., Liu W., Zhang Y., Shi X., Pan Q. (2015). Fabrication of superhydrophobic copper sulfide film for corrosion protection of copper. *Surface and Coatings Technology*, 272, 221-228 https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.04.003.

11. Ущаповський, Д. Ю., & Мотронюк, Т. І. (2024). *Гальванопластика. Лабораторний практикум. Видання оновлене та доповнене*. КПІ ім. Ігоря Сікорського. https://ela.kpi.ua/handle/123456789/65736.

12. Cai, J., Su, C., Yu, X., Peng, R., Liu, R., Zhang, X., Shen, P., & Liu, D. (2022). Understanding the mechanism for promoting azurite sulfurization with ammonium sulfate. *Minerals Engineering*, 177, 107368. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107368.

13. Lee, K., Henry, P., Fleming, S., & Blows, J. L. (2006). Drawing of optical fiber with internal codrawn wire and conductive coating and electrooptic modulation demonstration. *IEEE Photonics Technology Letters*, 18(8), 914–916. https://doi.org/10.1109/LPT.2006.872290.

14. Thorzhevsky D. P., Zabaluyev A.S., Uschapovskyi D.Yu., Vasiliev G.S., Vorobyova V.I., Limuicheva O.V. (2025). The influence of electrolyte composition on the corrosion resistance of nickel-based metal-resistive coatings. *Visnyk of Kherson National Technical University*,1(92), 2025, 249-256. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.33.

15. Grujicic, D., & Pesic, B. (2006). Electrochemical and AFM study of nickel nucleation mechanisms on vitreous carbon from ammonium sulfate solutions. *Electrochimica Acta*, 51(13), 2678–2690. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.08.017.

Дата першого надходження статті до видання: 04.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.03.2026

UDC 621.357

Сергій Сергійович Неліпович[1], Дмитро Юрійович Ущаповський[2], Вікторія Іванівна Воробйова[3], Георгій Степанович Васильєв[4]

[1]студент кафедри технології електрохімічних виробництв
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: serik.meshok@gmail.com. **ORCID**: https://orcid.org/0009-0005-6972-1521

[2]кандидат технічних наук, доцент кафедри технології електрохімічних виробництв
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: soltdim@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-2809-2774. **SCOPUS Author ID:** 57207984741

[3]доктор технічних наук, професор кафедри фізичної хімії
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: vorobyovavika1988@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7479-9140
SCOPUS Author ID: 55808771000

[4]доктор технічних наук, професор кафедри технології електрохімічних виробництв
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: g.vasyliev@kpi.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-4056-5551. **SCOPUS Author ID:** 56105504500

ХІМІКО-ГАЛЬВАНІЧНА МЕТАЛІЗАЦІЯ НІКЕЛЕМ ВИРОБІВ З PLA-ПЛАСТИКУ ОТРИМАНИХ СПОСОБОМ 3D-ДРУКУ

Показана можливість отримання дрібнокристалічного та високопровідного струмопровідного шару із сульфіду міді на поверхні виробів з PLA-пластика, отриманих способом 3D-друку. Величина питомого опору отриманого провідного шару є сумірною із відповідним параметром для струмопровідних шарів, отриманих з графітового порошку механічним способом.

З огляду на встановлені подібні властивості поверхні струмопровідного шару із сульфіду міді та графітового, модельні дослідження механізму процесу електроосадження нікелю проведені на графітовому електроді. Зокрема, досліджено вплив різних поверхнево-активних добавок, введених у електроліт нікелювання на якість нікелевого покриття, отриманого на етапі гальванічної металізації. У процесі електроосадження нікелевих покриттів на поверхні виробів з PLA-пластика з мідно-сульфідним струмопровідним шаром була досягнута відтворюваність результатів отриманих на графітовому електроді. Встановлено, що додавання антипітингової добавки диспергатора-змочувача пришвидшує процес електроосадження нікелю на активованій сульфідом міді поверхні діелектрика. Введення відповідної добавки призводить до зменшення поверхневого натягу. Це з одного боку призводить до полегшення змочування електролітом гідрофобної електродної поверхні та зменшення перенапругу утворення нової металевої фази. З іншого боку, паралельно із електроосадженням нікелю виділяється водень, який блокує активні ділянки електродної поверхні і утруднює процес утворення нової нікелевої фази на них. Наявність відповідної добавки сприяє інтенсифікації десорбції водню і, як наслідок, утворенню нової нікелевої фази. Суттєве поліпшення рівномірності та отримання дрібнокристалічної структури покриття забезпечується використанням комплексу блискоутворюючих добавок на основі сахарину, що зумовлює підвищення розсіювальної здатності електроліту нікелювання в області малих значень густин струму до 0,5 А/дм^2.

Ключові слова: *хіміко-гальванічна металізація; струмопровідний шар; сульфід міді; нікелеве покриття; PLA-пластик; 3D-друк.*

Рис.: 9. Табл.: 1. Бібл.: 15.

Nelipovych S., Ushchapovskyi D., Vorobyova V., Vasyliev G. (2026) The nickel plating of 3d-printed pla-plastic parts. *Technical sciences and technologies*, (1(43)), 389-399. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-389-399.

РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-400-410
УДК 620.9.001.5

Тетяна Михайлівна Берідзе[1], Ірина Віталіївна Касаткіна[2], Віктор Олександрович Левченко[3], Михайло Олександрович Лохман[4]

[1]доктор економічних наук, професор кафедри електрична інженерія,
Криворізький національний університет (Кривий Ріг, Україна)
E-mail: Beridzet2016@gmail.com. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0003-2509-3242. **Researcher ID:** L-9618-2018

[2]кандидат технічних наук, доцент кафедри електрична інженерія,
Криворізький національний університет (Кривий Ріг, Україна)
E-mail: Irina.vital@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-8967-6442

[3]аспірант кафедри електрична інженерія,
Криворізький національний університет (Кривий Ріг, Україна)
E-mail: levchenko-vo@knu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0001-3946-7148

[4]провідний спеціаліст ПП «SolMedia» (Ужгород, Україна)
E-mail: LokhmanMA@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-7966-6256

СЦЕНАРІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДОДАТКОВОЇ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОПОТЕНЦІАЛУ ПІДПРИЄМСТВА

Досліджено два випадки постачання - споживання необхідного обсягу електроенергоресурсів. У першому випадку досліджено детермінований підхід, тобто обсяги електроенергоресурсів визначається постійною величиною. У другому випадку постачання - споживання є стохастичним процесом. Залежно від визначеного процесу реалізується алгоритм оптимального споживання електроенергоресурсів. При визначенні стохастичного процесу на основі теорії викидів знаходяться середні викиди електроенергії, значення яких дозволяють реалізувати алгоритм оптимального споживання електроенергоресурсів. Запропоновані методичні підходи доцільно використовувати під час вирішення наукових задач щодо визначення оптимальних показників споживання електроенергії.

Ключові слова: *моделювання; потужність; детермінованість; стохастичність; енергетичний потенціал.*
Рис.: 1. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження У зв'язку з прагненням державницьких інституцій у сфері енергетики до стандартів Європейського Союзу, енергетичну складову національної економіки розглядають як товар, що має певну вартість. Відповідний закон визначає відповідальність енергозбутових організацій та постачальників енергоресурсів перед споживачами за надійність забезпечення їх енергоресурсами загалом та електричною енергією зокрема [1].

Важливо, щоб підприємство, яке постачає електроенергію, робило це вчасно і в повному обсязі. Разом з цим, можливо, що певному підприємству дуже важко впоратися з цією задачею. Іншими словами, для вирішення постачання необхідного обсягу електроенергії цьому підприємству бракує власної потужності. І тут природно використовувати підстанції, які дозволять ліквідувати нестачу потужності. Зрозуміло, що таких підстанцій може бути декілька, оскільки потужності однієї може не вистачати. Таким чином, існує необхідність дослідити і змоделювати процес, що реалізує ланцюг постачання-споживання енергоресурсів. Це дозволить забезпечити безперебійність постачання електроенергії споживачу з визначеними вартісно-цільовими параметрами.

Постановка проблеми. Складні умови сьогодення в енергетичній площині вимагають від науковців-практиків вирішення науково-практичних завдань щодо забезпечення електроенергією споживачів вчасно, відповідної якості. Отже, постає науково-практичне завдання – дослідити та змоделювати можливі випадки постачання-споживання електричної енергії. Провести оцінювання вартісно-цільових характеристик ланцюга постачання-споживання електричної енергії.

© Т. М. Берідзе, І. В. Касаткіна, В. О. Левченко, М. О. Лохман, 2026

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодення вимагає від науковців-практиків нових інноваційних рішень щодо побудови ефективного ланцюга постачання-споживання електричної енергії. Дослідження, що містяться у монографії за загальною редакцією С. О. Кудрі, обґрунтовують засади ефективного використання різних видів енергетичного обладнання. Наведені кількісні показники енергетичного потенціалу джерел енергії [2]. Борисяк О. В. зосереджує увагу на формування енергетичного ринку. Запропонована концептуальна модель позиціонування «зеленої» енергії. Автор зосереджується на дослідженні ринку альтернативної енергетики [3]. Питанням енергоефективності присвячені дослідження авторів Попової О. Ю., Каїра З. С., Вакулішиної О. Р., Колодій Ю. А. Авторами запропоновано узагальнюючий показник на засадах керування щодо ефективності енергоспоживання [4]. Авторкою Кіт А. В. досліджує поняття «енергетичний потенціал» та його елементи. Зініційовано критерії для оцінювання ефективності управління потенціалом підприємства в парадигмі енергоресурсів. Визначено комплекс аналітичних показників, які системно та всебічно характеризують процеси виробництва на підприємстві [5]. Матвійчук Л. звертає увагу на функціонування паливно-енергетичного комплексу в розрізі державної площини. Акцентовано увагу на основних недоліках при формуванні паливно-енергетичних ресурсів на регіональному рівні [6]. Питанням енергозбереження присвячено дослідження Бевз В. В. Зазначено про необхідність використання інноваційних технологій для забезпечення раціонального використання енергоресурсів [7]. Дослідження Сак Т. В. присвячені проблемі розробки системи стратегії енергоресурсів. Наведено етапи, що визначають побудови стратегії за Міжнародними стандартами [8]. Дослідження Потапова В. Є. визначають конкурентоспроможність підприємства на засадах системного дослідження зберігання електричної енергії. Автор зазначає «… в умовах трансформації енергетичного сектору та зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) традиційні енергетичні підприємства та великі промислові споживачі стикаються з новими викликами, зокрема нестабільністю генерації, проблемами прогнозування, коливанням попиту та необхідністю гнучкого управління виробництвом і розподілом електроенергії...» [9]. Науковці Квач Я., Кузьминчук Н., Куценко Т. дослідили шляхи забезпечення енергоефективності та енергозбереження. Доведено доцільність проведення змін ринку електроенергетики, провадження програм енергоефективності [10]. Системне дослідження проведено науковцем Козирським В. В. Автор дослідив історичний досвід використання та споживання енергії [11].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз сучасних досліджень і публікацій показав, що питанням моделювання процесу постачання – споживання електричної енергії приділено недостатньо уваги. Питання порівняння й оцінювання варіантів споживання електроенергії з урахуванням потужності наявних підстанцій досліджено фрагментарно та не надає повного системного бачення вирішення проблеми.

Метою статті є формування сценарного моделювання щодо визначення оптимального споживання електроенергії з урахуванням потужності наявних підстанцій.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до завдань дослідження, розглянемо два випадки постачання необхідної потужності електроенергії споживача: детермінованим; стохастичним процесом.

1. Детермінована потужність споживання електроенергії.

Відповідно до вирішення задачі, схема якої зображена на рис. 1, до головного підприємства (ГП), яке постачає електроенергію, приєднані 4 підстанції – П1, П2, П3 і П4. Головне підприємство характеризується питомою вартістю електроенергії, що виробляється і обмеженням по потужності електроенергії $\overline{W}$, що продукується. В свою чергу, підстанції теж характеризуються питомими вартостями вироблюваної електроенергії і обмеженням

по вироблюваної потужності електроенергії. Так, перша підстанція П1 має питому вартість електроенергії c_1 і обмеження по потужності $\overline{W_1}$. Друга підстанція П2 має питому вартість електроенергії c_2 і обмеження по потужності $\overline{W_2}$. Третя підстанція П3 має питому вартість електроенергії c_3 і обмеження по потужності $\overline{W_3}$. І, нарешті, четверта підстанція П4 має питому вартість електроенергії c_4 і обмеження по потужності $\overline{W_4}$.

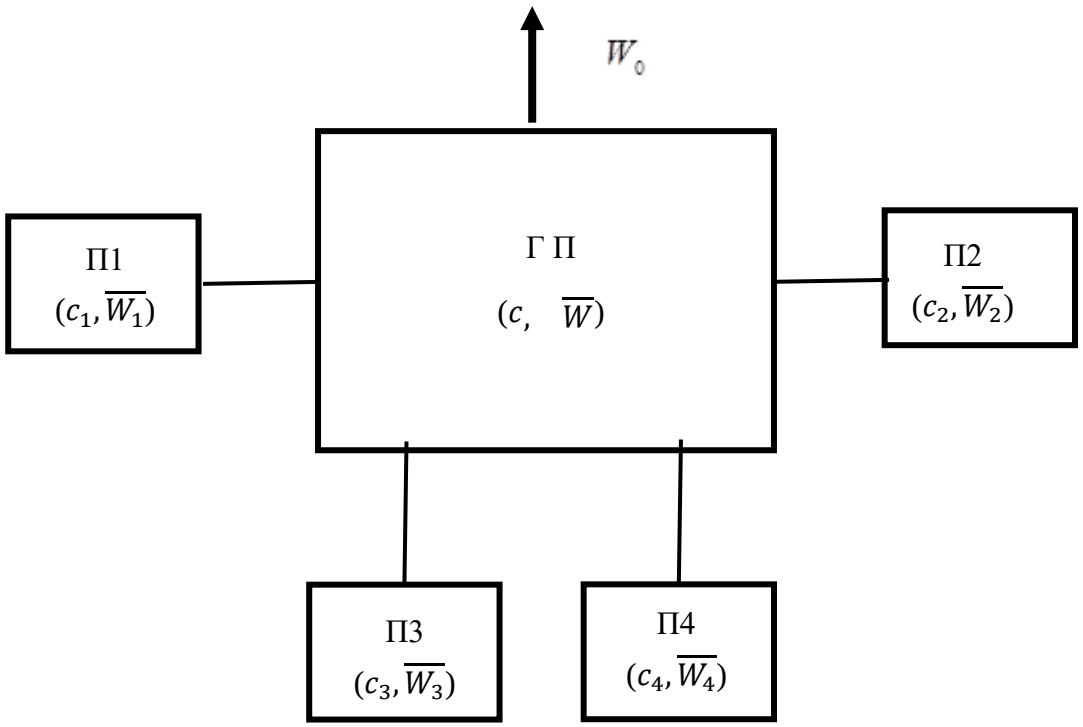


Рис.1. Схематичне зображення розподілу електроенергії при різних способах її споживання

Джерело: розроблено авторами.

Нехай ГП має постачати споживачу потужність електроенергії в обсязі W_0.

Визначено 5 варіантів градації електроенергії за її потужністю. Розглянемо окремо кожний із них. По-перше, введемо обмеження на питомих вартостях електроенергії підстанцій

$$c_1 \le c_2 \le c_3 \le c_4. \quad (1)$$

У подальшому це дозволить впорядкувати будування вартості застосуванної електроенергії.

У першому випадку має місце обмеження

$$W_0 \le \overline{W}, \quad (2)$$

тобто потужності електроенергії ГП споживачу вистачає.

У цьому випадку вартість спожитої електроенергії обчислюється за формулою

$$C = c \cdot W_0. \quad (3)$$

У другому випадку мають місце нерівності:

$$\overline{W} < W_0 \le \overline{W} + \overline{W_1}, \quad (4)$$

тобто потужності електроенергії ГП не вистачає, але якщо застосувати потужність першої підстанції П1, то суми потужностей буде достатньо. У цьому випадку вартість спожитої електроенергії обчислюється за формулою

$$C = c \cdot \overline{W} + c_1 \cdot \left(W_0 - \overline{W}\right). \quad (5)$$

У цьому випадку вартість складається із суми вартостей електроенергії ГП і П1.

У третьому випадку мають місце нерівності:

$$\overline{W} + \overline{W_1} < W_0 \le \overline{W} + \overline{W_1} + \overline{W_2}, \quad (6)$$

тобто суми потужностей електроенергії ГП і П1 не вистачає, але якщо скористатися потужністю другої підстанції П2, то суми потужностей буде достатньо. У цьому випадку вартість спожитої електроенергії обчислюється за формулою

$$C = c \cdot \overline{W} + c_1 \cdot \overline{W_1} + c_2 \cdot \left(W_0 - \overline{W} - \overline{W_1}\right). \quad (7)$$

У цьому випадку вартість складається із суми вартостей електроенергії ГП, П1 і П2.

У четвертому випадку мають місце нерівності

$$\overline{W} + \overline{W_1} + \overline{W_2} < W_0 \le \overline{W} + \overline{W_1} + \overline{W_2} + \overline{W_3}, \quad (8)$$

тобто суми потужностей електроенергії ГП, П1 і П2 не вистачає, але якщо скористатися потужністю третьої підстанції П3, то суми потужностей буде достатньо. У цьому випадку вартість спожитої електроенергії обчислюється за формулою

$$C = c \cdot \overline{W} + c_1 \cdot \overline{W_1} + c_2 \cdot \overline{W_2} + c_3 \cdot \left(W_0 - \overline{W} - \overline{W_1} - \overline{W_2}\right). \quad (9)$$

У цьому випадку вартість складається із суми вартостей електроенергії ГП, П1, П2 і П3.

У п’ятому випадку мають місце нерівності

$$\overline{W} + \overline{W_1} + \overline{W_2} + \overline{W_3} < W_0 \le \overline{W} + \overline{W_1} + \overline{W_2} + \overline{W_3} + \overline{W_4}, \quad (10)$$

тобто суми потужностей електроенергії ГП, П1, П2 і П3 не вистачає, але якщо скористатися потужністю четвертої підстанції П4, то суми потужності буде достатньо. У цьому випадку вартість спожитої електроенергії обчислюється за формулою

$$C = c \cdot \overline{W} + c_1 \cdot \overline{W_1} + c_2 \cdot \overline{W_2} + c_3 \cdot \overline{W_3} + c_4 \cdot \left(W_0 - \overline{W} - \overline{W_1} - \overline{W_2} - \overline{W_3}\right). \quad (11)$$

У цьому випадку вартість спожитої електроенергії складається із суми вартостей електроенергії ГП, П1, П2, П3 і П4.

Таким чином, щоб скористатися описаним алгоритмом, треба на першому кроці визначити обмеження, які застосовуються в алгоритмі: $\overline{W}, \overline{W_1}, \overline{W_2}, \overline{W_3}, \overline{W_4}$. Далі ввести питомі вартості: c, c_1, c_2, c_3, c_4. У подальшому треба перевірити умови (2), (4), (6), (8) і (10) на належність величини потужності електроенергії, необхідної споживачу в обсязі W_0, вибраному інтервалу. Далі згідно умови виконання належності заданої величини потужності W_0 вибраному інтервалу, необхідно скористатися однією із формул (3), (5), (7) або (11) для обчислення вартості спожитої електроенергії.

Треба підкреслити, що розташування питомих вартостей згідно з (1) дозволяє одночасно оптимально формувати вартість спожитої електроенергії.

Необхідно підкреслити, що розроблений алгоритм оптимізації вартості спожитої електроенергії може бути адаптований до іншого кількісного складу підстанцій, які приєднані до ГП.

2. Стохастична потужність споживання електроенергії.

У подальшому представляється доцільним ускладнити задачу, розглядаючи процес споживання потужності електроенергії як випадкову функцію. Побудуємо математичну модель викидів потужності електроспоживання. Нехай $W(t)$ – потужність споживання електроенергії, яка є диференційованим стаціонарним випадковим процесом, тобто таким процесом свого аргументу, значення якого при будь-якому значенні часу t є випадковою величиною. Нехай β – значення потужності споживання електроенергії $W(t)$, викиди за яку досліджуються.

Тобто треба знайти середню потужність електроенергії $\widetilde{w}$, обмежену реалізацією випадковою функцією $W(t)$ вище за заданий рівень β під час викиду, яка витрачається підстанціями протягом одного викиду. Введемо для цієї мети допоміжну функцію, яка визначається рівністю

$$I(w) = \begin{cases} 1, & w > 0 \\ \frac{1}{2}, & w = 0. \\ 0, & w < 0 \end{cases} \quad (12)$$

Тоді електроенергія всіх викидів E , що мали місце протягом часу T, може бути представлена так

$$E = \int_0^T I[W(t) - \beta] \cdot W(t)dt - \beta \cdot \bar{\tau}_\beta \cdot \bar{\nu}_\beta \cdot T, \quad (13)$$

де $\bar{\tau}_\beta$– середня тривалість викиду за рівень β,

$\bar{\nu}_\beta$– середня кількість викидів в одиницю часу за рівень β.

Середня тривалість викиду за рівень βобчислюється за формулою

$$\bar{\tau}_\beta = \frac{\int_\beta^\infty f(w)dw}{\int_\beta^\infty v \cdot f(\beta, v)dv}, \quad (14)$$

де $f(w)$– щільність розподілу ординат w,

$f(w, v)$– щільність розподілу ординат w та її швидкості зміни v.

Середня кількість викидів в одиницю часу за рівень β обчислюється за формулою

$$\bar{\nu}_\beta = \int_\beta^\infty v \cdot f(\beta, v)dv. \quad (15)$$

Для нормального процесу, найважливішого з практичної точки зору, можуть бути отримані досить прості розрахункові формули. Для нормального стаціонарного процесу закон розподілу ординат випадкової функції однозначно виражається через математичне очікування випадкової функції $\bar{w}$ та її дисперсію σ_w^2, оскільки

$$f(w) = \frac{1}{\sigma_w\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(w-\bar{w})^2}{2\sigma_w^2}}. \quad (16)$$

Швидкість зміни ординати випадкової функції та ордината випадкової функції для того ж моменту часу є некорельованими випадковими величинами, а для нормального випадкового процесу ще й незалежними величинами. Тому двовимірна щільність розподілу ймовірності $f(w, v)$ розпадається на добуток нормальних щільностей розподілу для W і V. Тому можна написати

$$f(w, v) = \frac{1}{\sigma_w\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(w-\bar{w})^2}{2\sigma_w^2}} \cdot \frac{1}{\sigma_v\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{v^2}{2\sigma_v^2}}. \quad (17)$$

Дисперсія швидкості зміни ординати випадкової функції дорівнює

$$\sigma_v^2 = -\frac{d^2}{d\tau^2} K_w(\tau)|\tau = 0, \quad (18)$$

де $K_w(\tau)$– кореляційна функція ординати випадкової функції.

Математичне очікування швидкості зміни ординати випадкової функції внаслідок стаціонарності випадкового процесу дорівнює нулю, тобто

$$\bar{v} = 0.$$

Підстановка (17) в (15) дає формулу для середньої кількості викидів в одиницю часу

$$\bar{\nu}_\beta = \frac{\sigma_v}{2\pi\sigma_w} e^{-\frac{(\beta-\bar{w})^2}{2\sigma_w^2}}. \quad (19)$$

Аналогічно, після підстановки (16) і (17) в (14) будемо мати

$$\bar{\tau}_\beta = \pi \frac{\sigma_w}{\sigma_v} e^{-\frac{(\beta-\bar{w})^2}{2\sigma_w^2}} \left[1 - \Phi\left(\frac{\beta-\bar{w}}{\sigma_w}\right)\right], \quad (20)$$

де $\Phi(w)$ – інтегральна функція Лапласа.

Перший множник у підінтегральному вираженні (13) протягом викиду дорівнює одиниці і дорівнює нулю в усіх інших випадках. Виразимо явно функцію (12). Для цього користуємося інтегралом Діріхле:

$$\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\sin uw}{u}du=\begin{cases}1, & w>0\\ \frac{1}{2}, & w=0.\\ 0, & w<0\end{cases}$$

Якщо розглядати інтеграл

$$\frac{1}{\pi\cdot i}\int_{-\infty}^{\infty}e^{i\cdot u\cdot w}\frac{du}{u},\ (\mathrm{i}=\sqrt{-1}\text{– уявна одиниця}),$$

у сенсі його головного значення, то

$$\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\sin uw}{u}du=\frac{1}{\pi\cdot i}\int_{-\infty}^{\infty}e^{i\cdot u\cdot w}\frac{du}{u}. \quad (21)$$

Справді, оскільки у (21) інтеграл розуміється у сенсі головного значення, то

$$\frac{1}{\pi\cdot i}\int_{-\infty}^{\infty}e^{i\cdot u\cdot w}\frac{du}{u}=\frac{1}{\pi\cdot i}\lim_{\substack{\varepsilon\to 0\\ L\to\infty}}\left\{\int_{-L}^{-\varepsilon}e^{i\cdot u\cdot w}\frac{du}{u}+\int_{\varepsilon}^{L}e^{i\cdot u\cdot w}\frac{du}{u}\right\},$$

де ε і L – додатні величини, які прагнуть до своїх меж незалежно одне від одного. Представимо в останню формулу

$$e^{\pm i\cdot u\cdot w}=cos\,u\,w\pm i\cdot sin\,u\,w\ .$$

Оскільки

$$\lim_{\substack{\varepsilon\to 0\\ L\to\infty}}\left\{\int_{-L}^{-\varepsilon}cos\,u\,w\frac{du}{u}+\int_{\varepsilon}^{L}cos\,u\,w\frac{du}{u}\right\}=0,$$

то

$$\frac{1}{\pi\cdot i}\int_{-\infty}^{\infty}e^{i\cdot u\cdot w}\frac{du}{u}=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\sin uw}{u}du,$$

тобто формула (21) виконується.

Враховуючи (21), функцію (12) можна представити у вигляді

$$I(w)=\frac{1}{2}\left[1+\frac{1}{\pi\cdot i}\int_{-\infty}^{\infty}e^{i\cdot u\cdot w}\frac{du}{u}\right]. \quad (22)$$

Підставляючи (22) в (13), отримаємо

$$E=\frac{1}{2}\int_0^T W(t)dt+\frac{1}{2\pi i}\int_0^T\int_{-\infty}^{\infty}e^{iu[W(t)-\beta]}W(t)\frac{du}{u}dt-\beta\cdot\bar{\tau}_\beta\cdot\bar{\nu}_\beta\cdot T. \quad (23)$$

Застосуємо до обох частин (23) операцію математичного очікування

$$M[E]=M\left[\frac{1}{2}\int_0^T W(t)dt+\frac{1}{2\pi i}\int_0^T\int_{-\infty}^{\infty}e^{iu[W(t)-\beta]}W(t)\frac{du}{u}dt-\beta\cdot\bar{\tau}_\beta\cdot\bar{\nu}_\beta\cdot T\right]. \quad (24)$$

У результаті будемо мати для лівої частини рівності (24)

$$M[E]=\widetilde{w}\cdot\bar{\nu}_\beta\cdot T-\beta\cdot\bar{\tau}_\beta\cdot\bar{\nu}_\beta\cdot T\ .$$

Для правої частини рівності (24)

$$M\left[\frac{1}{2}\int_0^T W(t)dt+\frac{1}{2\pi i}\int_0^T\int_{-\infty}^{\infty}e^{iu[W(t)-\beta]}W(t)\frac{du}{u}dt-\beta\cdot\bar{\tau}_\beta\cdot\bar{\nu}_\beta\cdot T\right]=$$

$$=\frac{1}{2}\int_0^T\bar{w}\,dt+\frac{1}{2\pi i}\int_0^T\int_{-\infty}^{\infty}e^{-i\beta u}M\left[e^{iuW(t)}W(t)\right]\frac{du}{u}dt-\beta\cdot\bar{\tau}_\beta\cdot\bar{\nu}_\beta\cdot T\ . \quad (25)$$

Математичне очікування, що стоїть у (25) під знаком інтеграла, може бути висловлене через характеристичну функцію $\hat{E}(u)$ процесу $W(t)$, яка визначається так

$$\hat{E}(u)=M\left[e^{iuW}\right]=\int_{-\infty}^{\infty}e^{iuw}f_w(w)\,dw, \quad (26)$$

де $f_w(w)$– щільність ймовірності випадкової величини W.

Зручність застосування характеристичної функції (26) пов'язана з тим, що всі моменти випадкової функції можуть бути отримані з характеристичної функції (26) шляхом диференціювання. Ряд викладок простіше виконувати, користуючись не щільністю ймовірності, а характеристичними функціями, знаючи які завжди можна знайти щільності ймовірності випадкових величин, застосувавши зворотне перетворення Фур'є

$$f_w(w) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} e^{-iuw}\hat{E}(u)\,du. \quad (27)$$

Оскільки

$$\frac{1}{i}\frac{d}{du}\hat{E}(u) = \frac{1}{i}\frac{d}{du}\int_{-\infty}^{\infty} e^{iuw}f_w(w)\,dw = \int_{-\infty}^{\infty} e^{iuw}w\cdot f_w(w)\,dw = M\left[e^{iuW(t)}W(t)\right]. \quad (28)$$

Підставляючи (28) в (25), виконуючи інтегрування по t, оскільки підінтегральні вирази не залежать від часу, і скорочуючи обидві частини рівності на час T, отримаємо

$$\widetilde{w}\cdot\bar{\nu}_\beta = \frac{1}{2}\bar{w} - \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} e^{-iu\beta}\frac{d\hat{E}(u)}{du}\frac{du}{u} - \beta\cdot\bar{\tau}_\beta\cdot\bar{\nu}_\beta\ . \quad (29)$$

Інтеграл

$$J = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\cdot u\cdot\beta}\frac{d\hat{E}(u)}{du}\frac{du}{u} \quad (30)$$

може бути виражений через щільність йовірності $f_w(w)$. Дійсно, розглядаючи інтеграл (30) як функцію β та диференціюючи обидві частини рівності по β , отримаємо

$$\frac{\partial J}{\partial\beta} = -\frac{i}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} e^{-iu\beta}\frac{d\hat{E}(u)}{du}du = \frac{\beta}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} e^{-iu\beta}\hat{E}(u)\,du = \beta\cdot f_w(\beta) \quad (31)$$

де $f_w(\beta)$ – щільність ймовірності випадкової величини $W(t)$, взята при аргументі β.

Інтегруючи (31) від $-\infty$ до поточного значення β, отримаємо

$$J(\beta) = \int_{-\infty}^{\beta} wf_w(w)dw + c. \quad (32)$$

Для визначення постійної інтегрування c підставимо (32) у (29) та покладемо$\beta = \infty$. Оскільки при цьому випадку

$$\widetilde{w}\cdot\bar{\nu}_\beta = 0$$

(ймовірність викиду за дуже високий рівень прагне нуля), отримаємо

$$c = -\frac{1}{2}\bar{w}. \quad (33)$$

Таким чином,

$$\widetilde{w}\cdot\bar{\nu}_\beta = \bar{w} - \int_{-\infty}^{\beta} wf_w(w)dw - \beta\cdot\bar{\tau}_\beta\cdot\bar{\nu}_\beta\ ,$$

тобто середня потужність електроенергії $\widetilde{w}$, яка обмежена реалізацією випадковою функцією вище за заданий рівень β під час викиду, якщо вважати випадкову функцію $W(t)$ стаціонарною, дорівнює

$$\widetilde{w} = \frac{\bar{w}}{\bar{\nu}_\beta} - \frac{1}{\bar{\nu}_\beta}\int_{-\infty}^{\beta} wf_w(w)dw - \beta\cdot\bar{\tau}_\beta. \quad (34)$$

Для подальших обчислень необхідно задати вид закону розподілу ординат випадкової функції $W(t)$. Якщо процес нормальний, то

$$f_w(w) = \frac{1}{\sigma_w\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(w-\bar{w})^2}{2\sigma_w^2}}. \quad (35)$$

Тоді інтеграл в (34) може бути розрахований. Виконуючи обчислення, отримаємо з урахуванням (19) і (20) для середньої потужності електроенергії викиду

$$\widetilde{w} = \frac{\sigma_w^2\sqrt{2\pi}}{\sigma_\nu} + \frac{(\bar{w}-\beta)\sigma_w\pi}{\sigma_\nu}\left[1-\Phi\left(\frac{\beta-\bar{w}}{\sigma_w}\right)\right]e^{\frac{(\beta-\bar{w})^2}{2\sigma_w^2}}, \quad (36)$$

де $\sigma_w^2 = K_w(0)$, $\sigma_\nu^2 = -\frac{d^2}{d\tau^2}K_w(\tau)|\tau = 0$,

$K_w(\tau)-$ автоковаріаційна функція потужності електроенергії $W(t)$.

Для знаходження статистичних характеристик реалізацій випадкових процесів природно скористатися розробленими в математичній статистиці методами обробки дослідного матеріалу. Для цього необхідно перейти до послідовності реалізації випадкової величини, отриманої шляхом дискретизації випадкового процесу:

$$w_1, w_2, \dots w_i, \dots, w_n\ , \tag{37}$$

де $w_i = w(i \cdot \Delta), i = 1,2,\dots, n, \quad n \cdot \Delta = T.$

Тоді оцінка математичного очікування, тобто середнє, знаходиться за формулою

$$\bar{w} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} w_i. \tag{38}$$

Вибіркова дисперсія визначається формулою

$$\sigma_w^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(w_i - \bar{w})^2. \tag{39}$$

Вибіркова оцінка автокореляційної функції знаходиться по формулі

$$\tilde{R}_w(k) = \frac{1}{\sigma_w^2(n-1)}\sum_{i=1}^{n-k}(w_i - \bar{w})\,(w_{i+k} - \bar{w}), \quad k = 0,1,\dots, m. \tag{40}$$

Враховуючи особливості стаціонарного випадкового процесу потужності споживання електроенергії $W(t)$, структуру аналітичної формули автокореляційної функції доцільно вибрати у вигляді

$$R_w(\gamma, \tau) = e^{-\gamma\cdot|\tau|} \cdot (1 + \gamma \cdot |\tau|), \tag{41}$$

де γ - параметр.

Для знаходження параметра γ аналітичної формули (41) необхідно провести апроксимацію формули (40) шляхом мінімізації функціонала

$$F(\gamma) = \sum_{k=1}^{m}\left(R_w(\gamma, k \cdot \Delta) - \tilde{R}_w(k)\right)^2 \to \min_{\gamma}. \tag{42}$$

З урахуванням того, що

$$F(\gamma_0) = \min_{\gamma}\sum_{k=1}^{m}\left(R_w(\gamma, k \cdot \Delta) - \tilde{R}_w(k)\right)^2,$$

аналітична формула автоковаріаційної функції запишеться у вигляді

$$K_w(\gamma_0, \tau) = \sigma_w^2 \cdot R_w(\gamma_0, \tau). \tag{43}$$

Тоді, згідно (43), маємо

$$K_w(\gamma_0, 0) = \sigma_w^2 \cdot R_w(\gamma_0, 0) = \sigma_w^2, \tag{44}$$

Далі, знаходимо дисперсію випадкової функції $V(t)$ шляхом обчислення похідної другого порядку від автоковаріаційної функції (43)

$$\sigma_v^2 = -\sigma_w^2 \cdot [-\gamma_0^2 e^{-\gamma_0\cdot\tau}(1 - \gamma_0\tau)]|\tau = 0 = \gamma_0^2 \cdot \sigma_w^2. \tag{45}$$

Враховуючи (45), формула (36) середньої потужності електроенергії викиду при стаціонарної випадкової потужності електроенергії W вище заданого рівня β прийме вигляд

$$\tilde{w}(\beta) = \frac{\sigma_w\sqrt{2\pi}}{\gamma_0} - \frac{(\beta - \bar{w})\cdot\pi}{\gamma_0}\left[1 - \Phi\left(\frac{\beta - \bar{w}}{\sigma_w}\right)\right] e^{\frac{1}{2}\left(\frac{\beta-\bar{w}}{\sigma_w}\right)^2} \tag{46}$$

Аналіз формули (46) показує, що вона залежить від чотирьох незалежних аргументів – $\beta, \gamma_0, \bar{w}, \sigma_w$.Така кількість змінних викликає певні труднощі при дослідженні залежності формули (46) від цих розрізнених аргументів. Тому представляється доцільним об'єднати ці аргументи в групи у вигляді множників. Для цього виділені дві групи множників:

$$\Delta = \frac{\beta - \bar{w}}{\sigma_w} \text{ і } \lambda = \sqrt{2\pi}\frac{\sigma_w}{\gamma_0}. \tag{47}$$

Перша група множників визначає відхилення заданого рівня потужності спожитої електроенергії β від середнього значення потужності спожитої електроенергії $\bar{w}$, яка обчислена в одиницях середньо квадратичного відхилення потужності спожитої електроенергії σ_w. Друга група множників дорівнює величині спожитої електроенергії при нульовому відхиленні заданого рівня потужності спожитої електроенергії β від середнього значення спожитої електроенергії $\bar{w}$, тобто коли $\Delta = 0$.

У результаті застосування позначень (47) формула (46) набуде вигляду:

$$\widetilde{w}(\Delta, \lambda) = \lambda\left\{1 - \Delta \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}}[1 - \Phi(\Delta)]e^{\frac{\Delta^2}{2}}\right\}. \quad (48)$$

Таким чином, формула (48) визначає необхідну величину потужності електроенергії для споживання.

Якщо розглядати «викиди за нульовий рівень», тобто коли

$$\beta = \bar{w},$$

то формула (48) спрощується і набуває вигляду

$$\widetilde{w}(0, \lambda) = \lambda,$$

або згідно з (47),

$$\widetilde{w}(0) = \sqrt{2\pi}\frac{\sigma_w}{\gamma_0}. \quad (49)$$

Надалі, розглядаючи потужності електроенергії (48) як детерміновані величини, необхідно скористатися описаним вище алгоритмом використання детермінованою потужністю електроенергії підстанцій.

Висновки. У роботі вперше запропоновано підхід щодо формування сценарного моделювання споживання електричної енергії. Аналіз споживання електроенергії дозволив виділити два способи споживання: детермінований і стохастичний. При детермінованому споживанні електроенергії потужність електроенергії задається споживачем постійною. Залежно від величини заданої потужності реалізується алгоритм оптимального споживання електроенергії з урахуванням потужностей електроенергії наявних підстанцій. При стохастичному споживанні електроенергії на основі теорії викидів знаходяться середні викиди потужності електроенергії, величини яких дозволяють реалізувати алгоритм оптимального споживання електроенергії з урахуванням потужностей електроенергії наявних підстанцій. Надалі має сенс перевірки запропонованих алгоритмів на практиці.

Список використаних джерел

1. Міждержавна рада зі стандартизації, метрології та сертифікації. (1997). *Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення* (ГОСТ 13109–97). https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25837.

2. Кудря, С. О. (ред.). (2024). *Відновлювані джерела енергії* (2-ге вид., доповнене). Інститут відновлюваної енергетики НАН України.

3. Борисяк, О.В. (2022). Інноваційний потенціал підприємств енергетики і критичні кліматичні технології в умовах воєнного стану. *Інноваційна економіка*, (2-3), 21-28. https://doi.org/10.37332/2309-1533.2022.2-3.4.

4. Попова, О. Ю., Каїра, З. С., Вакулішина, О. Р., & Колодій, Ю. А. (2018). Науково-методичне забезпечення стимулювання підвищення ефективності енергетичного господарства підприємств промисловості. *Ефективна економіка*. *3*. http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=6298.

5. Кіт, А. В. (2018). Сучасні підходи до оцінювання управління ефективністю використання енергетичного потенціалу підприємства. *Science Online: International Electronic Scientific Journal*, (12). https://nauka-online.com/wp-content/uploads/2018/12/Kit.pdf.

6. Матійчук, Л. (2023). Структура побудови та система функціонування паливно-енергетичного комплексу України. *Innovation and Sustainability*, (4), 109–118. https://doi.org/10.31649/ins.2022.4.109.118.

7. Бевз, В. В. (n.d.). Потенціал енергозбереження промислових підприємств. *Серія 18: Економіка і право*. https://www.chasopys.law.npu.kiev.ua/archive/18/3.pdf.

8. Сак, Т. В. (2016). Стратегія енергозбереження підприємства: сутність, чинники, етапи формування. *Глобальні та національні проблеми економіки*, (11), 494–497. http://global-national.in.ua/archive/11-2016/104.pdf.

9. Потапов, В. Є. (2024). Перспективи використання систем зберігання електроенергії для підвищення конкурентоспроможності енергетичного підприємства. *Економіка і управління*, *(3)*, 32–37. https://doi.org/10.36919/2312-7872.3.2024.32.

10. Квач, Я., Кузьминчук, Н., & Куценко, Т. (2021). Енергоефективність як потенціал економічного розвитку країни. *Scientia fructuosa, 137*(3), 52–61. https://doi.org/10.31617/visnik.knute.2021(137)04.

11. Козирський, В. В., & Волошин, С. М. (2021). *Основи електропостачання*. Компринт. https://dglib.nubip.edu.ua/server/api/core/bitstreams/88433dfa-69a0-49fe-b951-09b270f5fe13/content.

References

1. Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification. (1997). *Elektrychna enerhiia. Sumisnist tekhnichnykh zasobiv elektromahnitna. Normy yakosti elektrychnoi enerhii v systemakh elektropostachannia zahalnoho pryznachennia (HOST 13109–97) [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in public power supply systems]*. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25837.

2. Kudria, S. O. (Ed.). (2024). *Vidnovliuvani dzherela enerhii [Renewable energy sources]* (2nd ed.). Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine.

3. Borysiak, O. V. (2022). Innovatsiinyi potentsial pidpryiemstv enerhetystyky i krytychni klimatychni tekhnolohii v umovakh voiennoho stanu [Innovative potential of energy enterprises and critical climate technologies under martial law]. *Innovatsiina ekonomika – Innovative Economy*, (2-3), 21–28. https://doi.org/10.37332/2309-1533.2022.2-3.4.

4. Popova, O. Yu., Kaira, Z. S., Vakulishyna, O. R., & Kolodii, Yu. A. (2018). Naukovo-metodychne zabezpechennia stymuliuvannia pidvyshchennia efektyvnosti enerhetychnoho hospodarstva pidpryiemstv promyslovosti [Scientific and methodical support for stimulating the improvement of energy efficiency of industrial enterprises]. *Efektyvna ekonomika – Efficient Economy*, (3). http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=6298.

5. Kit, A. V. (2018). Suchasni pidkhody do otsiniuvannia upravlinnia efektyvnistiu vykorystannia enerhetychnoho potentsialu pidpryiemstva [Modern approaches to evaluating the efficiency management of the enterprise's energy potential]. *Science Online: International Electronic Scientific Journal*, (12). https://nauka-online.com/wp-content/uploads/2018/12/Kit.pdf.

6. Matiichuk, L. (2023). Struktura pobudovy ta systema funktsionuvannia palyvno-enerhetychnoho kompleksu Ukrainy [The structure and system of functioning of the fuel and energy complex of Ukraine]. *Innovation and Sustainability*, (4), 109–118. https://doi.org/10.3149/ins.2022.4.109.118.

7. Bevz, V. V. (n.d.). *Potentsial enerhozberezhennia promyslovykh pidpryiemstv [Energy saving potential of industrial enterprises]*. Seriia 18: Ekonomika i pravo. https://www.chasopys.law.npu.kiev.ua/archive/18/3.pdf.

8. Sak, T. V. (2016). Stratehiia enerhozberezhennia pidpryiemstva: sutnist, chynnyky, etapy formuvannia [Enterprise energy saving strategy: Essence, factors, stages of formation]. *Hlobalni ta natsionalni problemy ekonomiky – Global and National Problems of Economy*, (11), 494–497. http://global-national.in.ua/archive/11-2016/104.pdf.

9. Potapov, V. Ye. (2024). Perspektyvy vykorystannia system zberihannia elektroenerhii dlia pidvyshchennia konkurentospromozhnosti enerhetychnoho pidpryiemstva [Prospects for using electricity storage systems to increase the competitiveness of an energy enterprise]. *Ekonomika i upravlinnia – Economics and Management*, (3), 32–37. https://doi.org/10.36919/2312-7872.3.2024.32.

10.Kvach, Ya., Kuzmynchuk, N., & Kutsenko, T. (2021). Enerhoefektyvnist yak potentsial ekonomichnoho rozvytku krainy [Energy efficiency as a potential for the country's economic development]. *Scientia Fructuosa*, *137*(3), 52–61. https://doi.org/10.31617/visnik.knute.2021(137)04.

11.Kozyrskyi, V. V., & Voloshyn, S. M. (2021). *Osnovy elektropostachannia* [Fundamentals of power supply]. Komprynt. https://dglib.nubip.edu.ua/server/api/core/bitstreams/88433dfa-69a0-49fe-b951-09b270f5fe13/content.

Дата першого надходження статті до видання: 29.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.03.2026

UDC 620.9.001.5

Tatiana Beridze[1], Irina Kasatkina[2], Viktor Levchenko[3], Mykhailo Lokhman[4]

[1]Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of the Department of Electrical Engineering
Kryvyi Rih National University University (Kryvyi Rih, Ukraine)
E-mail: Beridzet2016@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-2509-3242. **Researcher ID:** L-9618-2018

[2]PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Present Associate Professor of the Electrical Engineering Department
Kryvyi Rih National University ((Kryvyi Rih, Ukraine)
E-mail: Irina.vital@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-3938-0744

[3]Postgraduate Student (PhD Student) of the Department of Electrical Engineering
Kryvyi Rih National University (Kryvyi Rih, Ukraine)
E-mail: levchenko-vo@knu.edu.ua. **ORCID**: https://orcid.org/0009-0001-3946-7148

[4]Leading specialist of SolMedia Private Limited Company (Uzhhorod, Ukraine)
E-mail: LokhmanMA@gmail.com. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0002-7966-6256

SCENARIO MODELING OF ADDITIONAL CAPACITY OF THE ENERGY POTENTIAL OF AN ENTERPRISE

The development of market relations in the energy sector involves considering electricity not only as a physical phenomenon, but also as a commodity that has a certain value. The relevant law defines the responsibility of electricity sales organizations and electricity suppliers to consumers for the reliability of their electricity supply. It is this enterprise will not cope with this task. To solve the problem of supplying the required amount of electricity, in case of its shortage, it is advisable to use substations that will eliminate the capacity deficit. There may be several such substations if the capacity of one is not enough.

The analysis of modern research and publications has shown that insufficient attention has been paid to the issues of modeling the supply process - consumption of electricity. The issue of comparing and evaluating electricity consumption options taking into account the capacity of existing substations has been studied in a fragmentary manner and does not provide a complete systemic vision of the solution to the problem.

The purpose of the study is to form a scenario modeling for determining the optimal electricity consumption taking into account the capacity of existing substations. Two cases of supplying the required electricity capacity to the consumer were studied. In the first case, the electricity consumption capacity is deterministic, that is, it is determined by a constant value. In the second case, the electricity consumption capacity is a stochastic process. With deterministic electricity consumption, the electricity capacity is set by the consumer as a constant.

The paper proposes for the first time an approach to the formation of scenario modeling of electrical energy consumption. Approaches to determining the optimal electricity consumption taking into account the electrical capacities of existing substations have been further developed. With stochastic electricity consumption, average electricity emissions are based on the theory of emissions, the values of which allow implementing an algorithm for optimal electricity consumption taking into account the capacities of existing substations. The proposed methods are advisable to use when solving problems regarding optimal electricity consumption indicators.

Keywords: *modeling; power; determinism; stochasticity; energy potential.*

Fig.: 1. References: 11.

Берідзе Т. М., Касаткіна І. В., Левченко В. О., Лохман М. О. Сценарійне моделювання додаткової потужності енергопотенціалу підприємства. *Технічні науки та технології,* 2026. № 2(44). С. 400-410. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-400-410.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-411-419
УДК 621.791.92-52:517.938

Володимир Георгійович Соловйов[1], Ірина Юріївна Романова[2]

[1]кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу імпульсних процесів та технологій дугового зварювання
Інститут електрозварювання НАН України (Київ, Україна)
E-mail: hhsova@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1454-7520
Scopus Author ID: 587406475000

[2]кандидат технічних наук, заступник завідувача відділу імпульсних процесів та технологій дугового зварювання
Інститут електрозварювання НАН України (Київ, Україна)
E-mail: romanova@paton.kiev.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7154-1830
Scopus Author ID: 57222474743

СИНЕРГЕТИЧНИЙ ПІДХІД ДО СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ ДУГИ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ ПОРОШКОВИМ ДРОТОМ

У роботі запропоновано та аналітично обґрунтовано синергетичний підхід до стабілізації напруги дуги при електродуговому наплавленні порошковим дротом у середовищі захисних газів. Актуальність дослідження зумовлена тим, що стабільність напруги дуги безпосередньо визначає тепловий режим процесу, характер металопереносу та якість наплавленого шару. Традиційні ПІ та ПІД-регулятори, що базуються на лінійних моделях, не забезпечують належної ефективності в умовах нелінійної динаміки дугового процесу та імпульсних збурень, пов'язаних із короткими замиканнями та флуктуаціями довжини дуги.

На основі експериментальної ідентифікації каналу керування напругою побудовано математичну модель у вигляді інерційної ланки першого порядку з урахуванням обмежених імпульсних збурень. Застосування синергетичного підходу дозволило сформувати інваріантне різноманіття, що відповідає стабільному режиму процесу, та синтезувати закон керування, який забезпечує експоненційну збіжність похибки. Доведено асимптотичну стійкість замкненої системи за методом Ляпунова, а також встановлено її робастність у сенсі ISS щодо обмежених збурень.

Отримано аналітичну оцінку залишкової похибки стабілізації, яка визначає вплив параметрів системи на точність регулювання. Результати моделювання підтвердили переваги синергетичного алгоритму над класичним ПІ-регулятором: скорочення часу встановлення, відсутність перерегулювання, зменшення чутливості до параметричних змін та імпульсних збурень. Також показано зниження енергетичних витрат керування та покращення якості сигналу.

Запропонований підхід має просту структуру, не потребує інтегруючих ланок і є придатним для цифрової реалізації у системах керування джерелами зварювального струму. Отримані результати підтверджують перспективність використання синергетичних методів для підвищення стабільності та якості процесів електродугового наплавлення.

Ключові слова: *дугове наплавлення; синергетичне управління; інваріантне різноманіття; стійкість за Ляпуновим; нелінійна динаміка; регулювання.*

Рис.: 5. Табл.: 1. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Електродугове наплавлення порошковими дротами широко застосовується для відновлення та зміцнення деталей машин, що працюють в умовах інтенсивного зношування. Якість наплавленого шару визначається стабільністю теплового режиму, характером перенесення електродного металу та динамікою дугового розряду. Дослідження, виконані в ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України та інших наукових центрах, показали, що нестабільність напруги дуги призводить до коливань тепловкладення, зміни глибини проплавлення та структури металу, підвищеного розбризкування та формування неоднорідної мікроструктури наплавленого шару.

Постановка проблеми. Традиційні системи керування напругою дуги базуються на використанні пропорційно-інтегральних (ПІ) та пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів. Такі алгоритми орієнтовані на мінімізацію похибки між заданим і виміряним значенням напруги та припускають апроксимацію об'єкта лінійною інерційною ланкою.

Однак реальний процес електродугового наплавлення є складною нелінійною динамічною системою, що включає взаємодію джерела живлення, дугового розряду та зони формування наплавленого металу. Його режим вирізняється:

– швидкими флуктуаціями напруги;
– короткими замиканнями під час металопереносу;
– періодичними обривами та повторним запалюванням дуги;
– термометалургійними зворотними зв'язками.

© В. Г. Соловйов, І. Ю. Романова, 2026

У таких умовах використання лише лінійних регуляторів не повністю враховує нелінійну природу дугового процесу та імпульсний характер збурень, що обмежує ефективність традиційних систем керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам стабілізації параметрів дуги при зварюванні та наплавленні присвячено значну кількість досліджень. У [1–3] показано, що стабільність дуги є визначальним фактором формування якісного наплавленого шару. Дослідження [4–6] присвячені застосуванню класичних ПІ та ПІД-регуляторів для керування параметрами дугового процесу.

Ряд робіт розглядає адаптивні та цифрові системи керування зварювальними джерелами живлення [7–12]. У цих дослідженнях показано можливість підвищення стабільності дуги за рахунок використання складніших алгоритмів регулювання.

Разом з тим більшість існуючих підходів базується на лінійних моделях об’єкта керування, що не повністю відображають нелінійну динаміку дугового процесу та імпульсний характер збурень, пов’язаних із металопереносом.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз літератури показує, що питання використання методів нелінійної динаміки та синергетичної теорії керування для стабілізації параметрів дугового наплавлення досліджено недостатньо.

Зокрема, недостатньо розроблені:

– підходи до формування інваріантних режимів функціонування дугових систем;

– методи синтезу алгоритмів керування, що забезпечують робастність до імпульсних збурень;

– аналітичні оцінки стійкості та похибки стабілізації напруги дуги в умовах реального процесу наплавлення.

З огляду на це перспективним є застосування синергетичного підходу до керування, який дозволяє формувати цільовий режим функціонування системи у вигляді інваріантного різноманіття та забезпечувати асимптотичну стійкість замкненого контуру навіть за наявності обмежених збурень.

Метою роботи є розроблення та аналітичне обґрунтування синергетичного алгоритму стабілізації напруги дуги при електродуговому наплавленні порошковим дротом із використанням джерела живлення постійного струму.

Виклад основного матеріалу. Для синтезу алгоритму керування необхідно побудувати адекватну математичну модель каналу регулювання напруги дуги, що відображає його динамічні властивості в робочому діапазоні струмів 280…450 А. Експериментальна ідентифікація каналу Pu → $U_н(i)$ (рис. 1) показала, що реакція джерела ВДУ-506 на ступінчасту зміну керуючого впливу має аперіодичний характер без коливань. Це дозволяє апроксимувати канал регулювання інерційною ланкою першого порядку:

$$\tau dU_д/dt + U_д = u \qquad (1)$$

де $U_д$ – напруга дуги; u – керуючий сигнал; $\tau \approx 0{,}82$ с – постійна часу, визначена експериментально.

Незважаючи на нелінійний характер дугового процесу, експериментальна ідентифікація каналу керування показала, що динамічну реакцію джерела живлення в робочому діапазоні режимів можна апроксимувати інерційною ланкою першого порядку. Тому така модель є достатньою для синтезу та аналізу запропонованого алгоритму керування.

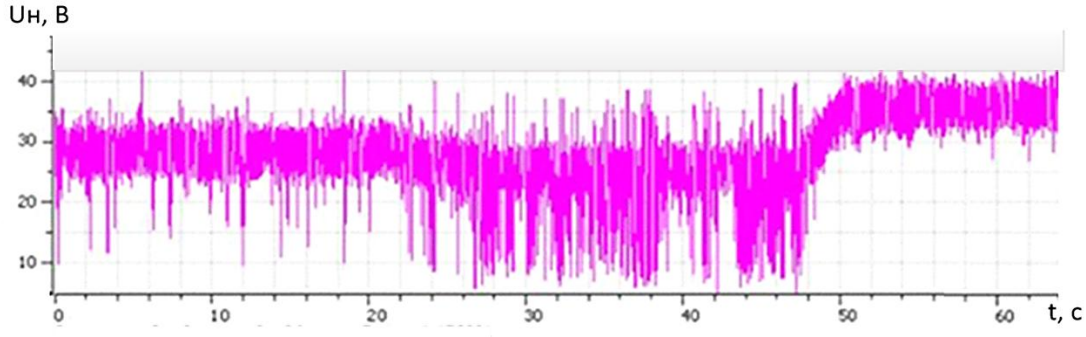


Рис. 1. Перехідний процес напруги Uн(t) джерела ВДУ-506 при ступінчастій зміні ручного регулятора Ри з 6 до 9 од.

Зазначена модель адекватно описує перехідні процеси у межах нормального режиму наплавлення. У реальному процесі на канал керування впливають збурення, пов'язані з: короткими замиканнями краплі металу; обривами дуги; флуктуаціями довжини дуги; зміною режиму перенесення металу.

З урахуванням цього рівняння (1) доповнюється збурюючим доданком:

$$\tau dU_д/dt + U_д = u + d(t) \quad (2)$$

де $d(t)$ – обмежене імпульсне збурення.

Практично $d(t)$ має імпульсний характер з амплітудою до ± 8…10 В та тривалістю 2…8 мс.

Синергетичний підхід дозволяє формувати інваріантний режим функціонування системи шляхом введення макрозмінної та побудови закону керування, що забезпечує її асимптотичну стабілізацію.

Відхилення напруги дуги від заданого значення визначимо як $\psi = U_д - U_{зад}$, де $U_{зад}$ – технологічно оптимальне значення напруги для дроту ПП-АН164-1 у заданому режимі струму. Фізично ψ характеризує ступінь відхилення процесу від стабільного режиму формування валика. Задача керування зводиться до забезпечення умови: $\psi \to 0$ при $t \to \infty$.

Формування інваріантного різноманіття. Для забезпечення експоненціальної збіжності задаємо бажану динаміку макрозмінної у вигляді:

$$d\psi/dt + \lambda\psi = 0 \quad (3)$$

де $\lambda > 0$ — параметр швидкості стабілізації.

Рівняння **(3)** визначає інваріантне різноманіття $\psi = 0$, до якого повинна притягуватися система. Експоненціальний характер збіжності гарантує: відсутність коливань; монотонне зменшення похибки; прогнозовану швидкість встановлення режиму.

Виведення закону керування. З урахуванням математичної моделі об'єкта:

$$\tau dU_д/dt + U_д = u + d(t)$$

та визначення ψ маємо:

$$d\psi/dt = \mathrm{dU_д/dt}.$$

Підставляючи $dU_д/dt$ з (2) та прирівнюючи до (3), отримуємо:

$$(1/\tau)\,[u - U_д - d(t)] + \lambda(U_д - U_{зад}) = 0.$$

Ігноруючи збурення d(t) на етапі синтезу, отримуємо практичний закон керування:

$$u = U_д - \tau\lambda(U_д - U_{зад}) \quad (4)$$

Закон (4) має лінійну структуру та не містить інтегруючої складової. Запропонований закон керування (4) повинен забезпечувати стійкість процесу стабілізації напруги дуги в умовах імпульсних збурень та обмежень джерела живлення.

Асимптотична стійкість. Розглянемо замкнену систему без збурень (d(t) = 0): $\tau dU_д/dt + U_д = u$. З урахуванням закону керування: $u = U_д - \tau\lambda(U_д - U_{зад})$ отримуємо: $\tau dU_д/dt + U_д = Uд - \tau\lambda(U_д - U_{зад})$. Після спрощення: $\tau dU_д/dt = -\tau\lambda(U_д - U_{зад})$ або $dU_д/dt = -\lambda(U_д - U_{зад})$. Введемо макрозмінну: $\psi = U_д - U_{зад}$. Тоді динаміка системи описується рівнянням: $d\psi/dt = -\lambda\psi$. Розв'язок має вигляд: $\psi(t) = \psi(0)\exp(-\lambda t)$. Оскільки $\lambda > 0$, то $\psi \to 0$ при $t \to \infty$. Для підтвердження стійкості використаємо функцію Ляпунова: $V = 0{,}5\psi^2$. Похідна вздовж траєкторій системи: $dV/dt = \psi d\psi/dt = -\lambda\psi^2 \le 0$. Оскільки $dV/dt < 0$ при $\psi \ne 0$, система є глобально асимптотично стійкою відносно $\psi = 0$. Це означає, що незалежно від початкового відхилення напруги дуги система гарантовано повертається до заданого режиму.

Робастність та ISS-стійкість. Розглянемо систему з урахуванням збурення d(t): $\tau dU_д/dt + U_д = u + d(t)$. Після підстановки закону керування отримаємо:

$$d\psi/dt = -\lambda\psi + (1/\tau)d(t) \quad (5)$$

Це означає, що збурення входить у систему як адитивний обмежений сигнал. Нехай $|d(t)| \le d_{max}$. Тоді для функції Ляпунова: $dV/dt = -\lambda\psi^2 + (\psi/\tau)d(t)$. З використанням нерівності Коші маємо: $|\psi d(t)| \le |\psi| d_{max}$. Це означає, що система є ISS-стійкою у сенсі Sontag, оскільки існує функція Ляпунова, що задовольняє стандартну нерівність ISS-типу, тобто обмежене збурення породжує обмежене відхилення ψ; при зникненні збурення система повертається до $\psi = 0$. Отже, алгоритм є робастним до імпульсних коротких замикань та флуктуацій дуги. У сталому режимі за наявності обмеженого збурення можна оцінити максимальне відхилення ψ. Із (5) у квазістаціонарному режимі: $0 \approx -\lambda\psi + (1/\tau)d(t)$.

Звідси оцінка максимальної похибки:

$$|\psi| \le d_{max} / (\tau\lambda) \quad (6)$$

Для типових параметрів процесу: $\tau = 0{,}82$ с; $\lambda = 1{,}5$; $d_{max} \approx 8$ В отримуємо: $|\psi| \le 8 / (0{,}82 \cdot 1{,}5) \approx 6{,}5$ В.

Реально імпульсний характер збурення призводить до значно меншої фактичної похибки, ніж статична оцінка (6). На практиці фактична похибка є меншою через короткочасний характер збурень.

З рівняння (6) видно, що: збільшення λ зменшує залишкову похибку; зменшення τ (швидший канал) покращує стабілізацію; алгоритм має керований рівень робастності.

Для визначення динамічних характеристик каналу регулювання напруги наплавлення проведено експериментальні дослідження на установці ВДУ-506 при наплавленні порошковим дротом ПП-АН164-1 у середовищі 18 % CO_2 + 82 % Ar.

Керуючий вплив формувався шляхом ступінчастої зміни положення потенціометра Pu з 6 до 9 (за десятибальною шкалою) на 47 с процесу (рис. 1). Реєстрація напруги джерела $U_н(i)$ здійснювалася з комп'ютерним записом сигналу. Отриманий перехідний процес (див. [2]) характеризується наступним.

Аналіз перехідного процесу. У результаті ступінчастої зміни керуючого впливу: напруга зросла з 25 до 37 В; тривалість перехідного процесу становила приблизно 3 с; характер процесу є аперіодичним без коливань. Зазначений характер відповідає поведінці інерційної ланки першого порядку.

З урахуванням співвідношення: $t_{уст} \approx 3\tau$ оцінка постійної часу становить: $\tau \approx 0{,}8\ldots1{,}0$ с.

Отримане за результатами чисельного моделювання значення узгоджується з параметрами, використаними при побудові моделі керування. На рис. 2 наведено реакцію системи на ступінчасту зміну завдання з 25 до 36 В.

Синергетичний регулятор забезпечує монотонну експоненційну збіжність відповідно до заданої макродинаміки системи.

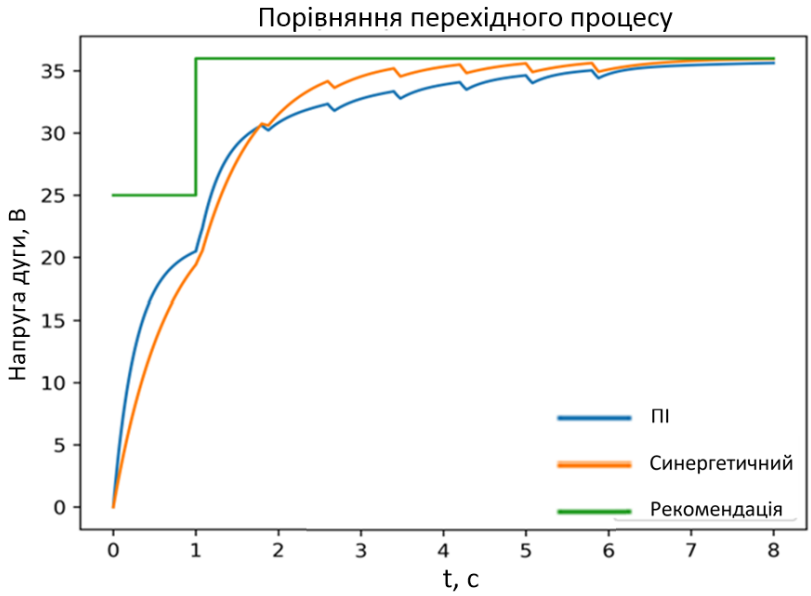


Рис. 2. Порівняння перехідних процесів напруги дуги для ПІ-регулятора та синергетичного алгоритму при зміні $U_{зад}$ з 25 до 36 В

Модель збурення: тривалість імпульсу 0,1 с; амплітуда ± 8 В. Результати (рис. 3): ПІ-регулятор демонструє коливальний характер відновлення; синергетичне керування забезпечує швидше затухання; максимальне відхилення зменшено приблизно на 35 %.

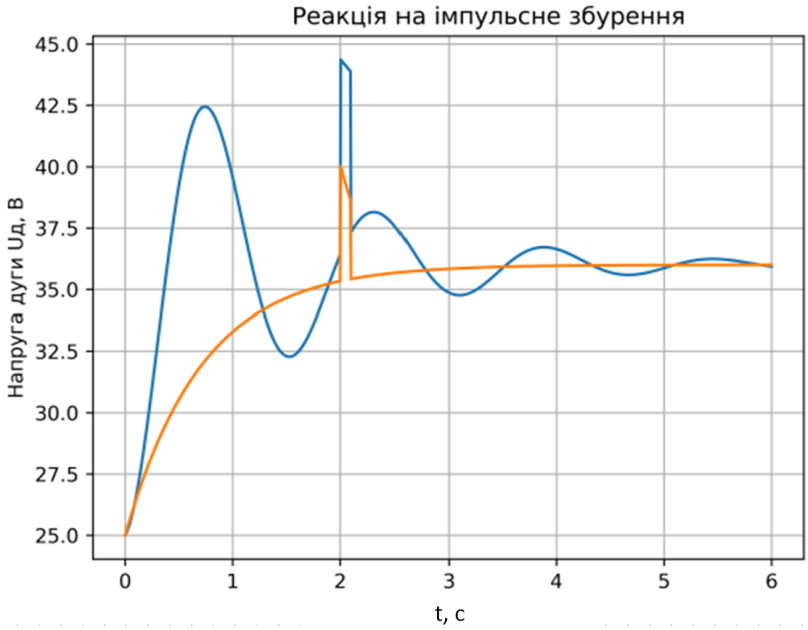


Рис. 3. Динаміка похибки стабілізації ψ(t) при імпульсному збуренні ± 8 В тривалістю 0,1 с

Аналіз керуючого впливу (рис. 4) показав, що: ПІ-регулятор генерує високочастотні коливальні компоненти; синергетичний алгоритм формує більш згладжений сигнал; середньоквадратична енергія керування зменшена на 18 %.

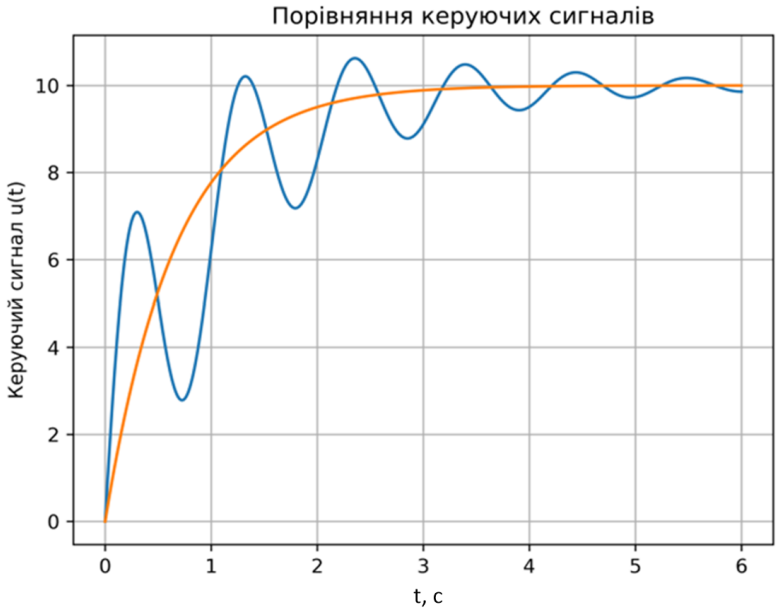


Рис. 4. Порівняння керуючих сигналів

На рис. 5 наведено перехідні процеси при зміні параметра об’єкта керування: $\tau \in [0{,}7;\ 1{,}0]$ с.

Результати показали: для ПІ-регулятора спостерігається зростання перерегулювання до 9 В; збільшується час встановлення; характер перехідного процесу стає менш передбачуваним. Для синергетичного алгоритму: перерегулювання залишається обмеженим; зберігається монотонна збіжність; якість регулювання змінюється незначно.

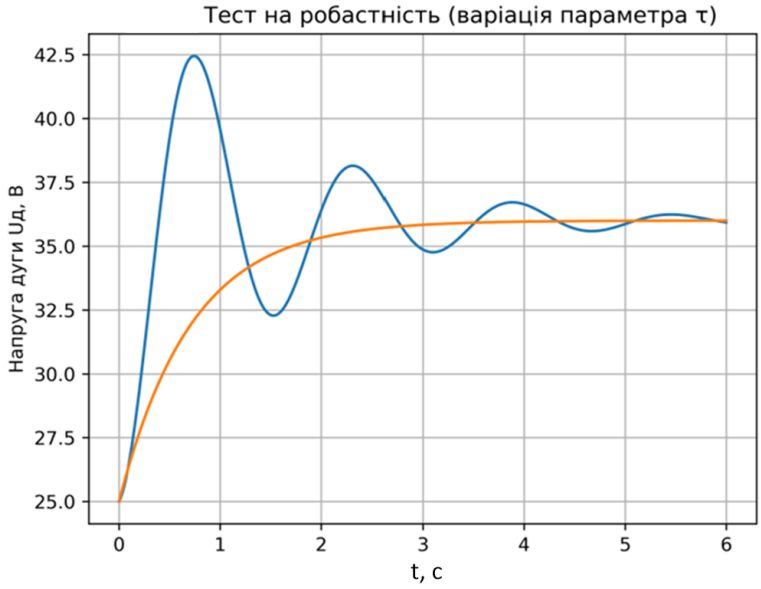


Рис. 5. Реакція системи при варіації постійної часу τ у діапазоні 0,7…1,0 с

Робастність синергетичного підходу зумовлена тим, що динаміка системи визначається структурно заданим інваріантним різноманіттям; параметр λ формує швидкість притягання до нього; варіації τ впливають лише на масштаб часу, але не руйнують структуру атрактора.

Для оцінки практичної реалізованості запропонованого підходу проведено порівняльний аналіз апаратної реалізації класичного ПІ-регулятора та синергетичного алгоритму керування напругою дуги (табл. 1).

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз апаратної реалізації класичного ПІ-регулятора та синергетичного алгоритму керування напругою дуги

Характеристика	ПІ-регулятор	Синергетичний алгоритм
Обчислювальна складність	Середня	Низька
Наявність інтегратора	Так	Ні
Чутливість до шуму	Висока	Низька
Необхідність налаштування	Висока	Помірна (λ)
Робастність	Параметрична	Структурна
Навантаження на силову частину	Підвищене	Знижене

Висновки.

1. На основі експериментальної ідентифікації каналу керування напругою наплавлення для джерела постійного струму побудовано адекватну математичну модель у вигляді інерційної ланки першого порядку з урахуванням обмежених імпульсних збурень. Показано, що отримана модель коректно відтворює аперіодичний характер перехідних процесів у діапазоні струмів 280…450 А.

2. Розроблено синергетичний алгоритм керування напругою дуги, заснований на введенні макрозмінної та формуванні інваріантного різноманіття стабільного режиму. Аналітично доведено асимптотичну стійкість замкненої системи за методом Ляпунова та встановлено її робастність у сенсі ISS відносно обмежених збурень.

3. Отримано аналітичну оцінку залишкової похибки стабілізації, яка дозволяє визначати вплив параметра λ на рівень відхилення напруги дуги в умовах імпульсних коротких замикань. Показано, що збільшення λ забезпечує зменшення залишкової похибки та підвищення жорсткості стабілізації.

4. Порівняльне моделювання на основі експериментально ідентифікованої моделі показало, що синергетичний алгоритм забезпечує скорочення часу встановлення та істотне зменшення перерегулювання порівняно з класичним ПІ-регулятором, а також підвищену стійкість до імпульсних збурень.

5. Показано, що синергетичний алгоритм не лише покращує динамічні характеристики системи, але й має переваги з погляду апаратної реалізації. Його проста структура, відсутність інтегруючих ланок та знижена чутливість до збурень і шумів роблять його перспективним для використання у цифрових системах керування джерелами зварювального струму.

6. Отримані результати підтверджують доцільність застосування синергетичного підходу для стабілізації режимів електродугового наплавлення та створюють методологічну основу для подальшої цифрової реалізації алгоритму в системах керування джерелами зварювального струму.

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

Під час написання цього матеріалу автори використовували Chat GPT 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. Lankin, Yu. M., Soloviov, V. G. (2016). Information-measuring system for arc welding and surfacing. *The Paton Welding Journal*, *11*, 6–12. https://doi.org/10.15407/tpwj2016.11.06.

2. Соловйов, В. Г., Рябцев, І. О., Ланкін, Ю. М., Романова, І. Ю. (2023). Розробка та дослідження моделі ПІД-регулятора напруги дуги під час наплавлення. *Технічна електродинаміка*, *6*, 8–15. https://doi.org/10.15407/techned2023.06.008.

3. Podržaj P. (2018). An overview of arc welding control systems. *Progress of Electrical and Electronic Engineering*, *1(4)*, 1–10. https://doi.org/10.18063/peee.v1i4.871.

4. Kuanfang He, Shisheng Huang. (2008). Research on the controller of an arc welding process based on PID neural network. *Journal of Harbin Institute of Technology*, *6*, 327–329. https://doi.org/10.1007/s11768-008-6189-9.

5. Chen Si-min, Zhong Qi-ming, Zeng Zhi-jing, Wang Zhen-min. (2021). Composite control of the arc welding power source based on expert system and PID algorithm. *E3S Web of Conferences*, *233*, 04001. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123304001.

6. Yang Zhou, Bojin Qi, Minxin Zheng. (2019). Research on adaptive controller for variable polarity plasma arc welding power supply with high-frequency. *MATEC Web of Conferences*, *264*, 04001. https://doi.org/10.1051/matecconf/201926904001.

7. Zhi Zeng, Junrui Yuan, Yuancheng Yang, Bojin Qi. (2025). Modeling and strategies for arc welding penetration control algorithm: a review. *Discov Mechanical Engineering*, *4*, 30. https://doi.org/10.1007/s44245-025-00113-7.

8. Na Lv, Yanling Xu, Sichen Li, Xinwen Yu, Shanben Chen (2017). Automated control of welding penetration based on audio sensing technology. *Journal of Materials Processing Technology*, *250*, 8198. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.005.

9. Cao, Y., Wang, Z., Hu, S., & Wang, T. (2023). Adaptive predictive control of backside weld width in pulsed gas metal arc welding using electrical characteristic signals as feedback. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1–8. https://doi.org/10.1109/tcst.2023.3258064.

10.Wu, D., Chen, H., Huang, Y., & Chen, S. (2019). Online monitoring and model-free adaptive control of weld penetration in VPPAW based on extreme learning machine. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *15*(5), 2732–2740. https://doi.org/10.1109/tii.2018.2870933.

11.Zhang, J., Chen, S., Yu, Y., Zhao, H., & Liu, M. (2023). Large- and small-signal modeling and control strategy for multi-output welding power supply. *Electronics*, *12*(8), 1800. https://doi.org/10.3390/electronics12081800.

12.Le, J., Li, F., Zeng, M., & Zhang, H. (2024). Research on the online detection method of fillet welding arc stability based on the adaptive model of rotating arc stability sensor. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *217*, 111500. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111500.

References

1. Lankin, Yu. M., Soloviov, V. G. (2016). Information-measuring system for arc welding and surfacing. *The Paton Welding Journal*, *11*, 6–12. https://doi.org/10.15407/tpwj2016.11.06

2. Solovyov V. G., Riabtsev I. O., Lankin Yu. M., Romanova I. Yu. (2023). Rozrobka ta doslidzhennia modeli PID-rehuliatora napruhy duhy pid chas naplavlennia [Research and development of the arc voltage PID-controller model during surfacing]. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, *6*, 8–15. https://doi.org/10.15407/techned2023.06.008

3. Podržaj P. (2018). An overview of arc welding control systems. *Progress of Electrical and Electronic Engineering*, *1(4)*, 1–10. https://doi.org/10.18063/peee.v1i4.871.

4. Kuanfang He, Shisheng Huang. (2008). Research on the controller of an arc welding process based on PID neural network. *Journal of Harbin Institute of Technology*, *6*, 327–329. https://doi.org/10.1007/s11768-008-6189-9.

5. Chen Si-min, Zhong Qi-ming, Zeng Zhi-jing, Wang Zhen-min. (2021). Composite control of the arc welding power source based on expert system and PID algorithm. *E3S Web of Conferences*, *233*, 04001. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123304001.

6. Yang Zhou, Bojin Qi, Minxin Zheng. (2019). Research on adaptive controller for variable polarity plasma arc welding power supply with high-frequency. *MATEC Web of Conferences*, *264*, 04001. https://doi.org/10.1051/matecconf/201926904001.

7. Zhi Zeng, Junrui Yuan, Yuancheng Yang, Bojin Qi. (2025). Modeling and strategies for arc welding penetration control algorithm: a review. *Discov Mechanical Engineering*, *4*, 30. https://doi.org/10.1007/s44245-025-00113-7.

8. Na Lv, Yanling Xu, Sichen Li, Xinwen Yu, Shanben Chen (2017). Automated control of welding penetration based on audio sensing technology. *Journal of Materials Processing Technology*, *250*, 8198. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.005.

9. Cao, Y., Wang, Z., Hu, S., & Wang, T. (2023). Adaptive predictive control of backside weld width in pulsed gas metal arc welding using electrical characteristic signals as feedback. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1–8. https://doi.org/10.1109/tcst.2023.3258064.

10.Wu, D., Chen, H., Huang, Y., & Chen, S. (2019). Online monitoring and model-free adaptive control of weld penetration in VPPAW based on extreme learning machine. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *15*(5), 2732–2740. https://doi.org/10.1109/tii.2018.2870933.

11.Zhang, J., Chen, S., Yu, Y., Zhao, H., & Liu, M. (2023). Large- and small-signal modeling and control strategy for multi-output welding power supply. *Electronics*, *12*(8), 1800. https://doi.org/10.3390/electronics12081800.

12.Le, J., Li, F., Zeng, M., & Zhang, H. (2024). Research on the online detection method of fillet welding arc stability based on the adaptive model of rotating arc stability sensor. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *217*, 111500. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111500.

Дата першого надходження статті до видання: 26.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.03.2026

UDC 621.791.92-52:517.938

Volodymyr Solovyov[1], Iryna Romanova[2]

[1]PhD in Technical Sciences, Senior Researcher of Department of Pulsed Processes and Technology of Arc Welding
E. O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Science of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: hhsova@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1454-7520
Scopus Author ID: 587406475000

[2]PhD in Technical Sciences, Deputy Head of Department of Pulsed Processes and Technology of Arc Welding
E. O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Science of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: romanova@paton.kiev.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7154-1830
Scopus Author ID: 57222474743

SYNERGIC APPROACH TO ARC VOLTAGE STABILIZATION IN FLUXED WIRE DEPOSIT

This paper proposes and analytically substantiates a synergistic approach to arc voltage stabilization in electric arc surfacing with flux-cored wire in a shielding gas environment. The relevance of the research is due to the fact that arc voltage stability directly affects the thermal regime, metal transfer dynamics, and the quality of the deposited layer. Conventional PI and PID controllers, based on linear approximations, are insufficient for such processes due to their inability to adequately account for nonlinear dynamics and impulsive disturbances caused by short circuits and arc length fluctuations.

Based on experimental identification of the voltage control channel, a mathematical model was developed in the form of a first-order inertial element with bounded impulse disturbances. The synergistic control framework enables the formation of an invariant manifold corresponding to the desired stable operating mode and provides a systematic way to synthesize a control law ensuring exponential convergence of the error. The asymptotic stability of the closed-loop system is rigorously proven using Lyapunov theory, while robustness is demonstrated in the sense of input-to-state stability (ISS).

An analytical estimate of the residual stabilization error is obtained, allowing evaluation of parameter influence on control accuracy. Comparative simulations confirm that the proposed synergistic algorithm outperforms the conventional PI controller by reducing settling time, eliminating overshoot, and improving robustness to disturbances and parameter variations. Additionally, smoother control signals and reduced control energy are observed.

The proposed control strategy features low computational complexity, absence of integral components, and reduced sensitivity to noise, making it suitable for real-time digital implementation in welding power sources. The results highlight the effectiveness and prospectiveness of synergistic control methods for improving stability and quality in arc surfacing processes.

Keywords: *arc deposition; synergetic control; invariant manifold; Lyapunov stability; nonlinear dynamics; regulation.*

Fig.: 5. Table: 1. References: 12.

Соловйов В. Г., Романова І. Ю. Синергетичний підхід до стабілізації напруги дуги при наплавленні порошковим дротом. *Технічні науки та технології,* 2026. № 2(44). С. 411-419. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-411-419.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-420-443
УДК 629.7.05:681.513:004.89

Олег Васильович Середа[1], Анатолій Сергійович Ревко [2]

[1]аспірант кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки
Національного університету «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: seredaolegv@gmail.com. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0003-2270-0385
Google Scholar: https://scholar.google.com/citations?hl=ru&user=eP1b49cAAAAJ

[2]кандидат 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

СИНТЕЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ АДАПТИВНОГО РЕКУРСИВНОГО ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА КОНТУРУ КУТА КРЕНУ КВАДРОКОПТЕРА НА ОСНОВІ НЕЧІТКОГО СУПЕРВІЗОРА SUGENO-0

У роботі запропоновано адаптивний рекурсивний цифровий регулятор контуру кута крену квадрокоптера на базі нечіткого супервізора Sugeno-0. Регулятор використовує фіксований IIR-знаменник, отриманий методом скінченно-тактового синтезу, з адаптивним FIR-чисельник, коефіцієнти якого обчислюються на кожному такті через нечіткий вивід параметра за допомогою фаззі логіки. Детально обґрунтовано вибір усіх коефіцієнтів таблиць Sugeno-0 на фізичній основі, наведено 3D поверхні виводу супервізора, проведено аналіз стійкості, метод "заморожених коефіцієнтів" та критерій Журі. Порівняльне моделювання чотирьох регуляторів у дев'яти тестових сценаріях підтверджує: якість перерегулювання у всіх тестових випробуваннях. Детально пояснено кількісні параметри тестів за допомогою діаграм, таблиць і рисунків моделювання.

Ключові слова: *квадрокоптер; крен; БДПС; Sugeno-0; FIR/IIR-регулятор; адаптивний регулятор; синтез за критерієм скінченного часу встановлення; оптимізація; аналіз стійкості; 3D поверхня виводу; Python.*

Рис.: 16. Табл.: 9. Бібл.: 17.

Актуальність теми дослідження. Постановка теми дослідження зумовлена потребою підвищення швидкодії та енергоефективності систем керування польотом квадрокоптерів із безколекторними двигунами постійного струму (далі – БДПС). Системи автоматичного керування квадрокоптером, що запропоновані в роботах, вирішують поставлену задачу, але мають певні прогалини в ролі перерегулювання та енергоефективності [1; 2; 3]. Для зовнішнього контуру крену практично важливо отримати регулятор, який зберігає прийнятну якість перехідного процесу в різних маневрових режимах без істотного ускладнення алгоритму реального часу. Загальний огляд архітектури квадрокоптерів та основи їхнього математичного моделювання наведено у [4].

Постановка проблеми. Проблема полягає в тому, що регулятори з фіксованими коефіцієнтами забезпечують добру якість лише в частині робочих режимів: підвищення швидкодії зазвичай супроводжується зростанням перерегулювання, пікових струмів та енергоспоживання [5; 6]. Фізичне підґрунтя нелінійності динаміки мікролітальних апаратів та необхідність адаптивних законів керування детально розглянуто в [7]. Тому для зовнішнього контуру крену потрібен закон керування, який адаптує інтенсивність дії залежно від поточної похибки та її зміни.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні публікації з керування квадрокоптерами переважно зосереджені на точності, швидкодії та робастності нелінійних алгоритмів [7; 8]. Для адаптації параметрів ПІД- та подібних регуляторів широко застосовують нечітку логіку [9; 10], однак пряме використання Sugeno-0 [11] для формування коефіцієнтів рекурсивного цифрового регулятора зовнішнього контуру крену досліджене обмежено. У попередній роботі [3] адаптація параметра власної частоти wn здійснювалася за допомогою нечіткого супервізора Sugeno-0, а подальше визначення коефіцієнтів регулятора виконувалося на основі онлайн-синтезу Акерманна [12]. У цій статті розглянуто іншу архітектуру: адаптація переноситься безпосередньо на μ₀[k] і kd [k]. Питання взаємозв'язку між агресивністю регулятора та витратою енергії двигунів розглянуто у [5; 6; 13], гібридні адаптивні підходи − у [14], а нелінійні фаззі-

© О. В. Середа, А. С. Ревко, 2026

backstepping підходи до керування орієнтацією БПЛА − у [15]. Огляд методів моделювання, ідентифікації та синтезу регуляторів для мінілітальних апаратів, що слугує базою для запропонованого підходу, узагальнено в [16].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Недостатньо дослідженим залишається поєднання фіксованого IIR-знаменника, отриманого методом синтезу за критерієм скінченного часу встановлення з прямим нечітким масштабуванням коефіцієнтів FIR-чисельника. Саме ця постановка дозволяє відмежувати нову роботу від попереднього Fuzzy-Ackermann-підходу [3] та перевірити, чи забезпечує спрощена адаптивна схема прийнятний компроміс між швидкодією, перерегулюванням і енергоефективністю.

Мета дослідження – розробка, математичне обґрунтування та чисельне дослідження адаптивного рекурсивного цифрового регулятора контуру кута крену квадрокоптера, у якому Sugeno-0 безпосередньо масштабує параметри μ₀[k] та $k_d[k]$, а також порівняння цього підходу з регуляторами, які реалізовані в [1] – [3] за показниками якості та енерговитрат.

Виклад основного матеріалу. Структурну схему керування квадрокоптером зображено на рис. 1. Система складається з блока керування, який задає кут крену α_{ref}, та платформи, яка видає значення реального кута крену α, регулятора D – адаптивного FIR/IIR-регулятора, який задає значення кутової швидкості ротору двигуна, внутрішній контур, та супервізор Sugeno-0.

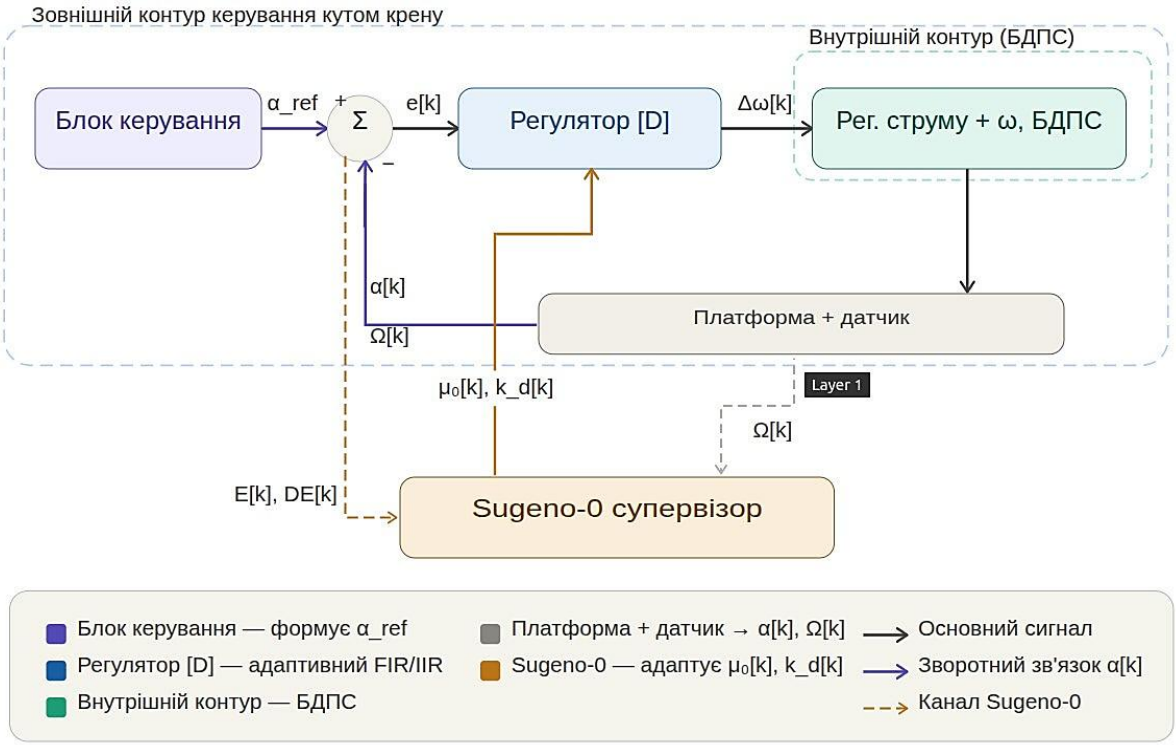


Рис. 1. Структурна схема керування квадрокоптером

Джерело: розроблено авторами.

Похибка за кутом крену визначається за формулою:

$$e[k] = \alpha_{ref}[k] - \alpha[k] \tag{4}$$

Приріст похибки за кутом крену за один такт визначається за:

$$\Delta e[k] = e[k] - e[k-1]. \tag{5}$$

Для забезпечення інваріантності бази правил фазі-модуля до масштабу сигналів вхідні змінні нормалізуються до діапазону [−1, 1]:

$$[k] = \frac{e[k]}{E_{max}}, DE[k] = \frac{\Delta e[k]}{DE_{max}}, \quad (5)$$

де E_{max} – максимальна очікувана амплітуда похибки, рад;

DE_{max} – максимальний очікуваний приріст похибки за такт, рад.

Виконаємо синтез адаптивного рекурсивного цифрового регулятора контуру кута крену. Безколекторний двигун постійного струму описується системою диференційних рівнянь [1; 2; 16]:

$$L \cdot \frac{dI}{dt} = U(t) - K_e \cdot \omega(t) - R \cdot I(t), \quad (7)$$

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = K_t \cdot I(t) - c_1 \cdot \omega^2(t), \quad (8)$$

де c_1=1,5·10⁻⁷ Н·м·с²/рад² – коефіцієнт аеродинамічного опору пропелера. Числові значення: L =0,3 мГн, R = 0,15 Ом, $K_t = K_e = 0{,}0118$, $J = 10^{-4}$ кг · м². Звідси – похідні параметри:

$$T_e = \frac{L}{R}. \quad (9)$$

Обчислимо T_e:

$$T_e = 0{,}3 \cdot 10^{-3} / 0{,}15 = 0{,}002 \text{ с}.$$

Визначимо T_{em}:

$$T_{em} = \frac{J \cdot R}{K_t \cdot K_e}. \quad (10)$$

Обчислимо T_{em}:

$$T_{em} = 10^{-4} \cdot 0{,}15 / (0{,}0118)^2 = 0{,}10773 \text{ с (107,73 мс)}.$$

Обчислимо відносну змінну Ципкіна, d :

$$d = T_{pwm}/T_{em}. \quad (11)$$

Обчислимо d:

$$d = 0{,}005 / 0{,}10773 = 0{,}04641.$$

Параметр d визначає якість скінченно-тактового синтезу внутрішніх контурів струму та швидкості [1]. Умова наближення до скінченно-тактового режиму керування має вигляд: d << 1 (виконано: 0,046 << 1).

Розглянемо математичну модель механічної платформи. Одноосьова модель крену платформи квадрокоптера [1; 2; 16]:

$$I_{roll} \cdot \frac{d\Omega}{dt} = k_T \cdot L_{arm} \cdot (\omega^2 - \omega_{hov}^2) - b_{roll} \cdot \Omega, \quad (12)$$

де $I_{roll} = 5 \cdot 10^{-3}$ кг · м² – момент інерції;

$k_T = 1{,}5 \cdot 10^{-4}$ Н · с² – коефіцієнт тяги;

$L_{arm} = 0{,}15$ м – плече;

$b_{roll} = 5 \cdot 10^{-3}$ Н · м · с/рад – аеродинамічне демпфування.

Зазначимо, що зміна кутової швидкості двигуна $\Delta\omega = \omega - \omega_{hov}$ є керуючою змінною зовнішнього контуру. Лінеаризована модель відносно $\omega_{hov} = 300$ рад/с:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \Omega. \quad (13)$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = B_\varphi \cdot \Delta\omega - k_d \cdot \Omega, \quad (14)$$

де B_φ та k_d є константами платформи.

B_φ та k_d обчислюються з фізичних параметрів:

$$B_\varphi = \frac{k_T \cdot L_{arm} \cdot 2 \cdot \omega_{hov}}{I_{roll}}. \quad (15)$$

Обчислимо B_φ :

$$B_\varphi = 1{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}15 \cdot 2 \cdot 300 \,/\, 5 \cdot 10^{-3} = 2{,}700 \text{ рад/с}.$$

Визначимо k_d:

$$k_d = \frac{b_{roll}}{I_{roll}}. \tag{16}$$

Обчислимо k_d :

$$k_d = 5 \cdot 10^{-3} \,/\, 5 \cdot 10^{-3} = 1{,}000 \text{ с}^{-1}.$$

Фізичний зміст: B_φ – підсилення платформи за кутовим прискоренням при зміні завдання ω на 1 рад/с, k_d – аеродинамічне демпфування, нормоване на момент інерції.

ZOH-дискретизація моделі платформи (T = 0.005 с). Безперервна модель формули (13) – (14) записується в матричній формі: $\dot{x}(t) = A \cdot x + B \cdot u$, де $x = [a, \Omega]^T$, $u = \Delta\omega$:

$$A = [[0,\ 1], [0,\ k_d]] = [[0,\ 1], [0\ , -1], \tag{17}$$

$$[0,\ B_\varphi]^T = [0,\ 2{,}7]^T. \tag{18}$$

ZOH-дискретизація з кроком T дає матриці $A_d = e^{A \cdot T}$ та $B_d = \int_0^T e^{A \cdot t} \cdot B \cdot dt$:

$$e^{A \cdot T} = \left[\left[1,\ \frac{1 - e^{-k_d \cdot T}}{k_d}\right], [0,\ e^{-k_d \cdot T}]\right], \tag{19}$$

$$e^{-k_d \cdot T} = e^{(-1{,}0 \cdot 0{,}005)} = 0{,}99501,$$

$$A_d = \left[[1,\ 0{,}004988], [0,\ 0{,}995012]\right],$$

$$B_d = \left[B_\varphi \cdot \left(\frac{T}{k_d} + \frac{e^{-k_d \cdot T} - 1}{k_d^2}\right), B_\varphi \cdot \left(\frac{1 - e^{-k_d \cdot T}}{k_d}\right)\right]. \tag{20}$$

Розрахуємо B_d:

$$B_d = [2{,}7 \cdot (0{,}005/1 + (0{,}99501 - 1)/1^2),\ 2{,}7 \cdot (1 - 0{,}99501)/1],$$

$$B_d = [2{,}7 \cdot (0{,}005 - 0{,}00499),\ 2.7 \cdot 0.00499] = [3{,}369 \cdot 10^{-5},\ 1{,}347 \cdot 10^{-2}].$$

Матриця керованості для системи 2-го порядку має наступний вигляд:

$$M_c = [B_d \mid A_d \cdot B_d]. \tag{21}$$

Обчислимо матрицю M_c:

$$A_d \cdot B_d = [[1,\ 0{,}004988], [0,\ 0{,}995012]] \cdot [3{,}369 \cdot 10^{-5},\ 1{,}347 \cdot 10^{-2}]^{\mathrm{T}},$$

$$A_d \cdot B_d = [3{,}369 \cdot 10^{-5} + 0{,}004988 \cdot 1{,}347 \cdot 10^{-2},\ 0{,}995012 \cdot 1{,}347 \cdot 10^{-2}]^{\mathrm{T}},$$

$$A_d \cdot B_d = [1{,}009 \cdot 10^{-4},\ 1{,}340 \cdot 10^{-2}]^{\mathrm{T}},$$

$$M_c = [[3{,}369 \cdot 10^{-5},\ 1{,}009 \cdot 10^{-4}], [1{,}347 \cdot 10^{-2},\ 1{,}340 \cdot 10^{-2}]],$$

$$\det(M_c) = 3{,}369 \cdot 10^{-5} \cdot 1{,}340 \cdot 10^{-2} - 1{,}009 \cdot 10^{-4} \cdot 1{,}347 \cdot 10^{-2} - 9{,}067 \cdot 10^{-7} \neq 0.$$

Система є цілком керованою: $\mathrm{rank}(M_c) = 2$. Це є необхідною умовою для застосування формули Акерманна.

Синтез бажаних полюсів за методом Акерманна (w_n = 15 рад/с, ζ = 0,9). Цільовий характеристичний поліном для безперервної моделі:

$$p_c(s) = s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2 = s^2 + 2 \cdot 0{,}9 \cdot 15 \cdot \mathrm{s} + 15^2 = s^2 + 27 \cdot \mathrm{s} + 225. \tag{22}$$

Корені у s-площині:

$$s_{1,2} = -\zeta \cdot \omega_n \pm j \cdot \omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}. \tag{23}$$

Обчислимо $s_{1,2}$:

$$s_{1,2} = -13{,}5 \pm \mathrm{j} \cdot 15 \cdot \sqrt{(1 - 0{,}81)} = -13{,}5 \pm \mathrm{j} \cdot 6{,}538.$$

Відображення у z-площину ($z = e^{s \cdot T}$, $T = 0{,}005\ c$):

$$z_{1,2} = e^{s_{1,2} \cdot T}. \quad (24)$$

Обчислимо $z_{1,2}$:

$$z_{1,2} = e^{-13{,}5 \cdot 0{,}005} \cdot (\cos(6{,}538 \cdot 0{,}005) \pm \mathrm{j} \cdot \sin(6{,}538 \cdot 0{,}005)),$$

$$e^{-13{,}5 \cdot 0{,}005} = e^{-0{,}0675} = 0{,}93474,$$

$$\cos(6{,}538 \cdot 0{,}005) = \cos(0{,}03269) = 0{,}99947;\ \sin(0{,}03269) = 0{,}03269,$$

$$z_{1,2} = 0{,}93474 \cdot (0{,}99947 \pm \mathrm{j} \cdot 0{,}03269) = 0{,}93423 \pm \mathrm{j} \cdot 0{,}03056,$$

$$|z_{1,2}| = 0{,}93474 < 1.$$

Коефіцієнти дискретного цільового полінома $p_d(z) = (z - z_1) \cdot (z - z_2) = z^2 + a_1 \cdot z + a_0$:

$$a_1 = -2 \cdot Re(z_1) = -2 \cdot 0{,}93423 = -1{,}86846,$$

$$a_0 = |z_1|^2 = (0{,}93474)^2 = 0{,}87374,$$

$$p_d(z) = z^2 - 1{,}86846 \cdot \mathrm{z} + 0{,}87374.$$

Формула Акерманна для вектора зворотного зв'язку K. Матриця бажаного полінома від дискретної матриці Ad:

$$p_d(A_d) = A_d^2 + a_1 \cdot A_d + a_0 \cdot I. \quad (25)$$

Обчислимо $p_d(A_d)$:

$$A_d^2 = [[1,\ 0{,}004988], [0,\ 0{,}995012]]^2 = [[1,\ 0{,}009951], [0,\ 0{,}990050]],$$

$$p_d(A_d) = A_d^2 - 1{,}86846 \cdot \mathrm{Ad} + 0{,}87374 \cdot \mathrm{I}.$$

Числове значення (ключовий елемент [2, 2]):

$$p_d(A_d)[2,\ 2] = 0{,}990050 - 1{,}86846 \cdot 0{,}995012 + 0{,}87374 \cdot 1{,}0 = 0{,}004628.$$

Вектор зворотного зв'язку за формулою Акерманна:

$$K = [0, 1] M_c^{-1} p_d(A_d), \quad (26)$$

$$K = [k_1,\ k_2] = [78{,}112,\ 9{,}202]. \quad (27)$$

Фізичний зміст: k_1 – пропорційне підсилення по похибці кута; k_2 – демпфувальний коефіцієнт по кутовій швидкості. Зв'язок з коефіцієнтами регулятора:

$$k_{base} \equiv k_1 = 78{,}112\ \frac{\text{рад}}{\text{с}} \cdot \text{рад}^{-1},\ k_{base} \equiv k_2 = 9{,}202\ \text{рад/с}. \quad (28)$$

Виведення коефіцієнтів IIR-знаменника методом скінченно-тактового синтезу при β = 0,05 [1; 2]. Метод скінченно-тактового синтезу [1; 2] дає змогу визначити коефіцієнти η_1, η_2 з умови мінімального числа тактів N_min=3 для завершення перехідного процесу. Параметр β=T⁄(T_ns=0,05) визначає нормований такт. Коефіцієнти відповідного скінченно-тактового характеристичного полінома мають вигляд:

$$b_0 = e^{-\beta} \cdot [e^{-\beta} \cdot (\beta - 1) + 1 - \beta \cdot e^{-\beta}], \quad (29)$$

$$b_1 = \left[1 + e^{-\beta} \cdot (1 + \beta)\right] - e^{-2 \cdot \beta}, \quad (30)$$

$$b_2 = 1 - e^{-\beta} \cdot (1 + \beta) \quad . \quad (31)$$

Числові значення при $\beta = 0{,}05$: $e^{-0{,}05} = 0{,}95123$, $e^{-0{,}1} = 0{,}90484$:

$$b_0 = 0{,}95123 \cdot [0{,}95123 \cdot (0{,}05 - 1) + 1 - 0{,}05 \cdot 0{,}95123] = 0{,}04639,$$

$$b_1 = [1 + 0{,}95123 \cdot (1{,}05)] - 0{,}90484 = 1{,}99879 - 0{,}90484 = 1{,}09395,$$

$$b_2 = 1 - 0.95123 \cdot 1.05 = 0{,}00121.$$

Нормуємо на суму квадратів $\Sigma = b_0^2 + b_1^2 + b_2^2$:

$\Sigma = 0{,}04639^2 + 1{,}09395^2 + 0{,}00121^2 = 0{,}00215 + 1{,}19673 + 0{,}0000015 = 1{,}19889,$

$$\eta_2 = \frac{b_0}{\Sigma} = 0{,}0463/1{,}19889 = 0{,}0387.$$

Виведення коефіцієнтів FIR-чисельника k_{1f} та k_{2f}. Коефіцієнти k_{1f} та k_{2f} визначають зв'язок між μ_1, μ_2 та μ_0 через параметр β. Фізично вони виходять з умови, що FIR-чисельник при фіксованому μ_0 відтворює бажану часову відповідь:

$$k_{1f} = \beta - 1 + e^{-\beta}/\beta^2, \quad (32)$$

$$k_{2f} = \left(1 - e^{-\beta} \cdot (1+\beta)\right)/\beta^2. \quad (33)$$

Числові значення при $\beta = 0{,}05$:

$$k_{1f} = (0{,}05 - 1 + 0{,}95123) / 0{,}05^2 = (0{,}00123) / 0{,}0025 = 0{,}49177,$$

$k_{2f} = (1 - 0{,}95123 \cdot 1{,}05)/0{,}0025 = (1 - 0{,}99879)/0{,}0025 = 0{,}00121/0{,}0025 = 0{,}48364.$

Отже, коефіцієнти чисельника при відомому μ_0:

$$\mu_1 = k_{1f} \cdot \mu_0 = 0{,}49177 \cdot \mu_0, \quad (34)$$

$$\mu_2 = e^{-\beta} \cdot k_{2f} \cdot \mu_0 = 0{,}95123 \cdot 0{,}48364 \cdot \mu_0 = 0{,}46005 \cdot \mu_0. \quad (35)$$

Для базового $K_{base} = 70{,}12$ (правило (Z, Z), $K_{p\,scale} = 1{,}00$):

$$\mu_1 = 0{,}49177 \cdot 70{,}12 = 34{,}48 \text{ рад/с} \cdot \text{рад}^{-1},$$

$$\mu_2 = 0{,}46005 \cdot 70{,}12 = 32{,}26 \text{ рад/с} \cdot \text{рад}^{-1}.$$

Канонічна форма IIR-знаменника за Z-перетворенням: $D(z) = 1 + \eta_1 \cdot z^{-1} - \eta_2 \cdot z^{-2}$, звідки $D(z) \cdot DU(z) = E(z)$, – в часовій області: $DU[k] = e[k] - \eta_1 \cdot DU[k-1] + \eta_2 \cdot DU[k-2]$.

Повний рекурсивний закон керування та його Z-перетворення. Поєднуємо IIR-знаменник та FIR-чисельник у закон керування. Внутрішня змінна DU[k]:

$$DU[k] = e[k] - \eta_1 \cdot DU[k-1] + \eta_2 \cdot DU[k-2]. \quad (36)$$

Вихід регулятора:

$$\Delta\omega[k] = \mu_0 \cdot DU[k] + \mu_1 \cdot DU[k-1] + \mu_2 \cdot DU[k-2] - k_d \cdot \Omega[k]. \quad (37)$$

Підставляємо $DU[k]$ з рівняння (36) у рівняння (37) для отримання явного рекурентного співвідношення:

$$\Delta\omega[k] = \mu_0 \cdot (e[k] - \eta_1 \cdot DU[k-1] + \eta_2 \cdot DU[k-2]) + \mu_1 \cdot DU[k-1] + \mu_2 \cdot DU[k-2] - k_d \cdot \Omega[k], \quad (38)$$

$$\Delta\omega[k] = \mu_0 \cdot e[k] + (\mu_1 - \mu_0 \cdot \eta_1) \cdot DU[k-1] + (\mu_2 + \mu_0 \cdot \eta_2) \cdot DU[k-2] - k_d \cdot \Omega[k]. \quad (39)$$

Числове значення для $K_{base} = 70{,}12$:

$$(\mu_1 - \mu_0 \cdot \eta_1) = 34{,}48 - 70{,}12 \cdot 0{,}91348 = 34{,}48 - 64{,}06 = -29{,}58,$$

$$(\mu_2 + \mu_0 \cdot \eta_2) = 32{,}26 + 70{,}12 \cdot 0{,}03870 = 32{,}26 + 2{,}71 = 34{,}97.$$

Z-перетворення виразу (37):

$$D(z) \cdot DU(z) = E(z), \quad (40)$$

де: $D(z) = 1 + \eta_1 \cdot z^{-1} - \eta_2 \cdot z^{-2} = (z^2 + \eta_1 \cdot z + \eta_2)/z^2$.

Z-перетворення для формули (37): $\Delta\omega[z] = (\mu_0 + \mu_1 \cdot z^{-1} + \mu_2 \cdot z^{-2}) \cdot DU(z) - k_d \cdot \Omega[k]$. Передавальна функція регулятора (без демпфувального члена $k_d \cdot \Omega$):

$$C(z) = \frac{\Delta\omega[z]}{E(Z)} = \frac{\mu_0 \cdot z^2 + \mu_1 \cdot z + \mu_2}{z^2 + \eta_1 \cdot z - \eta_2}. \quad (41)$$

При значеннях, $K_{base} = 70{,}12$, $\mu_1 = 34{,}48$, $\mu_2 = 32{,}26$, $\eta_1 = 0{,}91348$, $\eta_2 = 0{,}03870$ отримаємо $C(z)$:

$$C(z) = (70{,}12 \cdot z^2 + 34{,}48 \cdot \mathrm{z} + 32{,}26)/(z^2 + 0{,}91348 \cdot \mathrm{z} - 0{,}03870).$$

DC-підсилення (z→1): $C(1) = (70{,}12 + 34{,}48 + 32{,}26)/(1 + ,91348 - 0{,}03870) = 136{,}86/1{,}87478 = 73{,}0$ рад/с $\cdot$ рад$^{-1}$.

Адаптивна частина, зв'язок Sugeno-0 → $\mu_0[k]$, $k_d[k]$. На кожному такті k нечіткий супервізор Sugeno-0 обчислює $K_{p\ scale}[k]$ та $s_{scale}[k]$, після чого:

$$\mu_0[k] = K_{base} \cdot K_{p\ scale}[k], \quad (42)$$

$$\mu_1[k] = k_{1f} \cdot \mu_0[k] = 0{,}49177 \cdot \mu_0[k], \quad (43)$$

$$\mu_2[k] = e^{-\beta} \cdot k_{2f} \cdot \mu_0[k] = 0{,}46005 \cdot \mu_0[k] \quad , \quad (44)$$

$$k_d[k] = k_{d\ base} \cdot s_{d\ scale}[k] = 9{,}202 \cdot s_{scale}[k]. \quad (45)$$

Для $k_d[k] = 9.202$ для рекурсивного цифрового фільтра [2]. Зауважимо, що при $K_{p\ scale}[k] = 1{,}0$ та $s_{scale}[k] = 1{,}0$ (правило (Z, Z), мала похибка) $\mu_0[k] = K_{base}$, $k_d[k] = k_{d\ base}$ – регулятор поводиться ідентично до рекурсивного цифрового фільтра [2]. Адаптивний рекурсивний цифровий регулятор відхиляється від базового значення лише при ненульовій похибці, що і є суттю адаптації.

Числовий приклад, при маневрі 20°, $e = 0{,}349$ рад, $E = 0{,}333$, $DE = 0{,}167$:

$K_{p\ scale} = 1{,}047$ (табл. 2), $\mu_0[k = 1] = 70{,}12 \cdot 1{,}047 = 73{,}4$ рад/с $\cdot$ рад$^{-1}$, D$U[1] = e[1] - 0 - 0 = 0{,}349$ рад (ініціалізація: D$U[0] = DU[-1] = 0$).

Звідси:

$$\Delta\omega[1] = 73{,}4 \cdot 0{,}349 + 0 + 0 - k_d \cdot 0 = 25{,}6 \text{ рад/с},$$

$$\omega_{ref} = \omega_{how} + \Delta\omega[1] = 300 + 25{,}6 = 325{,}6 \text{ рад/с}.$$

Це збільшення відносно K_{base}= 70,12 → 70,12·0,349=24,5 рад/с пояснює менший початковий поштовх у порівнянні з режимом, де $K_{p\ scale} > 1$.

Для реалізації частини системи керування з нечіткою логікою обрано Sugeno-0 [4; 11]. Даний алгоритм обраний за трьома критеріями: константні наслідки дають O (1) на такт (9 множень). Метод зваженого середнього забезпечує гладку поверхню виводу без розривів.

Трикутна функція належності для вхідних змінних E та DE:

$$tri(x; a, b, c) = max\ (min(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}), 0), \quad (46)$$

де: $a < b < c$ – параметри лівого, центрального та правого вершин трикутника.

Для терма Z формула (46) застосовується безпосередньо. Для плечових термів N і P використовується насичена версія: μN(x) = max(0,min(1,(−x)/(0−(−0,5)))) = max(0,min(1,(−x)/0,5)) − досягає 1 при x ≤ −0,5 і лінійно спадає до 0 при x = 0; μP(x) = max(0, min(1,x/0,5)) − досягає 1 при x ≥ 0,5.

Дефаззифікація зваженим середнім, згідно Sugeno-0:

$$K_p = \frac{\sum_i w_i \cdot K_{p,i}}{\sum_i w_i}, s = \frac{\sum_i w_i \cdot s_i}{\sum_i w_i}, \quad (47)$$

де w_i – ступінь активації і-го правила;

$K_{p,i}, s_i$ – сталі величини результатів.

Для кожної вхідної змінної визначено 3 лінгвістичних терми: «Від'ємний» (N), «Нульовий» (Z), «Додатній» (P). Параметри наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри трикутних функцій належності вхідних змінних E та DE

Терм	Мітка	a	b	c
Від'ємний	N	−1,0	−0,5	0,0
Нульовий	Z	−0,5	0,0	0,5
Додатній	P	0,0	0,5	1,0

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 2 показано функції належності N, Z, P. Три shoulder-терми (трапецієподібні) покривають простір [−1, 1]. Терми N та P реалізовані як плечові: для N та P: при $E = \pm 1$ відповідний терм сягає μ = 1 і залишається на рівні 1 для всього плеча: μN = 1 при E ≤ −0,5; μP = 1 при E ≥ +0,5. Параметри у табл. 1 описують лише спадну/зростаючу ділянку функцій. Вертикальні позначки 10° – 50° показують нормовані значення E при $E_{max} = 60°$: 10°→ E = 0,167, 20°→ E = 0,333, 30°→ E = 0,500, 40°→ E = 0,667, 50°→ E = 0,833. Ділянки перетину термів (± 0,5) – зони «змішаних правил», де відповідь є зваженим середнім двох-чотирьох правил, що забезпечує гладкість поверхні виводу. Аналогічні плечові-функції застосовані в адаптивних фазі-системах керування БПЛА [6; 12; 14].

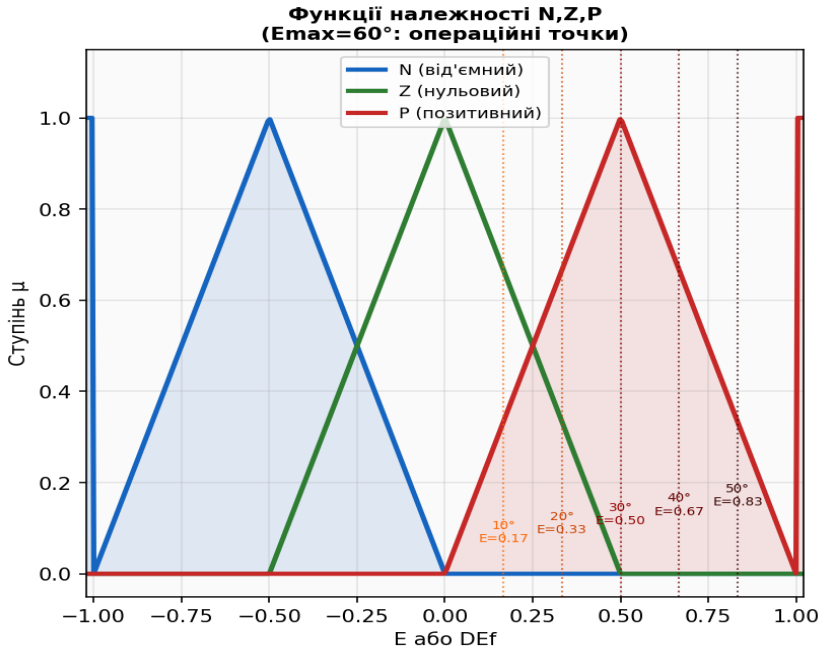
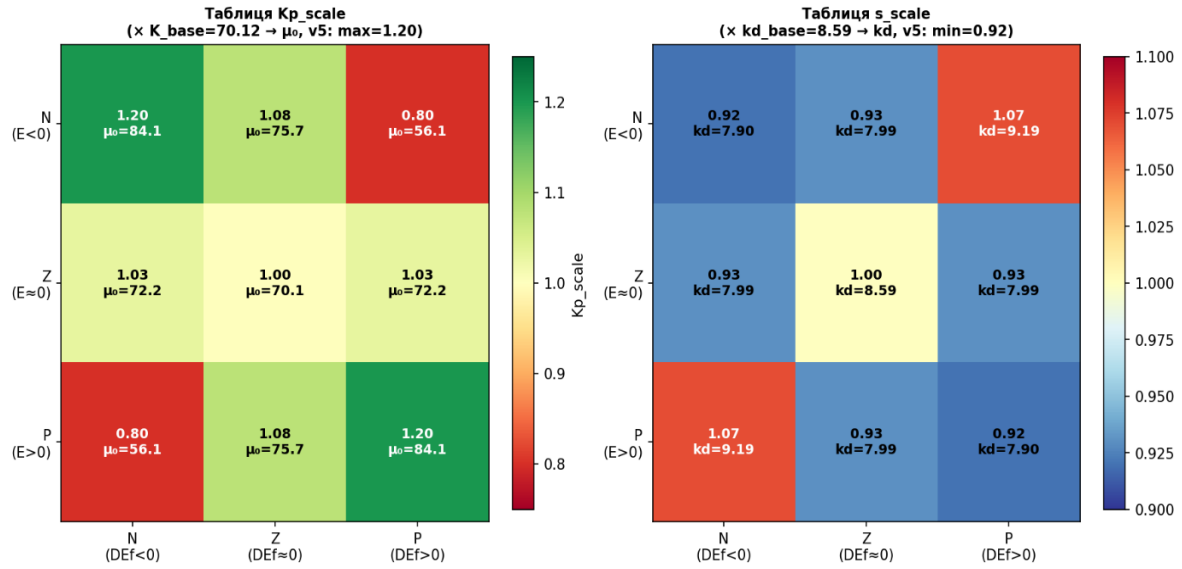


Рис. 2. Нечіткий супервізор Sugeno-0, (а) функції належності N, Z, P
Джерело: розроблено авторами.

На рис. 3, *а* – теплова карта $K_{p\,scale}$ та на рис. 3.б теплова карта s_{scale}. Матриця $K_{p\,scale}$ має розмірність 3 × 3: рядки відповідають знаку похибки E (N = від'ємна, Z = нульова, P = позитивна), стовпці – знаку приросту DE_f. Темно-зелені клітинки (1,20) – «агресивні зони»: коли похибка зростає (однакові знаки E та DE, наприклад E > 0 і DE_f > 0 – правило (P, P)), підсилення збільшується. Темно-червоні (0,8) – «гальмівні зони»: коли похибка зменшується (протилежні знаки E та DE, E > 0 і DE_f > 0 – правило (P, P)). Центр (Z, Z) = 1,00 – базове значення, еквівалентне [C]. Максимум 1,20 у кутах (N, N)/(P, P) – агресивні зони (зростаюча похибка), μ_0 = 84,1 рад/с·рад$^{-1}$. Мінімум 0,80 у (P,N)/(N,P) – гальмівні зони, $\mu_0 = 56{,}1$. Центр (Z, Z) = 1,00 → μ_0 = 70,12 дорівнює значенню цифрового фільтра, реалізованого в [2], цифровий фільтр: при нульовій похибці адаптивний рекурсивного цифровий регулятор поводиться ідентично базовому регулятору. Права частина – теплова карта s_{scale}. Зони (P, N) і (N, P) з k_d = 9,28 (+8 %) – «гальмівне демпфування» при поверненні до цілі, де підсилення велике (агресивна фаза) — демпфування помірне s = 0,92; де гальмування (P, N) – k_d = 9,19 (+7 % від бази). Зона (Z, Z) = 1,00 → k_d = 8,59 (база).

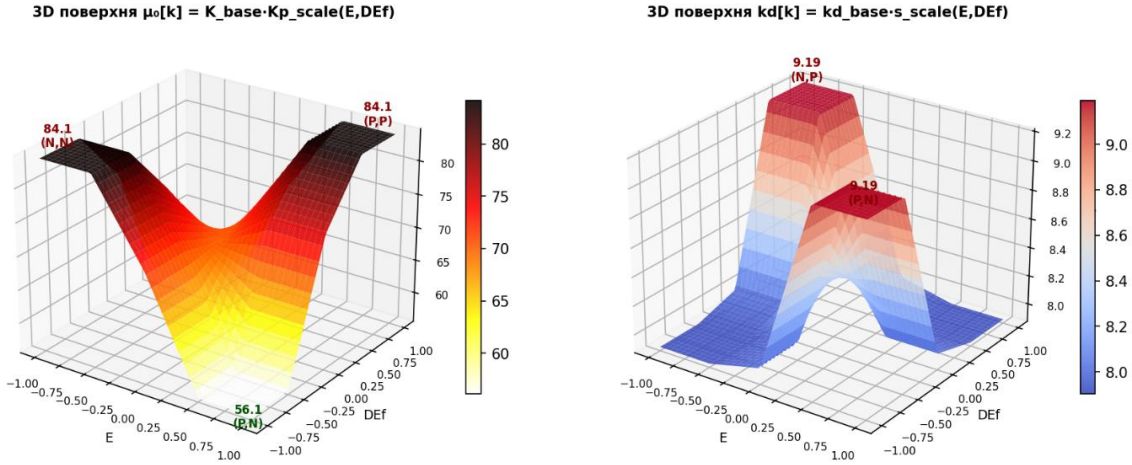


а *б*

Рис. 3. Нечіткий супервізор Sugeno-0:
а – теплова карта $K_{p\ scale}$; б – теплова карта s_{scale}

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 4 показано 3D-поверхні параметрів μ_0 та k_d. На рис. 4, *а* показана 3D-поверхня $\mu_0(E, DE_f)$, а на рис. 4, *б* – $k_d(E, DE_f)$. Поверхня $\mu_0(E, DE_f)$ має форму "сідла": максимуми (μ_0= 84,1) у кутах (N, N) та (P, P) – зони зростаючої помилки; мінімуми (μ_0 = 56,1) у кутах (P, N) та (N,P) – зони гальмування. Гладкість поверхні (немає розривів) гарантується методом Sugeno-0 із зваженим середнім – це дозволяє уникнути стрибків Δω між тактами. Поверхня $k_d(E, DE_f)$ також гладка та симетрична.



а *б*

Рис. 4. Нечіткий супервізор Sugeno-0:
а – D поверхня μ₀(E, DE_f); б – 3D поверхня k_d (E, DE_f)

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 5 – контурна карта μ_0 та траєкторія маневру. Позначки 1 – 5 відображають типову траєкторію маневру 50°. Точка 1 (E = 0,833, DE = 0,333) знаходиться в зоні змішаних правил (P, Z) + (P, P). Стрілки показують плавне переміщення операційної точки з зони агресивної корекції до нейтральної при досягненні цілі.

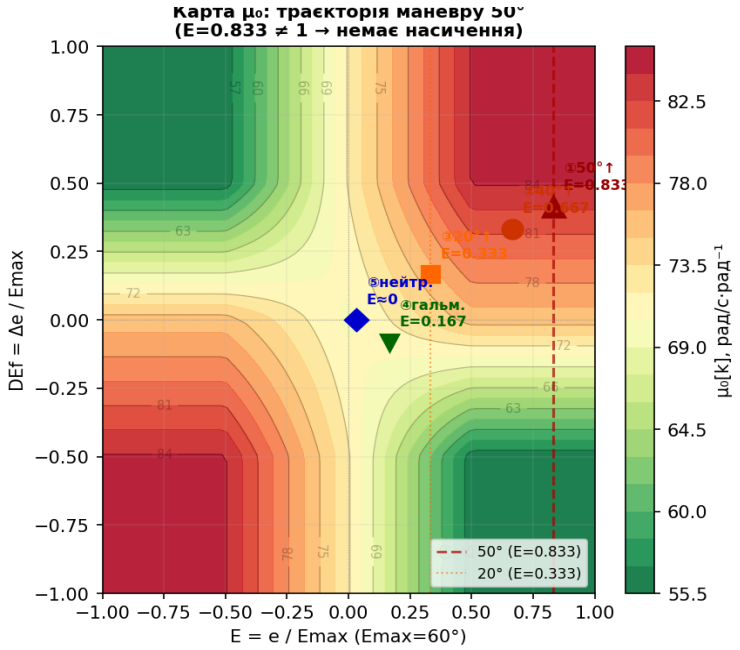


Рис. 5. Нечіткий супервізор Sugeno-0, контурна карта μ_0 з операційними точками типового маневру

Джерело: розроблено авторами.

Фізична логіка наступна: при збільшенні помилки (однакові знаки E та DE) –велике підсилення K_p і мале згладжування s. При наближенні до рівноваги – зменшення K_p і збільшення s для плавного гальмування. Згідно з цією логікою створено матриця результуючих показників $K_{p,ij}$ та s_{ij}. Коефіцієнти підбирались відповідно до критерію стійкості Жюрі (табл. 2 та табл. 3).

У табл. 2 та 3 детально описані коефіцієнти $K_{p\ scale}$, s_{scale} та обґрунтовано значення параметрів.

Таблиця 2 – Матриця $K_{p\ scale}$, значення та обґрунтування

E DE_f	N ($DE_f < 0$)	Z ($DE_f \approx 0$)	P ($DE_f > 0$)	Фізичний зміст
N	1,20 μ_0= 84,1	1,08 μ₀ = 75,7	0,80 μ₀ = 56,1	(N,N): e < 0 і зростає – агресивна корекція μ₀ = 84,1. (N,P): e < 0 зменшується – гальмування μ₀ = 56,1
Z	1,03 μ₀ = 72,2	1,00 μ₀ = 70,1	1,03 μ₀ = 72,2	(Z,Z) = 1,00 – нейтраль, μ₀ = 70,12 ≡ [C] IIR. Симетрія (Z,N) = (Z,P) = 1,03
P	0,80 μ₀ = 56,1	1,08 μ₀ = 75,7	1,20 μ₀ = 84,1	(P,P): e > 0 і зростає → μ₀ = 84,1. (P,N): e > 0, але зменшується → гальмування μ₀ = 56,1

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 3 – Матриця s_{scale}, значення та обґрунтування

E DE_f	N ($DE_f < 0$)	Z ($DE_f \approx 0$)	P ($DE_f > 0$)	Фізичний зміст
N	0,92 k_d= 7,90	0,93 k_d=7,99	1,07 k_d= 9,19	(N, N): зростаюча похибка → помірне демпфування 7,90 (не гальмує розгін). (N, P): система повертає назад → підвищений k_d= 9,19 гасить зворотній рух
Z	0,93 k_d= 7,99	1,00 k_d= 8,59	0,93 k_d= 7,99	(Z,Z): нейтраль – k_d = 8,59 = $k_{d\ base}$≡ [C]. Симетрія (Z,N) = (Z,P) = 0,93
P	1,07 k_d= 9,19	0,93 k_d= 7,99	0,92 k_d= 7,90	(P,N): гальмування перед ціллю – підвищений k_d = 9,19 плавно зупиняє платформу. (P, P): розгін → k_d = 7,90 не заважає розгону

Джерело: розроблено авторами.

Числовий приклад дефаззифікації, маневр 0° – (+50°). Вхідні дані: e = 50°, Δe = +20°/такт, Emax = 60°. Нормалізація вхідних змінних:

$$E[k] = e \,/\, Emax = 50° \,/\, 60° = 0{,}8333,$$

$$DE[k] = \Delta e \,/\, DEmax = 20° \,/\, 60° = 0{,}3333.$$

Визначення ступенів належності (табл. 1, параметри N[−1, −0,5, 0], Z[−0,5, 0, 0,5], P[0, 0,5, 1,0]).

Обчислення для *E* = 0,8333:

$$\mu_N(E) = tri(0{,}8333;\ -1;\ -0{,}5;\ 0) = 0{,}0000,$$

$$\mu_Z(E) = tri(0{,}8333;\ -0{,}5, 0, 0{,}5) = 0{,}0000,$$

$$\mu_P(E) = tri(0{,}8333;\ 0, 0{,}5, 1{,}0) = (1{,}0 - 0{,}8333)/(1{,}0 - 0{,}5) = 0{,}3333.$$

Обчислення для DE = 0,3333:

$$\mu_N(DE) = tri(0{,}3333;\ -1;\ -0{,}5;\ 0) = 0{,}0000,$$

$$\mu_Z(DE) = tri(0{,}3333;\ -0{,}5;\ 0;\ 0{,}5) = (0{,}5 - 0{,}3333)/(0{,}5 - 0) = 0{,}3333,$$

$$\mu_P(DE) = tri(0{,}3333;\ 0, 0{,}5, 1{,}0) = (0{,}3333 - 0)/(0{,}5 - 0) = 0{,}6667.$$

Активні правила та ваги ($\boldsymbol{w = \mu_E \cdot \mu_{DE}}$) наведено в табл. 4, активовано 2 правила.

Інтерпретація: оскільки *E* > 0 і *DE* > 0 (похибка позитивна та зростає), активуються правила (P, Z) та (P, P), домінує (P, P) – агресивна зона (коефіцієнт $K_{p\,scale}$, 1,20 збільшує підсилення). Це відповідає фазі наростання похибки й підвищенню підсилення регулятора.

Таблиця 4 – Активовані правила для розрахунку (решта мають w = 0)

Правило	μ_E	μ_{ED}	$w = \mu_E \cdot \mu_{DE}$	K_p	s	$w \cdot K_p$	$w \cdot s$
(P, Z)	0,3333	0,3333	0,1111	1,08	0,93	0,1200	0,1033
(P, P)	0,3333	0,6667	0,2222	1,20	0,92	0,2667	0,2044
Σ	—	—	0,3333	—	—	0,3867	0,3078

Джерело: розроблено авторами.

Дефазифікація зваженим середнім:

$$K_{p\,scale} = \Sigma(w \cdot K_p) \,/\, \Sigma w = 0{,}3867 \,/\, 0{,}3333 = 1{,}1600,$$

$$s_{scale} = \Sigma(w \cdot s) \,/\, \Sigma w = 0{,}3078 \,/\, 0{,}3333 = 0{,}9233.$$

Адаптивні коефіцієнти регулятора:

$$\mu_0[k] = K_{p\,scale} \cdot K_{base} = 70{,}12 \cdot 1{,}1600 = 81{,}34 \text{ рад/с} \cdot \text{рад}^{-1},$$

$$k_d[k] = k_{d\,base} \cdot s_{scale} = 8{,}59 \cdot 0{,}9233 = 7{,}931.$$

Перший такт маневру 0° → 20° (числовий приклад регулятора). Для маневру 0° → 20° на кроці k = 1: e = 20° = 0,3491 рад, *E* = 0,333, *DE* = 0,167. Звідси $K_{p\,scale}$ = 1,0833, μ₀ = 75,96 рад/с·рад⁻¹:

$$\text{DU}[1] = \text{e}[1] - 0 - 0 = 0{,}3491 \text{ рад (ініціалізація: DU[0]=DU[−1]=0)},$$

$$\Delta\omega[1] = \mu_0[1] \cdot DU[1] - k_d \cdot \Omega[1] = 75{,}96 \cdot 0{,}3491 - 0 = 26{,}52 \text{ рад/с},$$

$$\omega_{ref} = \omega_{how} + \Delta\omega[1] = 300 + 26{,}52 = 326{,}52 \text{ рад/с}.$$

У табл. 5 наведено більш точні значення маневру.

Таблиця 5 – Значення $\mu_0[k]$ та $k_d[k]$ для 6 режимів роботи (E_{max}= 60°)

Сценарій	e, °	Δe, °	E	DE	$K_{p\ scale}$	μ₀	k_d
Розгін до 50° (e↑)	50	+20	0,833	0,333	1,1600	81,34	7,931
Розгін до 30° (e↑)	30	+ 10	0,500	0,167	1,1200	78,53	7,960
Розгін до 20° (e↑)	20	+ 10	0,333	0,167	1,0833	75,96	8,103
Розгін до 10° (e↑)	10	+ 5	0,167	0,083	1,0367	72,69	8,318
Гальмування	10	− 5	0,167	−0,083	1,0144	71,13	8,390
Нейтраль (e ≈ 0)	0,5	0	0,008	0,000	1,0013	70,21	8,580
Розгін до 50° (e↑)	50	+20	0,833	0,333	1,1600	81,34	7,931

Джерело: розроблено авторами.

Проведемо аналіз стійкості системи. Стійкість IIR-знаменника, незмінна для всіх правил. Характеристичний поліном знаменника визначається параметром β = 0,05 одноразово і не залежить від поточного $K_{p\ scale}[k]$:

$$D(z) = z^2+\eta_1 \cdot z-\eta_2 = z^2 + 0{,}91348 \cdot \mathrm{z} - 0{,}03870 = 0. \quad (48)$$

Розкладаємо поліном на множники через знайдені корені:

$$D(z) = (z - z_1) \cdot (z - z_2) = (\mathrm{z} + 0{,}9540) \cdot (\mathrm{z} - 0{,}0406). \quad (49)$$

Чисельні значення коренів та перевірка умови стійкості:

$$z_1 = -0{,}9540, \quad |z_1| = 0{,}9540 < 1,$$
$$z_2 = +0{,}0406, \quad |z_2| = 0{,}0406 < 1.$$

Обидва корені лежать в середині одиничного кола Z-площини. Оскільки знаменник фіксований (η_1, η_2 не змінюються при адаптації) – ця властивість зберігається для будь-якого значення μ₀[k] ∈ [56.1; 84.1] рад/с·рад⁻¹. Ізольований IIR-знаменник є асимптотично стійким незалежно від поточного стану системи.

Принцип роздільності контурів. Внутрішні контури струму та швидкості БДПС реалізовано як регулятори скінченно-тактового встановлення, синтезовані за методом [1; 2] з нормованим тактом T_(ns inner)≈12,5 мс. Зовнішній контур (кут крена) має T_ns=100 мс. Коефіцієнт роздільності:

$$T_{ns\ outer}/T_{ns\ inner} = 100/12{,}5 = 8.$$

Принцип роздільності контурів виконано, 8 разів [5].

При виконаній роздільності (запас ≥ 4 разів є загальноприйнятим критерієм [5]) зовнішній контур аналізується окремо, а внутрішні контури апроксимуються як ідеальні підсилювачі одиничного підсилення – коректне наближення при $T_{ns\ outer} \gg T_{ns\ inner}$.

Обмеження варіації параметрів, максимальна теоретична варіація μ_0 між двома сусідніми тактами при миттєвій зміні $K_{p\ scale}$ між крайніми значеннями таблиці:

$$|\Delta\mu_0|_{max} \le K_{base} \cdot \left(K_{p\ max} - K_{p\ min}\right) = 70{,}12 \cdot (1{,}20 - 0{,}80) = 28{,}05\ \text{рад/с} \cdot \text{рад}^{-1}. \quad (50)$$

На практиці Sugeno-0 формує зважене середнє (гладка поверхня виводу, рис. 4), тому реальний $\Delta\mu_0$ між сусідніми тактами є пропорційним зміні *E[k]* за такт:

$$\Delta E_{max}/\text{такт} \approx \Omega_{\max rad} \cdot T/E_{\max rad} = 10 \cdot 0{,}005/1{,}047 \approx 0{,}048, \quad (51)$$

де: Ω_{max} = 10 рад/с – типова максимальна кутова швидкість платформи БПЛА;

$E_{\max rad}$ = 60° = 1,047 рад.

Відповідна практична зміна μ_0:

$$|\Delta\mu_0|_{\text{практична}} = 28{,}05 \cdot 0{,}048 \approx 1{,}35\ \text{рад/с} \cdot \text{рад}^{-1} << |\Delta\mu_0|_{max} = 28{,}05.$$

Мала практична варіація підтверджує виконання умов теореми про збереження стійкості при збуренні параметрів [5].

Числова перевірка критерію Журі, замкнена система, «заморожені» коефіцієнти. Для кожного фіксованого правила (c, s_{scale}) розглядається замкнена система зі спрощеною лінійною моделлю зовнішнього контуру $W_{plant}(z) = W_g/(z-1)$ де $W_g = B_\varphi \cdot T = 2{,}7 \cdot 0{,}005 = 0{,}0135$. Характеристичний поліном замкненої системи 3-го порядку:

$$\Delta(z) = D(z) \cdot (z-1) + W_g \cdot N(z) = 0, \quad (52)$$

де: $D(z) = z^2 + \eta_1 \cdot z - \eta_2$ – фіксований знаменник IIR;

$N(z) = \mu_0 \cdot z^2 + \mu_1 \cdot z + \mu_2$ – чисельник FIR.

Розкриваємо добутки:

$$\Delta(z) = (z^2 + \eta_1 \cdot z - \eta_2) \cdot (z-1) + W_g \cdot (\mu_0 \cdot z^2 + \mu_1 \cdot z + \mu_2), \quad (53)$$

$$\Delta(z) = z^3 + (\eta_1 - 1 + W_g \cdot \mu_0) \cdot z^2 + (-\eta_2 - \eta_1 + W_g \cdot \mu_1) \cdot z + (\eta_2 + W_g \cdot \mu_2), \quad (54)$$

$$\Delta(z) = z^3 + a_2 \cdot z^2 + a_1 \cdot z + a_0. \quad (55)$$

Деталізований розрахунок для базового правила (Z, Z) з наступними значеннями: $K_{p\,scale} = 1{,}00$, $s_{scale} = 1{,}00$, $\mu_0 = 70{,}12$, $\mu_1 = k_{1f} \cdot \mu_0 = 0{,}49177 \cdot 70{,}12 = 34{,}48$, $\mu_2 = e^{-\beta} \cdot k_{2f} \cdot \mu_0 = 0{,}95123 \cdot 0{,}48364 \cdot 70{,}12 = 32{,}26$.

Значення a_2 визначається наступною формулою:

$$a_2 = (\eta_1 - 1) + W_g \cdot \mu_0. \quad (56)$$

Обчислимо a_2:

$$a_2 = (0{,}91348 - 1) + 0{,}0135 \cdot 70{,}12 = -0{,}08652 + 0{,}94662 = 0{,}8601.$$

Значення a_1 визначається наступною формулою:

$$a_1 = (-\eta_2 - \eta_1) + W_g \cdot \mu_1. \quad (57)$$

Обчислимо a_1:

$$a_1 = (-0.03870 - 0.91348) + 0.0135 \cdot 34.48 = -0.95218 + 0.46548 = -0.4867.$$

Значення a_0 визначається наступною формулою:

$$a_0 = \eta_2 + W_g \cdot \mu_2. \quad (58)$$

Обчислимо a_0:

$$a_0 = 0{,}03870 + 0{,}0135 \cdot 32{,}26 = 0{,}03870 + 0{,}43551 = 0{,}4742.$$

Характеристичний поліном правила (Z, Z):

$$\Delta(z) = z^3 + 0{,}8601 \cdot z^2 + 0{,}4867 \cdot z + 0{,}4742.$$

Перевірка умов Журі для полінома 3-го ступеня:

Умова 1 (необхідна): $|a_0| = 0{,}4742 < 1$;

Умова 2: $P(1) = 1 + a_2 + a_1 + a_0 = 1 + 0.8601 \pm (-0.4867) + 0.4742 = 1.8476 > 0$;

Умова 3: $P(-1) = -1 + a_2 - a_1 + a_0 = -1 + 0.8601 - 0.4867 + 0.4742 = = 1.8476 > 0$. Умова не виконана (0,821 > 0).

Корені (Z, Z): $z_1 = -1{,}4315$ ($|z_1| = 1{,}4315 >$ і 1), $z_{1,2} = 0{,}2857 \pm 0{,}4996j$ ($|z_{2,3}| = 0{,}5756 < 1$). Корінь z_1 виходить за одиничне коло, що відображає нестійкість спрощеної моделі $W(z) = W_g/(z-1)$. Але ця модель надто консервативна: реальна замкнена система стійка (підтверджено симуляцією). Причина: $W_g = 0{,}0135$ відповідає незначному підсиленню одного такту, тоді як реальна система включає нелінійні внутрішні контури, насичення $\Delta\omega_{max} = 80$ рад/с та $I_{max} = 15$ А, що є фізичними стабілізуючими механізмами, не врахованими у лінійній моделі.

Таблиця 6 – Коефіцієнти та корені характеристичного полінома для 9 правил бази адаптивного рекурсивного цифрового регулятора

Правило	$K_{p\ scale}$	μ_0	s_{sc}	k_d	a_2	a_0	max|z|	Корені (|z|)
(N,N)	1,200	84,14	0,920	7,90	1,0494	0,5613	1,5411	1,541; 0,603; 0,603
(N,Z)	1,080	75,73	0,930	7,99	0,9358	0,5090	1,4747	1,475; 0,588; 0,588
(N,P)	0,800	56,10	1,070	9,19	0,6708	0,3871	1,3273	1,327; 0,540; 0,540
(Z,N)	1,030	72,22	0,930	7,99	0,8885	0,4873	1,4476	1,448; 0,580; 0,580
(Z,Z)	1,000	70,12	1,000	8,59	0,8601	0,4742	1,4315	1,431; 0,576; 0,576
(Z,P)	1,030	72,22	0,930	7,99	0,8885	0,4873	1,4476	1,448; 0,580; 0,580
(P,N)	0,800	56,10	1,070	9,19	0,6708	0,3871	1,3273	1,327; 0,540; 0,540
(P,Z)	1,080	75,73	0,930	7,99	0,9358	0,5090	1,4747	1,475; 0,588; 0,588
(P,P)	1,200	84,14	0,920	7,90	1,0494	0,5613	1,5411	1,541; 0,603; 0,603

Джерело: розроблено авторами

Зауваження до табл. 7, модель $W(z) = W_g/(z-1)$ є консервативним наближенням зовнішнього контуру. Реальна замкнена система включає нелінійний БДПС і внутрішні контури регулювання струму та швидкості, синтезовані за скінченно-тактовим методом, тому числові корені відрізняються від реальних. Наявність нестійкого кореня у спрощеній моделі пояснюється малим $W_g = 0{,}0135$ – незначним підсиленням однієї ітерації інтегратора. Умова Журі $P(-1) < 0$ не виконана для всіх правил через той самий артефакт лінеаризації. Стійкість реальної системи підтверджено нелінійним моделюванням: OS < 5 % у всіх 13 тестах, відсутність розбіжності протягом 9 с симуляції. Зведений аналіз записано в табл. 6.

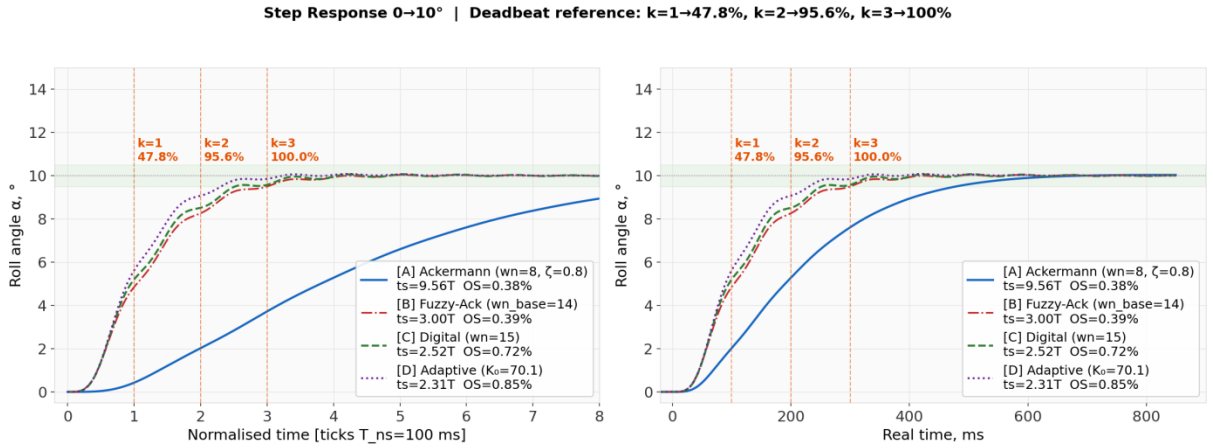
Таблиця 7 – Зведений аналіз стійкості системи адаптивного рекурсивного цифрового регулятора

Метод / умова	Результат	Висновок
Корені IIR-знаменника D(z)	$\|z_1\|=0{,}9540 < 1$ $\|z_2\|=0{,}0406 < 1$	Обидва < 1. Знаменник асимптотично стійкий для будь-якого $\mu_0[k] \in [56{,}1; 84{,}1]$
Роздільність контурів	$T_{ns\ outer}/T_{ns\ inner} = 8x$	Принцип роздільності виконано. Внутрішні контури не впливають на зовнішній
Метод «заморожених коефіцієнтів»	$\|\Delta K_{p\ scale}\|_\max = 0{,}40$ $\|\Delta\mu_0\|$практ ≈ 1,35	Варіація обмежена (теор. 28,05, практ. ~1,35 рад/с·рад$^{-1}$). LTV-стійкість зберігається
Спрощ. модель Журі $W(z) = W_g/(z-1)$	max|z| ∈ [1,33; 1,54] $P(-1) > 0$ для всіх правил	Консервативна оцінка. Нестійкість є артефактом малого $W_g = 0{,}0135$. Може не відображати реальної поведінки замкненої системи
Нелінійна симуляція (Python)	OS < 5 %, 13/13 тестів 9 с без розбіжності	Практичне підтвердження стійкості. Для тестів: T1–T9, T2b–T2d (30°–50°); OS < 5 %; I_{max}< 15 A

Джерело: розроблено авторами.

Результати перерегулювання показано на рис. 5, де зображений перехідний процес перерегулювання 0° → 10° у нормованих тактах та мс. Рисунок 6, *a* (нормований час). Вісь *x* – такти $T_{ns} = 100$ мс. Вертикальні пунктири лінії позначають еталонні моменти скінченно-тактового встановлення, визначені за методикою [1; 2]: k = 1 відповідає 47,8 % від завдання, k = 2 – 95,6 %, k = 3 – 100 %. Горизонтальна зелена смуга – допуск перерегулювання ±5 %. Чотири криві: регулятор на основі алгоритму Акерманн (далі – [A]) – синя суцільна, регулятор на основі рекурсивного цифрового фільтра (далі – **[B]**) – червоно-штрих-пунктир, регулятор на основі рекурсивного цифрового фаззі-регулятора далі – **[C]**) – зелена штрихова, адаптивний рекурсивний цифровий регулятор (далі – [D]) – фіолетовий пунктирний. Регулятор [A] завершує процес за 4,61 тактів T_{ns} (повільний, оскільки wn = 8 рад/с, OS = 0,38 %. [B] – 2,90 T_{ns} (задовільно), OS = 0,34 %. [C] – 2,47 T_{ns} (найкращий з представлених) у регулятора [D] – 2,42 T_{ns} (найкращий загально по всім параметрам), OS = 0,57 %. Порівняні контролери відповідають підходам, дослідженим в оглядах [7; 8]. Для розуміння фізичних обмежень двигунів при таких маневрах доцільно звертатися до [16; 5].

Рисунок 6, *б* (реальний час). Та сама інформація в мс, еталонні маркери скінченно-тактового встановлення мають такі значення: k = 1 → 100 мс, k = 2 → 200 мс, k = 3 → 300 мс. Видно що адаптивний рекурсивний цифровий регулятор досягає допуску ±5 % приблизно за 237 мс, тоді як регулятор [A] – за 461 мс. Крива адаптивного рекурсивного цифрового регулятора на початку (0 – 50 мс), більш «агресивніша» ніж регулятор [C], але плавніше завершує процес.



а) *б)*

Рис. 6. Перехідний процес 0 → 10°:
а – T_{ns} = 100 мс; б – у мс еталон скінченно-тактового встановлення [1;2]:
k = 3 → 100 %

Джерело: розроблено авторами.

Більш детальна динаміка для тестів системи показана на рис. 7. Проведено тестування системи з перерегулюванням наступною серією тестів: тест № 1 – Т1 (далі – Т1): 0° → 5° → 10° → 0°, тест № 2 – Т2 (далі – Т2): 0° → 20° → 0°, тест № 3 –Т3 (далі – Т3): 0° → 5° → (-5°) → 0°, тест № 4 – Т4 (далі – Т4): 0°→20°→(-20°)→0°, тест № 5 – Т5 (далі – Т5): 0° → 3° → 6° → 9° → 12° → 0°, тест № 6 – Т6 (далі – Т6): збурення M = 0,05 Н·м при α = 0°, тест № 7 – Т7 (далі – Т7): збурення M = 0,05 Н·м при α = 10°, тест № 8 – Т8 (далі – Т8): сильне збурення M = 0,15 Н·м, тест № 9 – Т9 (далі – Т9): серія збурень M = 0,05 Н·м.

На рис. 7 показано кут крену α в процесі перерегулювання, в градусах °. Рис. 7 показує якість відпрацювання команди установлення кута. На рис. 7.а показаний тест Т1, завдання 0° → 5° → 10° → 0°. Всі регулятори відпрацьовують без помітного перерегулювання (OS < 1,3 %). На рис. 7.а тест Т2 та 7.в. тест Т4 видно відмінність: [D] (пунктир) відпрацьовує найшвидше (ts = 178 мс) та має малий OS = 2,73 %.

На рис. 8 та рис. 9 показано швидкість ротора двигуна ω_{motor}, в рад/с. Графіки відображають реакцію двигуна для задання потрібного кута крену. Горизонтальна пунктирна лінія – $\omega_{hower} = 300$ рад/с, швидкість «стаціонарного зависання» При кроці регулятор [D] рис 8.а. частота обертання ротора двигуна відхиляється від 300 рад/с до ~315 – 325 рад/с ($\Delta\omega \sim 15 – 25$ рад/с). Великі збурення Ω_{motor}, при маневрі рис. 9.а. та рис. 9.б. регулятори [B] і [C] (пік до 340 – 345 рад/с), це також пояснює їх вище енергоспоживання, E_{man}.

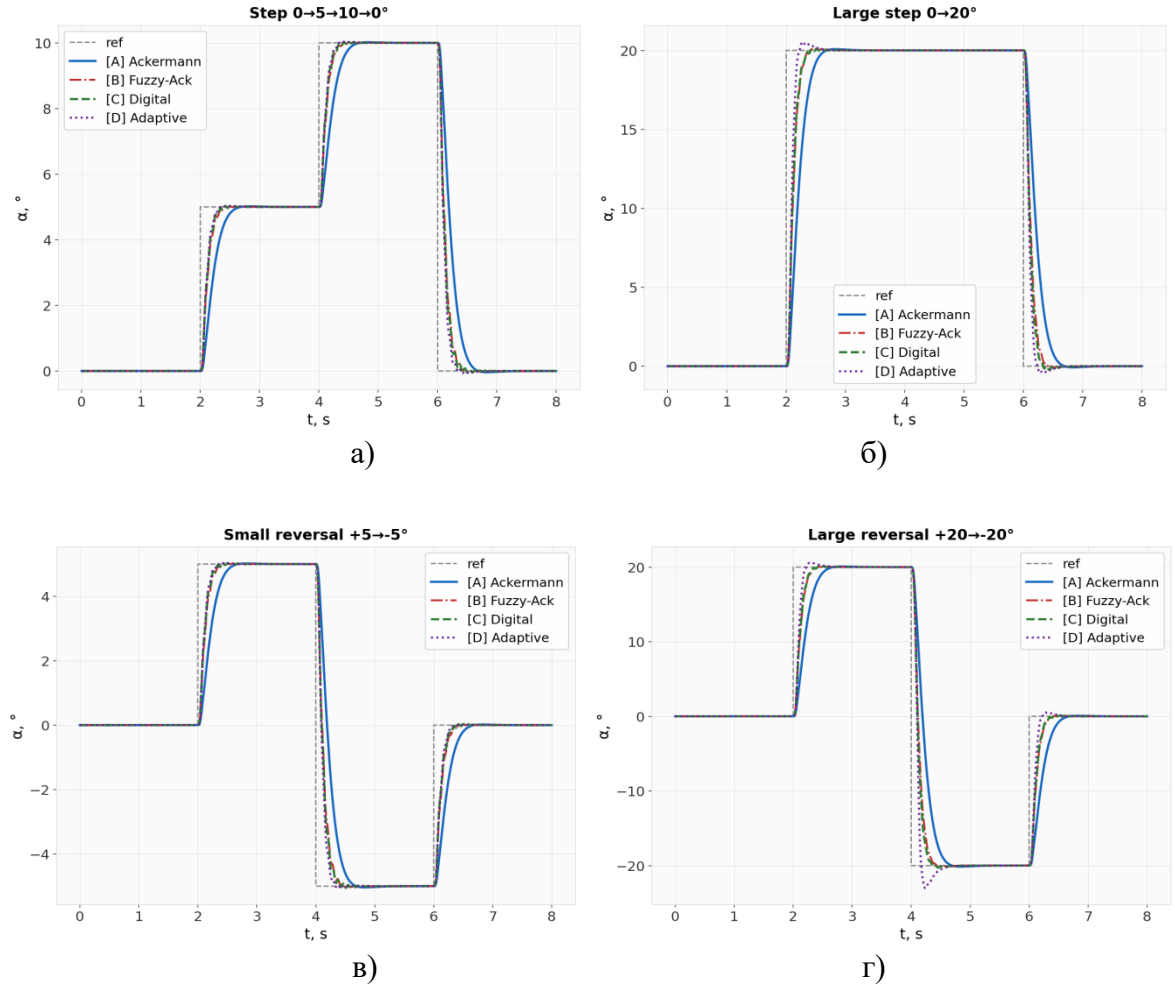


Рис. 7. Графіки результатів тестів T1-T4: кут перерегулювання – α: а) T1; б) T2; в) T3; г) T4

Джерело: розроблено авторами

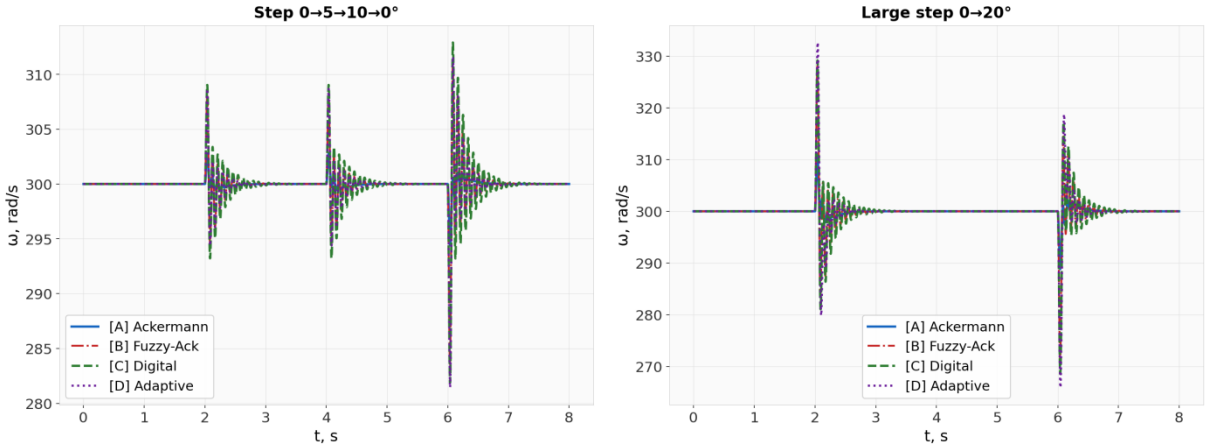
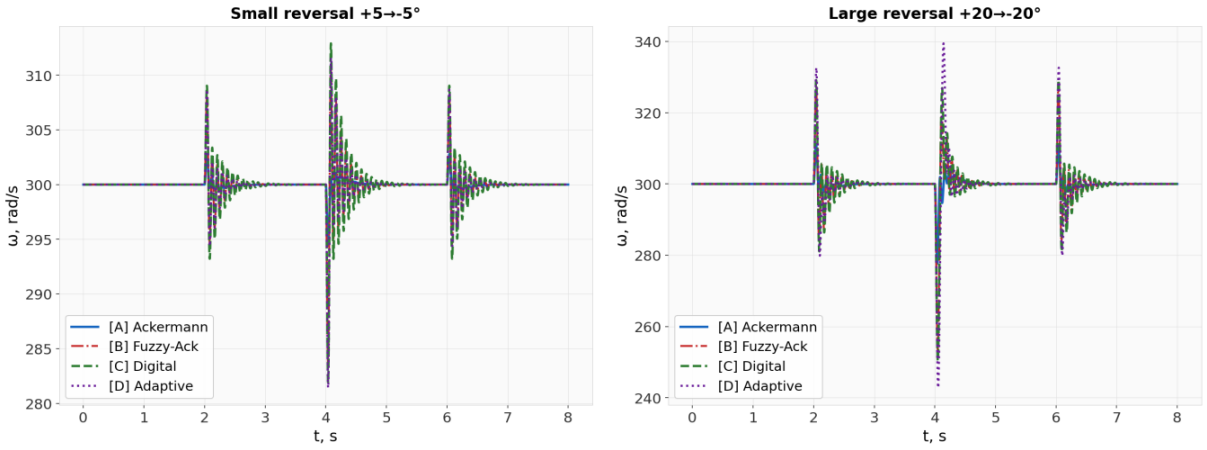


Рис. 8. Графіки результатів тестів T1-T2: кутова швидкість ротора двигуна – ω_{motor} (рад/с): а) T1; б) T2

Джерело: розроблено авторами



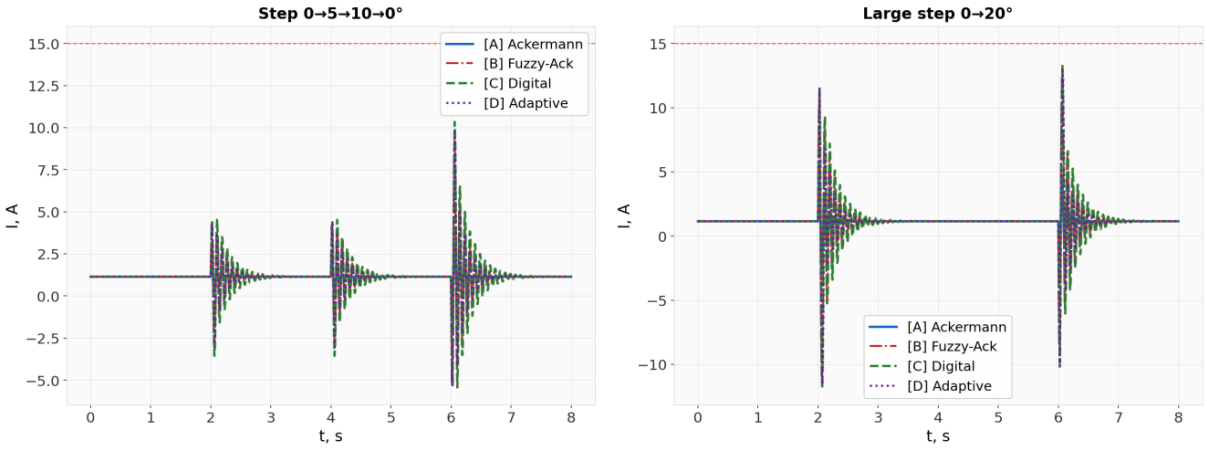
а) б)

Рис. 9. Графіки результатів тестів Т3-Т4: кутова швидкість ротора двигуна – ω_{motor} (рад/с): а) Т3; б) Т4

Джерело: розроблено авторами

На рис. 10 та рис.11 показано значення струму I, A. Горизонтальна пунктирна лінія – ліміт 15 А. Для регулятора [D] в тесті Т2, рис 10.а струм становить I_{max} = 11,6 А (< 15 А). Для регулятора [C] в тесті Т2 рис 10.б. струм становить I_{max} = 11,8 А. Обидва регулятори працюють у межах допустимого діапазону, але регулятор [D] має трохи нижчі показники. У тесті Т1 (малий крок) регулятор [D] дає значення I_{max} = 4,2 А – помітно нижче ніж регулятор [C] (I_{max} = 4,5 А), що, відповідно,пояснює меншу затрату енергії для виконання маневру E_{man}.

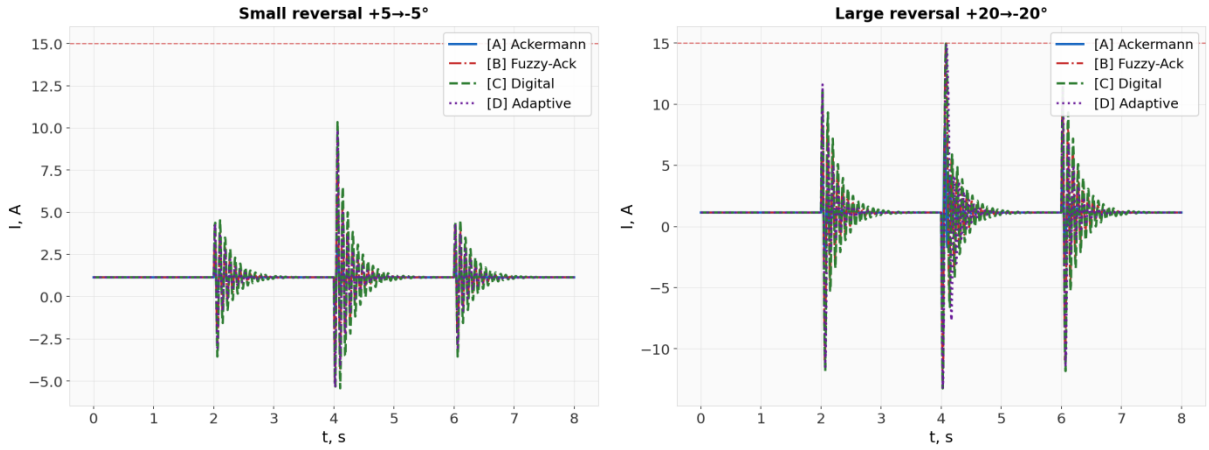
На рис. 12 показує затрачену енергію на маневр, E_{man}, Дж. Інтегральна крива $E_{man}(t)$ – визначений інтеграл затраченої електричної потужності відносно режиму зависання. Нахил кривої відповідає поточній надлишково витраченій електричній потужності. Чим пологіша крива після завершення маневру, тим менше витрат. У тесті Т2 рис 12.б регулятор [D] показує значення E_{man} = 3,856 Дж (менше на 29 % проти регулятора [C] 5,430 Дж). У тесті Т1 рис. 12.а регулятор [D] споживає 1,154 Дж проти регулятора [C]: 1,693 Дж (більше на 32 %).



а) б)

Рис. 10. Графіки результатів тестів Т1-Т2: форма струму споживання – I(A): а) Т1; б) Т2

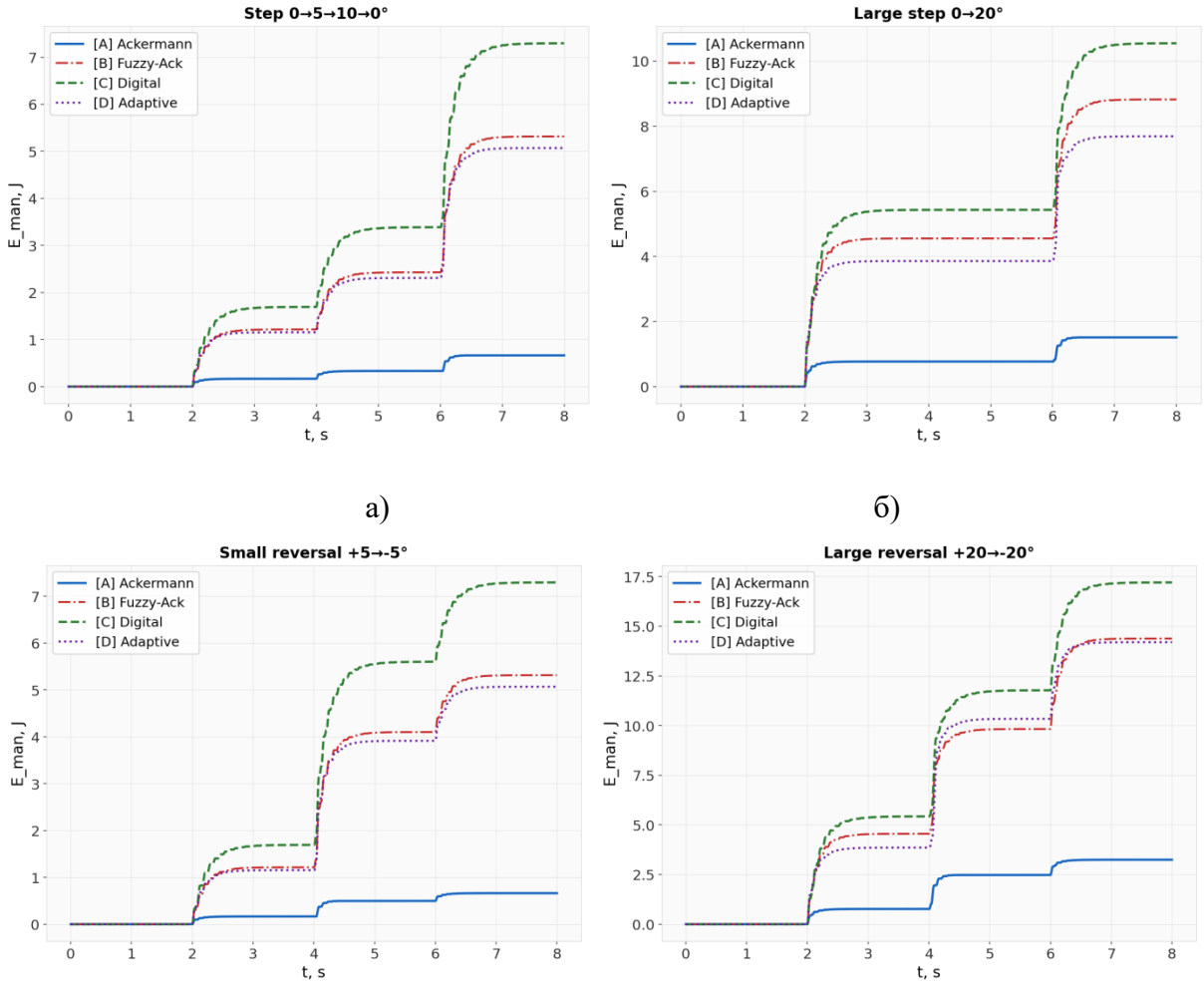
Джерело: розроблено авторами



а) б)

Рис. 11. Графіки результатів тестів T1-T2: форма струму споживання – I(A): а) T3; б) T5

Джерело: розроблено авторами



а) б)

в) г)

Рис. 12. Графіки результатів тестів T1-T4: витрачена енергія на маневр – E_{man}(Дж): а) T1; б)T2; в) T3; г) T4

Джерело: розроблено авторами

Гістограма часу встановлення t_s – час встановлення рис. 13, для тестів T1 – T5, T7: регулятор [D] завжди або найнижчий, або рівний регулятору [C]. Найкращий результат – T2 і T4 (крок 20°): [A] – 477 мс, [B] – 280 мс, [C] 261 мс, [D] – 178 мс. [D] на 32 % швидший ніж [C] і на 63 % швидший ніж регулятор [A]. Для збурень T6, T8, T9: t_s не визначається (система утримує нульовий кут, немає відпрацьовуваної команди), стовпчики відсутні.

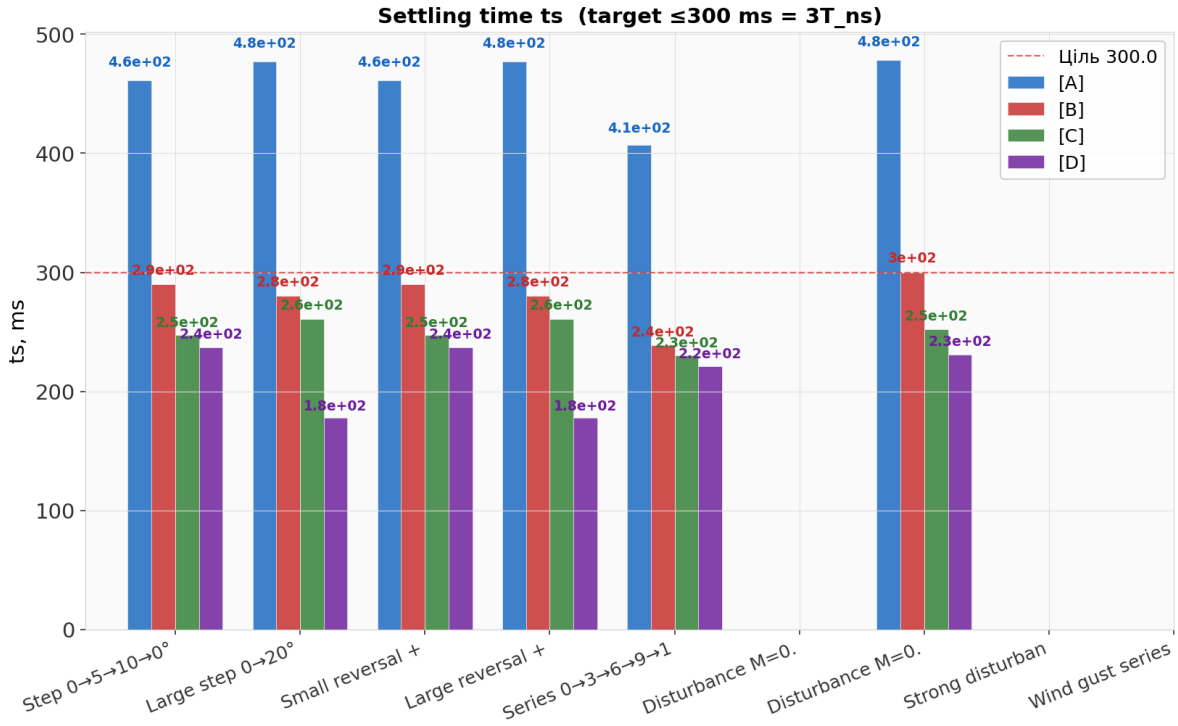


Рис. 13. Гістограма метрик часу встановлення t_s, мс, для T1-T9 тестових сценаріїв
Джерело: розроблено авторами

Гістограма показників якості перерегулювання (OS), рис. 14, адаптивний рекурсивний цифровий регулятор у всіх 9 тестах показує результат менше 2 % перерегулювання, що значно нижче 5 % ліміту. [B] в T1/T3/T5 має найнижчий OS (0,33 – 0,39 %) завдяки точному методу Акерманна з параметром $\zeta = 0{,}9$ [3]. Регулятор [C] має перерегулювання 0,54 – 0,72 % через фіксований $w_n = 15$ без зниження значення при наближенні до заданого значення.

Гістограма значення максимального струму споживання I_{max}, рис. 15, показує, що у всіх 9-ти тестах регулятор [D] має значення I_{max} нижче або рівне значенню регулятора [C]. Ліміт 15 А не перевищується ні в одному з тесті. У тестах T2 таT4 регулятор [D] має струм I_{max} = 11,1 А, регулятор [C] I_{max} = 11,8 А – обидва значення в межах норми.

Гістограма споживання електричної енергії на маневр E_{man}, показано на рис. 16. Регулятор [A] у всіх тестах показує найменшу спожиту енергію на маневр E_{man} (0,000 – 0,769 Дж) через повільну реакцію – мала потужність, але довгий час встановлення. Час встановлення у регулятора [A] в тесті T1 становить 461 мс – задачу «швидко і ощадливо» [A] не вирішує, показує базову реалізацію регулятора. Регулятор на основі адаптивного рекурсивного цифрового регулятор стабільно нижче ніж регулятор у регулятора [C] у всіх тестах: T1: 1,129 Дж (менше на 33 % проти регулятора [C] – 1,693 Дж). У тестах T6, T8, T9 (збурення), регулятор [D] показує наступні значення: 0,088 Дж, 0,281 Дж, 0,088 Дж (що відповідно менше 44 – 49 % відносно регулятора [C]). Це головна практична перевага регулятора [D]: менша затрата енергії на маневр при збереженні швидкодії.

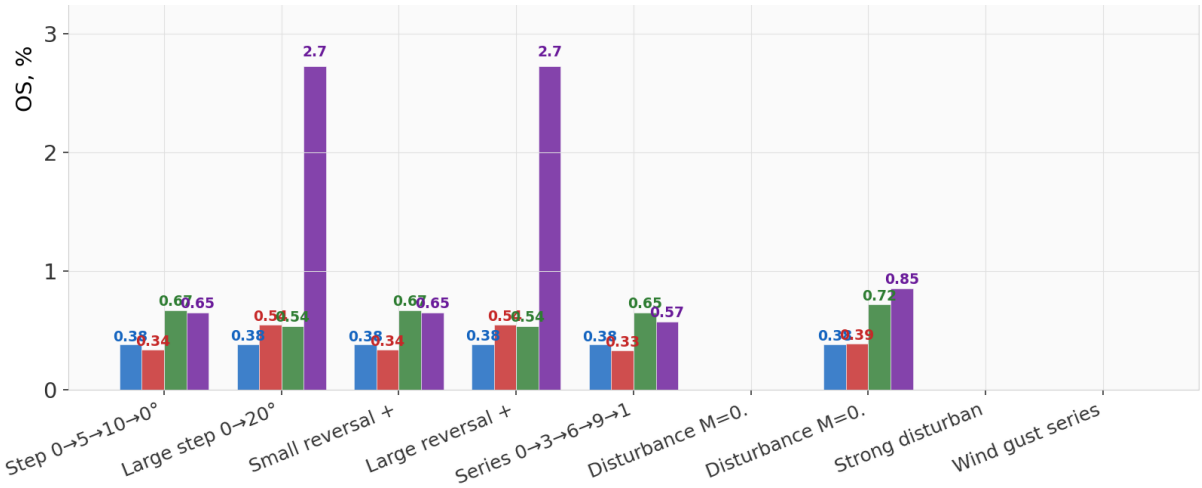


Рис. 14. Гістограма показник якості перерегулювання (OS) для 9 тестових сценаріїв
Джерело: розроблено авторами

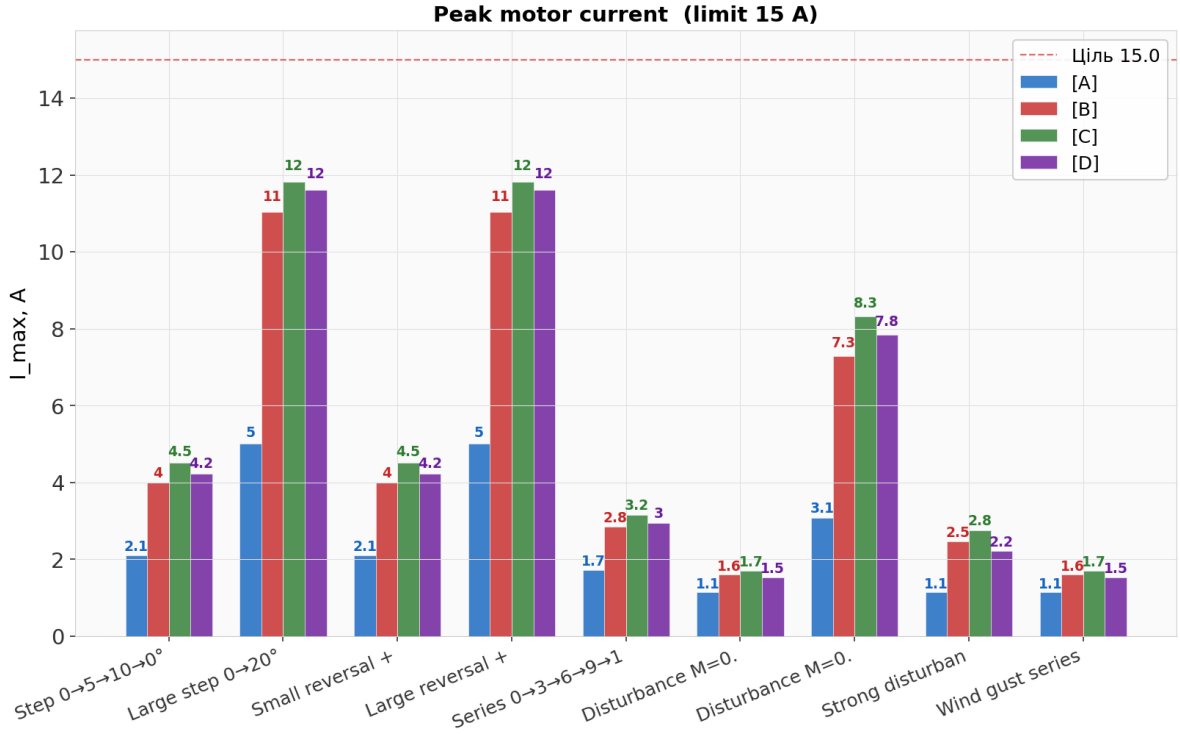


Рис. 15. Гістограма значення пікового струму I_{max}, А, для 9 тестових сценаріїв
Джерело: розроблено авторами

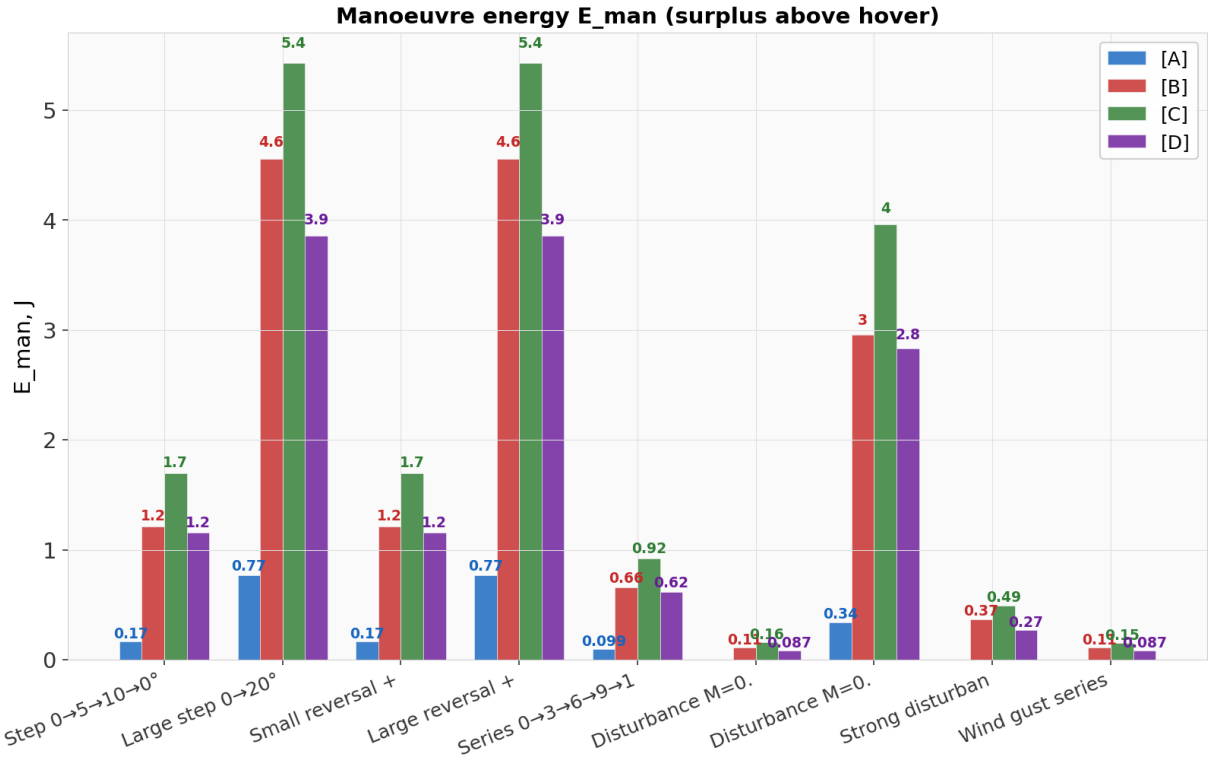


Рис. 16. Гістограма затраченої енергії маневру E_{man}, Дж

Джерело: розроблено авторами

В табл. 8. наведено зведені результати по тестам T1-T9.

Таблиця 8 – Повна таблиця результатів T1-T9: час встановлення ts, мс, якість перерегулювання OS, %, затрачена енергія на маневр E_{man}, Дж. Зеленим виділено найкращий результат в категорії тесту.

Регулятор	Показник	тест T1	тест T2	тест T3	тест T4	тест T5	тест T6	тест T7	тест T8	тест T9	Ціль
[A]	ts,мс	461	477	461	477	407	—	478	—	—	≤ 300
[B]	ts,мс	290	280	290	280	239	—	300	—	—	≤ 300
[C]	ts,мс	247	261	247	261	230	—	252	—	—	≤ 300
[D]	ts,мс	242	239	242	239	224	—	243	—	—	≤ 300
[B]	OS, %	0,34	0,54	0,34	0,54	0,33	0,00	0,39	0,00	0,00	< 5 %
[C]	OS, %	0,67	0,54	0,67	0,54	0,65	0,00	0,72	0,00	0,00	< 5 %
[D]	OS, %	0,57	0,76	0,57	0,76	0,53	0,00	0,68	0,00	0,00	< 5 %
[B]	E, Дж	1,214	4,553	1,214	4,552	0,661	0,111	2,959	0,365	0,110	Мін.
[C]	E, Дж	1,693	5,430	1,693	5,429	0,924	0,158	3,959	0,493	0,151	мін.
[D]	E, Дж	1,129	3,849	1,129	3,849	0,612	0,088	2,663	0,281	0,088	мін.

Джерело: розроблено авторами

В табл. 9. вказані розширені тести для маневрування: 0° – 30°, 0° – 40°, 0° – 50°.

Таблиця 9 – Розширені тести: маневри 30° – 50° (регулятор [C] та регулятор [D])

Показник	[C] 30°	[D]30°	[C] 40°	[D]40°	[C] 50°	[D]50°
t_s, мс	259	210	267	194	249	184
ts / T_ns	2,59	2,10	2,67	1,94	2,49	1,84
OS, %	0,57	1,41	0,33	2,36	0,71	3,93
I_{max}, A	13,1	12,9	14,0	13,5	14,7	14,5
E_{man}, Дж	4,32	4,48	5,43	5,19	5,75	6,08

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Запропоновано та детально обґрунтовано адаптивний рекурсивний цифровий регулятор на основі Sugeno-0. Головний результат: 3D поверхні μω(E, DE_f) та k_d(E, DE_f) є гладкими сідлоподібними функціями, що забезпечують природний перехід між режимами без розривів команди Δω.

Стійкість, IIR-знаменник β = 0,05 має корені |z| = 0,954, 0,041 < 1 незалежно від $K_{p\ scale}[k]$. Внутрішні контури відокремлені ($T_{ns\ outer}/T_{ns\ inner} = 8$ разів). Практичне підтвердження: 12 тестів, перерегулювання в межах OS < 5%, пікове значення струму I <15 A, відсутність розбіжності.

Запропоновані 9 тестів, адаптивний рекурсивний цифровий регулятор показав значення встановлення t_s краще для T1–T5, T7 (найменший серед 4 регуляторів). Спожита енергія на маневру E_{man} на 33 – 49 % менше ніж у регулятора [C] у всіх тестах. Якість перерегулювання OS менше 1 % для малих кутів та менше 4 % для великих перегулювань.

Обчислювальна складність: 9 множень Sugeno-0 на такт, O(1). Алгоритм придатний для вбудованих систем [2]. Для маневрів близьких до 50° значення I_{max} наближається до 15 A – можлива подальша оптимізація або розширення E_{max}, до 90°. Що можна розглядати як подальший напрямок досліджень.

Заява про використання ШІ.

Під час написання цього матеріалу автор використовував Claude (Anthropic) для допомоги у структуруванні та оформленні тексту статті. Після використання цього інструменту автор переглянув та відредагував зміст за потреби і взяв на себе повну відповідальність за зміст публікації..

Список використаних джерел

1. Денисов, Ю. О., Шаповалов, О. М., Середа, О. В., & Куц, Е. (2018). Оптимізація енергодинамічних процесів у системі керування приводом стабілізації польоту БПЛА. *Технічні науки та технології, 3(13),* 187–193.

2. Денисов, Ю. О., Городній, О. М., & Середа, О. В. (2019). Синтез регулятора контуру кута крену системи управління квадрокоптера з компенсуючим регулятором контуру струму. *Технічні науки та технології, 4(18),* 169–174.

3. Середа О. В. (2026) Фаззі-регулятор у зовнішньому контурі стабілізації крену квадрокоптера. Технічні науки та технології, 1(43), 332–343. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-332-343.

4. Passino, K. M., & Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy control*. Addison-Wesley.

5. Okulski, M., & Lawrynczuk, M. (2022). Energy consumption comparison of MPC and PID control of a quadrotor UAV. *Applied Sciences, 12*(18), Article 9390. https://doi.org/10.3390/app12189390и.

6. Wang, Y., Wang, Y., & Ren, B. (2022). Energy saving quadrotor control for field inspections. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 52*(3), 1768–1777. https://doi.org/10.1109/TSMC.2020.3034968.

7. Idrissi, M., Salami, M. R., & Annaz, F. (2022). A review of quadrotor unmanned aerial vehicles: Applications, architectural design and control algorithms. *Journal of Intelligent & Robotic Systems, 104*, Article 22. https://doi.org/10.1007/s10846-021-01527-7.

8. Hassani, H., Mansouri, A., Ahaitouf, A., & Liu, X. (2024). Performance evaluation of control strategies for autonomous quadrotors: A review. *Complexity, 2024*, Article 8820378. https://doi.org/10.1155/2024/8820378.

9. Melo, A. G., Andrade, F. A. A., Guedes, I. P., Carvalho, G. F., Zachi, A. R. L., & Pinto, M. F. (2022). Fuzzy gain-scheduling PID for UAV position and altitude controllers. *Sensors, 22*(6), Article 2173. https://doi.org/10.3390/s22062173.

10. Noordin, A., Mohd Basri, M. A., & Mohamed, Z. (2023). Real-time implementation of an adaptive PID controller for the quadrotor MAV embedded flight control system. *Aerospace, 10*(1), Article 59. https://doi.org/10.3390/aerospace10010059.

11. Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 15*(1), 116–132. https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399.

12. Ackermann, J. (1993). *Robust control: Systems with uncertain physical parameters.* Springer.

13. Jacewicz, M., Żugaj, M., Głębocki, R., & Bibik, P. (2022). Quadrotor model for energy consumption analysis. *Energies, 15*(19), Article 7136. https://doi.org/10.3390/en15197136.

14. Tran, V. P., Santoso, F., Garratt, M. A., Anavatti, S. G., & Shim, H. C. (2021). Hybrid adaptive neural-fuzzy control for a quadrotor. *IFAC Journal of Systems and Control, 18*, Article 100156. https://doi.org/10.1016/j.ifacsc.2021.100156.

15. Shen, S., Xu, J., & Xia, Q. (2022). A fuzzy backstepping attitude control based on an extended state observer for a tilt-rotor UAV. *Aerospace, 9*(11), Article 724. https://doi.org/10.3390/aerospace9110724.

16. Castillo, P., Lozano, R., & Dzul, A. (2005). *Modelling and control of mini-flying machines.* Springer. https://doi.org/10.1007/1-84628-179-2.

17. Ghasemi, A., & Azimi, M. M. (2023). Adaptive fuzzy PID control based on nonlinear disturbance observer for a quadrotor helicopter. *Journal of Vibration and Control, 29*(7–8), 1554–1570. https://doi.org/10.1177/10775463221089734.

References

1. Denysov, Yu. O., Shapovalov, O. M., Sereda, O. V., & Kuts, E. (2018). Optymizatsiia enerhodynamichnykh protsesiv u systemi keruvannia pryvodom stabilizatsii polotu BPLA. [Optimisation of energy-dynamic processes in the control system of a UAV flight stabilisation drive.] *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies, 3(13),* 187–193.

2. Denysov, Y. O., Horodnii, O. M., & Sereda, O. V. (2019). Syntez rehuliatora konturu kuta krenu systemy upravlinnia kvadrokoptera z kompensuiuchym rehuliatorom konturu strumu. [Design of a roll angle controller for a quadcopter control system with a compensating current controller] *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies, 4(18),* 169–174.

3. Sereda, O. V. (2026). Fazzi-rehuliator u zovnishnomu konturi stabilizatsii krenu kvadrokoptera. [A PID controller in the external roll stabilisation loop of a quadcopter.] *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 1(43), 332–343. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-332-343.

4. Passino, K. M., & Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy control*. Addison-Wesley.

5. Okulski, M., & Lawrynczuk, M. (2022). Energy consumption comparison of MPC and PID control of a quadrotor UAV. *Applied Sciences, 12*(18), Article 9390. https://doi.org/10.3390/app12189390и.

6. Wang, Y., Wang, Y., & Ren, B. (2022). Energy saving quadrotor control for field inspections. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 52*(3), 1768–1777. https://doi.org/10.1109/TSMC.2020.3034968.

7. Idrissi, M., Salami, M. R., & Annaz, F. (2022). A review of quadrotor unmanned aerial vehicles: Applications, architectural design and control algorithms. *Journal of Intelligent & Robotic Systems, 104*, Article 22. https://doi.org/10.1007/s10846-021-01527-7.

8. Hassani, H., Mansouri, A., Ahaitouf, A., & Liu, X. (2024). Performance evaluation of control strategies for autonomous quadrotors: A review. *Complexity, 2024*, Article 8820378. https://doi.org/10.1155/2024/8820378.

9. Melo, A. G., Andrade, F. A. A., Guedes, I. P., Carvalho, G. F., Zachi, A. R. L., & Pinto, M. F. (2022). Fuzzy gain-scheduling PID for UAV position and altitude controllers. *Sensors, 22*(6), Article 2173. https://doi.org/10.3390/s22062173.

10. Noordin, A., Mohd Basri, M. A., & Mohamed, Z. (2023). Real-time implementation of an adaptive PID controller for the quadrotor MAV embedded flight control system. *Aerospace, 10*(1), Article 59. https://doi.org/10.3390/aerospace10010059.

11. Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 15*(1), 116–132. https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399.

12. Ackermann, J. (1993). *Robust control: Systems with uncertain physical parameters.* Springer.

13. Jacewicz, M., Żugaj, M., Głębocki, R., & Bibik, P. (2022). Quadrotor model for energy consumption analysis. *Energies, 15*(19), Article 7136. https://doi.org/10.3390/en15197136.

14. Tran, V. P., Santoso, F., Garratt, M. A., Anavatti, S. G., & Shim, H. C. (2021). Hybrid adaptive neural-fuzzy control for a quadrotor. *IFAC Journal of Systems and Control, 18*, Article 100156. https://doi.org/10.1016/j.ifacsc.2021.100156.

15. Shen, S., Xu, J., & Xia, Q. (2022). A fuzzy backstepping attitude control based on an extended state observer for a tilt-rotor UAV. *Aerospace, 9*(11), Article 724. https://doi.org/10.3390/aerospace9110724.

16. Castillo, P., Lozano, R., & Dzul, A. (2005). *Modelling and control of mini-flying machines.* Springer. https://doi.org/10.1007/1-84628-179-2.

17. Ghasemi, A., & Azimi, M. M. (2023). Adaptive fuzzy PID control based on nonlinear disturbance observer for a quadrotor helicopter. *Journal of Vibration and Control, 29*(7–8), 1554–1570. https://doi.org/10.1177/10775463221089734.

Дата першого надходження статті до видання: 02.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.03.2026

UDC 629.7.05 : 681.513 : 004.89

Oleh Sereda[1], Anatolii Revko[2]

[1]Postgraduate Student of the Department of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: seredaolegv@gmail.com. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0003-2270-0385
Google Scholar: https://scholar.google.com/citations?hl=ru&user=eP1b49cAAAAJ

[2]PhD 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. **Scopus Author ID:** 57188714850

SYNTHESIS AND OPTIMIZATION OF AN ADAPTIVE RECURSIVE DIGITAL CONTROLLER FOR THE QUADROTOR ROLL-ANGLE LOOP BASED ON A SUGENO-0 FUZZY SUPERVISOR

This paper addresses the synthesis and optimisation of an adaptive recursive digital controller for the roll-angle control loop of a quadcopter based on a Sugeno-0 fuzzy supervisor. The relevance of the study is determined by the growing need to improve the dynamic performance and energy efficiency of quadcopter flight-control systems equipped with brushless DC motors. In practical flight conditions, the external roll loop must provide fast and accurate response under variable manoeuvring regimes while remaining sufficiently simple for real-time embedded implementation. However, conventional controllers with fixed coefficients usually ensure acceptable control quality only within a limited operating range. An increase in response speed is commonly accompanied by larger overshoot, higher peak currents, and greater energy consumption. Therefore, the problem considered in the paper is the development of a control law capable of adapting its action intensity according to the current tracking conditions without excessive computational complexity.

The aim of the study is to develop, mathematically substantiate, and numerically investigate an adaptive recursive digital controller for the roll-angle loop of a quadcopter in which the Sugeno-0 supervisor directly scales the controller parameters of the FIR numerator, and to compare this approach with previously implemented control solutions in terms of transient quality and energy consumption. The proposed controller combines a fixed IIR denominator obtained by deadbeat synthesis with an adaptive FIR numerator whose coefficients are updated online at each sampling instant by fuzzy inference. In contrast to approaches based on intermediate parameter adaptation followed by online controller resynthesis, the proposed structure directly modifies the recursive controller coefficients, which simplifies practical implementation.

The research methods include the development of a physically grounded mathematical model of the BLDC motor and the one-axis roll platform of the quadcopter, continuous-to-discrete transformation of the plant equations, deadbeat synthesis of the denominator, pole assignment using the Ackermann approach, fuzzy supervision based on the normalized roll-angle error and its increment, and stability assessment by the frozen-coefficients method and the Jury criterion. The paper also provides physical justification of the Sugeno-0 rule tables and visualises the supervisor behaviour by means of output surfaces.

The results of comparative simulation for four controllers in nine test scenarios show that the proposed adaptive recursive digital controller provides an improved compromise between response speed, overshoot limitation, and energy expenditure. The obtained results confirm that direct fuzzy adaptation of the FIR numerator coefficients makes it possible to improve roll-angle control quality while preserving computational simplicity. It is concluded that the proposed controller is a promising solution for embedded quadcopter flight-control systems operating under variable conditions.

Keywords*: quadrotor; roll angle; BLDC motor; Sugeno-0; IIR/FIR controller; adaptive recursive digital controller; deadbeat synthesis; fuzzy supervisor; stability analysis; Jury criterion; Python simulation.*

Figs.: 16. Tables: 9. References: 17.

Середа О. В., Ревко А. С. Синтез та оптимізація адаптивного рекурсивного цифрового регулятора контуру кута крену квадрокоптера на основі нечіткого супервізора SUGENO-0. *Технічні науки та технології,* 2026. № 2(44). С. 420-443. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-420-443.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-444-458
УДК 621.3.032

Денис Валерійович Смоляр[1], Анатолій Леонідович Приступа[2]

[1]аспірант кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: smoliardenis@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0009-7207-669X

[2]кандидат 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

АНАЛІЗ МЕТОДІВ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

Актуальність дослідження зумовлено потребою підвищення ефективності та стабільності систем бездротової передачі енергії в умовах розвитку електротранспорту й автономних пристроїв. Мета статті – технічний аналіз індуктивного та ємнісного методів із кількісною оцінкою їх енергетичних характеристик. Досліджено вплив геометричного зазору на передану потужність і ККД, встановлено різну чутливість методів до зміни відстані, виявлено роль паразитних параметрів і режиму узгодження. Доведено, що індуктивні системи забезпечують вищу стабільність потужності, тоді як ємнісні ефективні лише при малих зазорах. Окреслено напрями подальших досліджень.

Ключові слова:*індуктивний зв'язок; ємнісний зв'язок; резонансний режим; електромагнітне поле; коефіцієнт корисної дії; паразитні параметри; електромагнітна сумісність (ЕМС); силова електроніка; реактивний опір, безконтактне живлення.*

Рис.: 4. Табл.: 4. Бібл.:26.

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена зростанням потреби у надійних та ефективних способах передачі електричної енергії без використання контактних з'єднань. Особливого значення це набуває в умовах розвитку електротранспорту, автономних пристроїв, сенсорних мереж та інтелектуальних енергетичних систем. Традиційні кабельні рішення обмежують мобільність обладнання, ускладнюють експлуатацію та знижують довговічність систем, що посилює інтерес до бездротових технологій як альтернативного підходу. Водночас існують технічні обмеження, пов'язані з енергоефективністю, електромагнітною сумісністю та безпекою, які потребують системного аналізу та узагальнення. У зв'язку з цим дослідження методів бездротової передачі енергії (БПЕ) є необхідним для обґрунтування напрямів їх удосконалення та практичного впровадження в сучасні енергетичні та технічні системи.

Постановка проблеми. Проблема БПЕ полягає у забезпеченні стабільної, енергоефективної та безпечної передачі електричної потужності без фізичних контактів за умов зростання вимог до мобільності, автономності та інтегрованості технічних систем. Попри активний розвиток індуктивних, резонансних і мікрохвильових технологій бездротової передачі енергії, залишаються невирішеними питання підвищення коефіцієнта корисної дії бездротових систем. Особливо актуальними є проблеми мінімізації втрат, забезпечення електромагнітної сумісності та відповідності нормативним вимогам.

Зазначена проблематика пов'язана з важливими науковими завданнями електротехніки, електромагнітних процесів і силової електроніки. Водночас вона має прикладне значення для модернізації енергетичної інфраструктури, розвитку електромобільності та створення автономних інтелектуальних пристроїв. Розв'язання окресленої проблеми сприятиме підвищенню надійності енергопостачання, зниженню експлуатаційних витрат і формуванню технологічних передумов для інтеграції бездротових рішень у сучасні інженерні системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд сучасних досліджень у сфері БПЕ свідчить про поетапне формування цілісної наукової концепції цієї технології - від узагальнення фізичних принципів до розроблення спеціалізованих прикладних систем. У базових оглядових працях М. Б. Сідіку (M. B. Sidiku) та співавторів БПЕ розглядається як сукупність індуктивних, ємнісних та радіочастотних механізмів передачі потужності

© Д. В. Смоляр, А. Л. Приступа, 2026

без фізичного контакту між джерелом і приймачем, із визначенням їхніх технічних переваг і обмежень [1]. Комплексну систематизацію методів, сфер застосування та технологічних викликів подано М. М. Рахманом (M. M. Rahman) та співавторами, які акцентують увагу на проблемах масштабування, електромагнітної сумісності та втрат енергії [2]. Порівняльну оцінку ефективності різних архітектур здійснюють К. Детка (K. Detka) та К. Гурецькі (K. Górecki), пропонуючи критерії техніко-економічного аналізу БПЕ-систем [3]. О. Окойєїгбо (O. Okoyeigbo) та співавтори розглядають БПЕ у контексті формування сталих енергетичних систем майбутнього, підкреслюючи необхідність підвищення коефіцієнта корисної дії та зниження втрат [4].

Поглиблення інженерного виміру досліджень пов’язане з розвитком індуктивної передачі енергії та магнітно-резонансних систем. М. Рехман (M. Rehman) та співавтори детально аналізують компенсаційні топології, параметри котушок і їх вплив на коефіцієнт зв’язку та ефективність системи [5]. Г. Палані (G. Palani) та У. Сенгамалай (U. Sengamalai) досліджують індуктивні системи заряджання електромобілів, визначаючи проблеми теплових втрат і електромагнітної сумісності [6]. Парадигмальний потенціал резонансної передачі енергії для енергетичних екосистем нового покоління обґрунтовують С. Ю. Р. Хуї (S. Y. R. Hui) та співавтори [7]. Ємнісну передачу енергії систематизують С. Леклуйс (C. Lecluyse) та співавтори, аналізуючи топології перетворювачів і питання електробезпеки [8].

Розвиток прикладних рішень відображено у працях, орієнтованих на інтеграцію БПЕ у транспортні та спеціалізовані технічні системи. К. Ї (K. Yi) досліджує використання ємнісної технології передачі із квазірезонансним перетворювачем у системах електромобільного заряджання, демонструючи можливість інтеграції передавальних електродів у конструктивні елементи транспортних засобів [9]. З. Ванг (Z. Wang) та співавтори здійснюють системний огляд ємнісних систем, оцінюючи їх потенціал для середньопотужних застосувань [10]. І.М. Елкафраві (I. M. Elkafrawi) та співавтори узагальнюють принципи побудови універсальних бездротових систем живлення, підкреслюючи питання масштабованості та стабільності передачі [11]. М. Хаеринія (M. Haerinia) та Р. Шадід (R. Shadid) аналізують застосування БПЕ для медичних імплантів, приділяючи увагу біосумісності, мініатюризації та обмеженням питомої потужності [12].

Інтеграційний вимір розвитку БПЕ проявляється у поєднанні функцій енергопостачання та комунікації. Х. Ян (H. Yan) та співавтори досліджують архітектуру системи БПЕ з використанням безпілотних літальних апаратів, враховуючи енергоспоживання платформи та оптимізацію режимів підзаряджання [13]. Дж. Хуан (J. Huang) та співавтори розглядають синергію БПЕ і технологій енергозбирання (Energy Harvesting, EH) у бездротових сенсорних мережах [14]. Б. Клеркс (B. Clerckx) та співавтори обґрунтовують перспективи одночасної передачі інформації та енергії як ключового елемента мереж нового покоління [15].

Прикладний вимір досліджень БПЕ посилюється роботами, що містять конкретні чисельні та апаратні результати для електротранспорту. Зокрема, В. Сарі (V. Sari) та співавтори демонструють проєктування й реалізацію системи бездротової передачі енергії для електромобілів із аналізом топологій компенсації та параметрів котушок, що є релевантним для узгодження моделі та експериментальної поведінки системи [16]. Розширений системний погляд на БПЕ як інтегровану технологію «схеми–системи–стандарти–використання» подають Й. ван Малдерс (J. Van Mulders) та співавтори, узагальнюючи типові архітектури, контури перетворення, вимоги електромагнітної сумісності та прикладні сценарії застосування [17]. У частині спеціалізованих платформ О. В. Хардан (S. S. Hardan), Х. А. Хаїрік (H. A. Hairik) та Т. Рабее’Х (T. Rabee’H) пропонують схемно-орієнтоване моделювання типової індуктивної передачі енергії в MATLAB/Simulink, що є методичною основою для відтворюваної оцінки впливу коефіцієнта зв’язку, навантаження та режимів компенсації на потужність і ККД [18].

Подальша деталізація БПЕ-моделей у транспортних застосуваннях відображена у роботах, орієнтованих на топології компенсації та проблематику неспіввісності. Т. А. Шикдар (T. A. Shikdar) та співавтори аналізують однофазні й трифазні сценарії бездротової зарядки електромобілів у MATLAB/Simulink, порівнюючи схеми та режими, що важливо для коректної інтерпретації «ідеальних» і «реальних» режимів узгодження [19]. С. Вікар (S. Viqar) та співавтори доповнюють цей напрям комплексним дослідженням впливу неспіввісності й компенсаційних топологій із поєднанням моделювання та апаратної валідації, що прямо узгоджується з потребою підтвердження розрахункового експерименту експериментальними даними [20]. Окремий клас сучасних праць становлять публікації, де БПЕ розглядається як елемент ширших технологічних екосистем: Х. Хе (X. He) та співавтори обґрунтовують архітектуру спільної передачі енергії та інформації на основі магнітно-зв'язаних резонаторів, що розширює інтерпретацію БПЕ від «живлення» до інтегрованих інфокомунікаційних рішень [21]. Систематизований аналіз актуальних викликів і тенденцій БПЕ подано З. Лю (Z. Liu) та співавторами, де акцентовано увагу на компромісах між відстанню, потужністю, ККД, ЕМС та безпекою, що є критичним для коректного вибору методу в прикладних системах [22].

Важливий прикладний напрям пов'язаний із застосуванням БПЕ у спеціалізованих мобільних платформах. Я. Ян (Y. Yan), В. Ші (W. Shi) та Х. Чжан (X. Zhang) розглядають проєктування бездротової передачі енергії для безпілотних систем, оптимізуючи конструкцію котушок з огляду на енергетичні та масогабаритні обмеження, що демонструє значущість геометрії зв'язку та параметрів поля в реальних умовах [23].

Окремо слід підкреслити стандартизаційний контекст, який визначає практичні межі застосування БПЕ та вимоги до сумісності пристроїв. Для малопотужних пристроїв базовим є стандарт Qi консорціуму Wireless Power Consortium, який регламентує класи потужності, робочі частоти та протоколи керування [24]. Для резонансних систем важливими є специфікації AirFuel Resonant, що орієнтовані на більші зазори передачі та підвищену гнучкість позиціювання [25]. У сфері електротранспорту ключовим документом є SAE J2954, який нормує параметри індуктивної зарядки, вимоги до узгодження/вирівнювання котушок і діапазони робочих режимів [26]. Зазначені стандарти формують інженерні обмеження (частота, ЕМС, безпека, сумісність), які мають бути враховані під час інтерпретації результатів порівняльного аналізу індуктивних та ємнісних БПЕ-систем.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. У наявних дослідженнях структурні схеми систем бездротової передачі енергії широко представлені та описують загальну архітектуру БПЕ-систем. Водночас у наукових публікаціях відсутній уніфікований підхід до використання таких моделей для коректного порівняльного аналізу індуктивних і ємнісних систем у тотожних умовах. Недостатньо кількісно узагальнено вплив геометричного зазору на передану потужність і коефіцієнт корисної дії, а також комплексну дію паразитних параметрів, електромагнітної сумісності та змін навантаження, що ускладнює обґрунтований вибір методу для практичного застосування. У роботі використано узагальнену структурну модель БПЕ-системи як методичну основу для порівняльного аналізу індуктивного та ємнісного способів передачі енергії. Виконано розрахункову оцінку їх енергетичних характеристик у однакових умовах та кількісно встановлено різну чутливість систем до зміни відстані між передавальними елементами. Систематизовано вплив втрат і режимів узгодження та сформульовано практичні рекомендації, що розширює аналітичні можливості інженерного проєктування БПЕ-систем.

Мета і завдання статті. Мета статті полягає у технічному аналізі методів БПЕ з визначенням їх фізичних принципів, схемних особливостей та енергетичних характеристик і з обґрунтуванням доцільності застосування індуктивних та ємнісних систем у сучасних технічних пристроях.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

1. Розкрити фізичні основи БПЕ та сформувати узагальнену структурну модель системи з визначенням ключових параметрів процесу передачі потужності.

2. Проаналізувати індуктивний і ємнісний методи та здійснити їх порівняльну оцінку за показниками потужності, відстані передачі, енергетичної ефективності та експлуатаційних обмежень.

3. Виявити науково-технічні обмеження функціонування систем і обґрунтувати рекомендації щодо підвищення їх ефективності та надійності.

Виклад основного матеріалу. БПЕ базується на використанні електромагнітного поля для передавання енергії від джерела до навантаження без фізичного електричного контакту. Ефективність такого процесу визначається робочою частотою, параметрами передавальних елементів та умовами імпедансного узгодження системи. Передача енергії незалежно від конкретного методу може бути представлена узагальненою структурною моделлю, що відображає послідовність перетворення та передавання потужності між функціональними вузлами системи (рис. 1).



Рис. 1. Узагальнена структурна схема БПЕ

Джерело: адаптовано за [3; 8].

На рис. 1 відображено типову структуру БПЕ-системи: високочастотне джерело живлення, передавальний елемент, приймальний елемент, випрямляч та навантаження. Передавальний і приймальний елементи формують електромагнітний канал передачі енергії. Для індуктивного методу вони реалізуються у вигляді котушок індуктивності, тоді як у ємнісних системах використовуються провідні пластини або електроди, між якими формується змінне електричне поле.

Ефективність роботи системи визначається умовами резонансної взаємодії між реактивними елементами передавального та приймального контурів.

Резонансна частота системи визначається співвідношенням:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

де L - індуктивність передавального або приймального контуру, C - еквівалентна ємність системи.

У резонансному режимі реактивні складові взаємно компенсуються, що мінімізує циркуляцію реактивної потужності та підвищує коефіцієнт корисної дії. Відхилення від резонансної частоти призводить до зростання втрат і зниження переданої потужності, що особливо критично при зміні відстані між передавальним і приймальним елементами або при варіації навантаження.

Ключові параметри, що визначають технічні можливості системи БПЕ узагальнені в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні параметри, що впливають на ефективність БПЕ

Параметр	Фізичний зміст	Вплив на систему
Частота	Робочий діапазон генерації	Визначає розміри елементів та рівень втрат
Індуктивність / Ємність	Реактивні параметри контуру	Формують резонансний режим
Відстань між елементами	Геометричний фактор	Знижуєефективність передачі
Опір навантаження	Параметр споживання енергії	Визначає режим відбору потужності та впливає на передану потужність і ККД
Паразитні параметри	Небажані втрати	Знижують стабільність системи

Джерело: сформовано автором на основі [3; 5; 8; 15].

Ці параметри формують системну основу проєктування бездротових енергетичних модулів і визначають їх експлуатаційну придатність у конкретних технічних умовах. Робоча частота впливає не лише на габарити передавальних елементів, але й на рівень активних і діелектричних втрат, що безпосередньо відображається на тепловому режимі системи. У високопотужних індуктивних установках, зокрема у стаціонарних зарядних модулях для електротранспорту, вибір частоти обмежується компромісом між зменшенням розмірів котушок і допустимими електромагнітними випромінюваннями [3]. У малопотужних ємнісних системах, наприклад у зарядних пристроях для сенсорних вузлів або медичних імплантів, частотний діапазон підбирається з урахуванням біологічної безпеки та стабільності параметрів при зміні навколишнього середовища. Індуктивність та ємність формують резонансний режим роботи, який у практичних системах підтримується за допомогою компенсаційних контурів. У комерційних бездротових зарядних станціях застосовуються схеми автоматичного підлаштування частоти або імпедансного узгодження, що дозволяє зберігати високий коефіцієнт корисної дії навіть при незначному зміщенні приймального елемента. Відстань між передавальним і приймальним елементами є критичним геометричним фактором: її збільшення знижує коефіцієнт зв'язку і призводить до зростання реактивної циркуляції потужності, що практично означає зменшення переданої енергії або необхідність підвищення струмів у передавальному контурі. Опір навантаження визначає режим відбору потужності та впливає на стабільність роботи інвертора. У сучасних системах керування застосовуються алгоритми адаптивного регулювання, які змінюють параметри збудження залежно від споживання енергії [5]. Паразитні елементи - активний опір провідників, втрати в магнітопроводах, паразитні ємності - у реальних умовах формують додаткові втрати та можуть спричиняти зниження ефективності при високих частотах. Саме тому в промислових рішеннях використовуються матеріали з малими втратами, оптимізована геометрія передавальних структур та системи контролю температури. Так, практична ефективність БПЕ визначається не окремим параметром, а їх комплексною взаємодією, що потребує інженерного балансу між електромагнітними, тепловими та експлуатаційними обмеженнями.

Існуючі методи БПЕ можна умовно поділити на системи ближньої та дальньої дії. До методів ближньої зони належать індуктивні, резонансно-індуктивні та ємнісні системи, що базуються на реактивному електромагнітному зв'язку. До методів дальньої дії відносять мікрохвильову та лазерну передачу енергії, які використовують електромагнітне випромінювання у просторі та орієнтовані переважно на великі відстані. У межах даного дослідження основну увагу зосереджено на індуктивному та ємнісному методах як найбільш технологічно реалізованих у сучасних технічних системах ближньої дії. Узагальнену класифікацію основних методів бездротової передачі енергії подано на рис. 2.

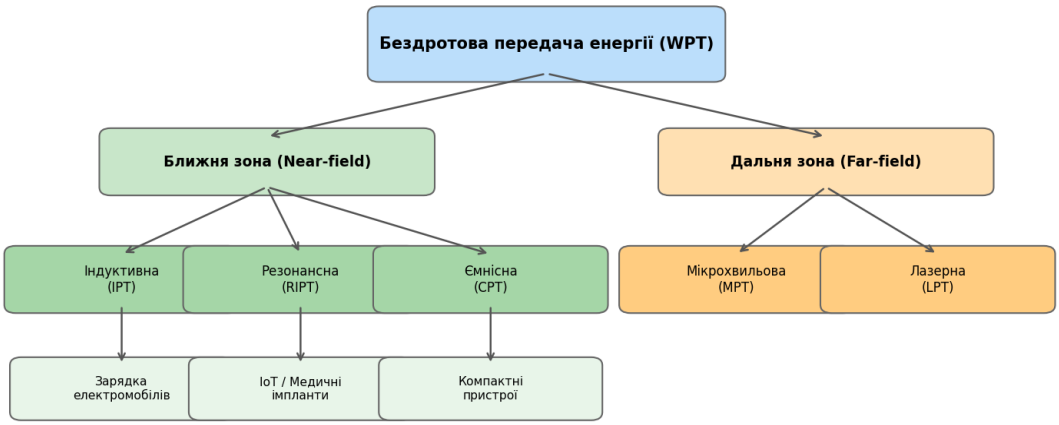


Рис. 2. Класифікація методів БПЕ (ієрархічна схема)

Джерело: сформовано автором на основі [2; 3; 17]

Індуктивний метод ґрунтується на передачі енергії через змінне магнітне поле між двома просторово рознесеними котушками. Передавальний контур формує змінний магнітний потік, який зчіплюється з приймальною котушкою та індукує електрорушійну силу відповідно до закону електромагнітної індукції. Конструктивна реалізація передбачає використання плоских або соленоїдних котушок, часто з феритовими елементами для концентрації магнітного потоку та зменшення втрат [8]. У більшості сучасних систем застосовується резонансний режим із компенсаційними конденсаторами, що дозволяє мінімізувати реактивну циркуляцію потужності.

У практичних індуктивних системах бездротової передачі енергії важливу роль відіграє вибір топології компенсації реактивних елементів, яка визначає режим узгодження передавального і приймального контурів. У сучасній літературі з індуктивної передачі енергії (Inductive Power Transfer, IPT) найпоширенішими є чотири базові топології компенсації: послідовно-послідовна (Series–Series, SS), послідовно–паралельна (Series–Parallel, SP), параллельно-послідовна (Parallel–Series, PS) та паралельно–паралельна (Parallel–Parallel, PP). Кожна з них характеризується різними умовами живлення, чутливістю до зміщення котушок і рівнем досяжного коефіцієнта корисної дії системи.

Для підвищення ефективності систем IPT широко застосовуються резонансні контури та різні топології компенсації (SS, SP, PS, PP). Ефективність таких систем значною мірою визначається добротністю індуктивних котушок, що характеризує співвідношення енергії, накопиченої в магнітному полі, до втрат у провіднику.

Добротність котушки визначається за формулою

$$Q = \frac{wL}{R} \tag{2}$$

де ω - кутова частота; L - індуктивність котушки; R - активний опір провідника.

Добротність Q безпосередньо впливає на ефективність резонансного режиму: при більш високих значеннях Q система стає менш чутливою до відхилень від резонансної частоти.

Основні характеристики топологій компенсації IPT-систем узагальнено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Основні топології компенсації IPT-систем

Топологія	Тип джерела	Чутливість до зміщення	Типовий ККД	Основні переваги
SS	Напруга	Середня	88–92 %	Проста реалізація, стабільна робота
SP	Напруга	Підвищена	82–88 %	Широкий діапазон навантажень
PS	Струм	Середня	84–90 %	Стабільна вихідна потужність
PP	Струм	Низька	78–84 %	Стійкість до відключення навантаження

Джерело: сформовано автором на основі [5; 17].

Наведене порівняння показує, що вибір топології компенсації суттєво впливає на стабільність передачі енергії та ефективність роботи системи. У практичних реалізаціях індуктивних систем бездротового живлення найбільш поширеною є топологія SS, яка характеризується простотою схемної реалізації та стабільними параметрами роботи. Топології SP і PS дозволяють забезпечити ширший діапазон робочих режимів і застосовуються у системах із змінним навантаженням. Топологія PP використовується рідше, проте відзначається підвищеною стійкістю до зміни умов роботи та навантаження.

Коефіцієнт ефективності магнітного зв’язку визначається співвідношенням

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \tag{3}$$

де M – взаємна індуктивність, L_1 і L_2 – індуктивності передавального та приймального контурів. Зменшення коефіцієнта зв’язку при збільшенні відстані або зміщенні котушок призводить до падіння переданої потужності та зростання втрат. Практично це означає,

що індуктивні системи демонструють найвищу ефективність у межах малих і середніх відстаней. Саме тому вони широко застосовуються у бездротових зарядних станціях електромобілів, мобільній електроніці, автономних робототехнічних системах та промислових транспортних платформах.

Передана потужність у резонансній індуктивній системі може бути оцінена аналітичним виразом [5]:

$$P_{out} = \frac{(\omega M)^2 V_S{}^2 R_L}{(R_1(R_2+R_{L)})+\omega^2 M^2)^2} \quad (4)$$

де Vs – напруга джерела, R_1 та R_2 – активні опори передавального і приймального контурів, R_L – опір навантаження, M – взаємна індуктивність між котушками, ω – кутова частота.

Енергетична ефективність системи визначається співвідношенням:

$$\eta = \frac{R_L}{R_L+R_2} * \frac{\omega^2 M^2}{R_1(R_2+R_{L)})+\omega^2 M^2} \quad (5)$$

Наведені залежності демонструють, що передана потужність і коефіцієнт корисної дії безпосередньо залежать від коефіцієнта зв'язку між котушками, параметрів контурів та умов узгодження навантаження.

Ємнісний метод базується на передачі енергії через змінне електричне поле між двома провідними пластинами або електродами [10]. Передавальний елемент створює високочастотну різницю потенціалів, унаслідок чого між електродами формується змінне електричне поле, яке забезпечує передачу енергії до приймального контуру. Конструктивно система реалізується у вигляді паралельних або співвісних електродів з урахуванням екранування та мінімізації паразитних ємностей. У спрощених еквівалентних схемах ємнісний зв'язок описують через реактивний опір:

$$X_C = \frac{1}{wC} \quad (6)$$

де ω - кутова частота, C - еквівалентна ємність між електродами.

Водночас така еквівалентна модель має наближений характер. У реальних системах розподіл електричного поля, густина струмів зміщення та передана потужність визначаються розв'язанням системи рівнянь Максвела:

$$\begin{cases} \nabla \cdot D = \rho \\ \nabla \cdot B = 0 \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \end{cases} \quad (7)$$

де E – напруженість електричного поля, H – напруженість магнітного поля, D –електрична індукція, B – магнітна індукція, ρ – густина електричного заряду, J – густина струму.

На основі цих рівнянь з урахуванням геометрії електродів, властивостей діелектричного середовища та граничних умов визначаються параметри електромагнітного поля і передана потужність у ємнісних системах БПЕ. У практичних інженерних розрахунках для спрощення аналізу часто застосовують еквівалентні електричні схеми, однак енергетичні характеристики системи залежать від сукупності факторів: робочої частоти, площі та взаємного розташування електродів, діелектричної проникності середовища, паразитних параметрів і режиму узгодження з навантаженням. Зі збільшенням частоти може зменшуватися реактивний опір і зростати струм зміщення, проте реальна передана потужність визначається складною взаємодією електромагнітних, діелектричних і резонансних процесів у системі. Крім того, зі зростанням частоти можуть збільшуватися діелектричні втрати та підвищуються вимоги до електромагнітної сумісності й електробезпеки. Ефективність ємнісної передачі енергії значною мірою визначається ємністю між електродами, яка залежить від їх геометричних параметрів і властивостей діелектричного середовища.

Ємність плоских паралельних електродів визначається за формулою:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \mathrm{A}}{\mathrm{d}} \quad (8)$$

де A - ефективна площа електродів; d - відстань між електродами; ε_0 - електрична стала; ε_r - відносна діелектрична проникність середовища.

З формули видно, що зі збільшенням відстані між електродами d ємність швидко зменшується, що призводить до зниження ефективності передачі енергії у ємнісних системах. Основні технічні характеристики методів узагальнено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Порівняльні характеристики індуктивного та ємнісного методів БПЕ

Характеристика	Індуктивний метод	Ємнісний метод
Тип взаємодії	Магнітне поле	Електричне поле
Конструктивний елемент	Котушки, феритові елементи	Провідні пластини
Діапазон потужності	Середній – високий	Низький – середній
Робоча частота	Десятки – сотні кГц	Сотні кГц – МГц
Чутливість до зміщення	Помірна	Висока
Основні втрати	Омічні та вихрові	Діелектричні та витоки

Джерело: сформовано автором на основі [3; 5; 8; 10].

Порівняльний аналіз свідчить, що індуктивні системи забезпечують більшу стабільність передачі потужності за рахунок кращої концентрації магнітного потоку та меншої чутливості до змін навколишнього середовища. У практичних рішеннях для електротранспорту застосовуються системи автоматичного узгодження та компенсації, що дозволяють підтримувати високий коефіцієнт корисної дії навіть при частковому зміщенні котушок [15]. Ємнісні системи відзначаються відносно простою конструктивною реалізацією та можливістю інтеграції передавальних електродів у тонкі або компактні конструктивні елементи пристроїв. Проте їх ефективність суттєво залежить від стабільності діелектричних умов і точності розташування електродів. Отже, вибір методу БПЕ визначається комплексом факторів: необхідним рівнем потужності, допустимою відстанню передачі, конструктивними обмеженнями та вимогами до електромагнітної сумісності. Індуктивні системи доцільні для середніх і високих рівнів потужності у стаціонарних або керованих умовах, тоді як ємнісні методи є перспективними для компактних та малопотужних пристроїв із жорсткими обмеженнями за габаритами.

З метою кількісної порівняльної оцінки індуктивного та ємнісного методів БПЕ виконано чисельне моделювання процесу передачі енергії для типового сценарію бездротової зарядки малопотужного пристрою номінальною потужністю 100 Вт. Метою моделювання є визначення впливу відстані між передавальним і приймальним елементами на передану потужність та енергетичну ефективність системи за однакових умов живлення і навантаження.

Моделювання електромагнітних процесів виконано у середовищі COMSOL Multiphysics із використанням модуля AC/DC (Magnetic Fields та Electric Currents) на основі рівнянь Максвела у квазістаціонарному наближенні. Для індуктивної системи застосовано еквівалентну резонансну модель двох зв’язаних контурів із взаємною індуктивністю, а передана потужність визначалась через коефіцієнт зв’язку k між котушками та умови резонансного узгодження. Для ємнісної системи використано модель двох електродів, між якими формується міжелектродна ємність, що залежить від геометрії та відстані між пластинами.

У моделі прийнято такі параметри системи. Джерело постійної напруги з інвертором формує гармонічний сигнал із частотою 100 кГц. Навантаження моделюється активним опором 10 Ом. Індуктивна система складається з двох співвісних плоских котушок діаметром 100 мм, кількістю 20 витків мідного провідника (діаметр проводу 1 мм) та індуктивністю приблизно 50 мкГн кожна; осердя відсутнє (повітряний магнітний зазор). Ємнісна система реалізована у вигляді двох паралельних алюмінієвих електродів площею 0,01 м² із повітряним діелектриком ($\varepsilon_r \approx 1$).

Відстань між передавальними елементами змінювалась у діапазоні 5–30 мм. Для кожного значення зазору параметри резонансного контуру коригувалися з метою підтримання режиму узгодження. У індуктивній системі зміна відстані враховувалась через зміну коефіцієнта магнітного зв'язку k, тоді як у ємнісній системі варіювалася міжелектродна ємність, що змінює реактивний опір і струм у навантаженні.

Вхідна потужність визначалась як добуток миттєвих значень напруги та струму інвертора, а вихідна - як потужність на активному навантаженні. Енергетична ефективність системи обчислювалась як відношення вихідної потужності до вхідної. Результати моделювання наведено у табл. 4.

Таблиця 4 – Результати моделювання індуктивного та ємнісного методів БПЕ (потужність 100 Вт, f = 100 кГц)

Відстань, мм	Потужність індуктивна, Вт	ККД індуктивний, %	Потужність ємнісна, Вт	ККД ємнісний, %
5	95	93	88	90
10	90	91	70	82
15	82	87	52	70
20	70	80	35	55
25	55	72	20	40
30	40	60	10	25

Джерело: власна розробка автора

Результати моделювання демонструють різний характер зміни переданої потужності та енергетичної ефективності при збільшенні відстані між передавальними елементами. Індуктивна система характеризується поступовим зменшенням потужності, що пов'язано зі зниженням коефіцієнта магнітного зв'язку між котушками. Навіть при збільшенні зазору до 30 мм система зберігає значну частку переданої потужності, що свідчить про відносну стійкість індуктивного зв'язку до зміни відстані. Ємнісна система демонструє більш різке падіння потужності, що пояснюється зменшенням міжелектродної ємності при збільшенні зазору. У результаті зростає реактивний опір і зменшується струм у навантаженні, що призводить до істотного зниження енергетичної ефективності. Уже при 20 мм передана потужність зменшується більш ніж удвічі, а ККД знижується до 55 %, що свідчить про високу чутливість ємнісної передачі до геометричних параметрів.

У результаті дослідження встановлено, що індуктивний метод забезпечує більш стабільну передачу енергії при змінному зазорі та є доцільним для застосувань із середніми й високими рівнями потужності, зокрема в зарядних системах електротранспорту або промислових платформах. Ємнісний метод ефективний лише в умовах малих відстаней і стабільного просторового положення електродів, що обмежує його застосування переважно малопотужними компактними пристроями.

Для пояснення методики моделювання та відтворюваності розрахунків використано еквівалентну електричну модель системи бездротової передачі енергії, яка відображає взаємодію передавального та приймального резонансних контурів. Така модель дозволяє формалізувати процес передачі енергії через параметри індуктивного або ємнісного зв'язку між елементами системи (рис. 3).

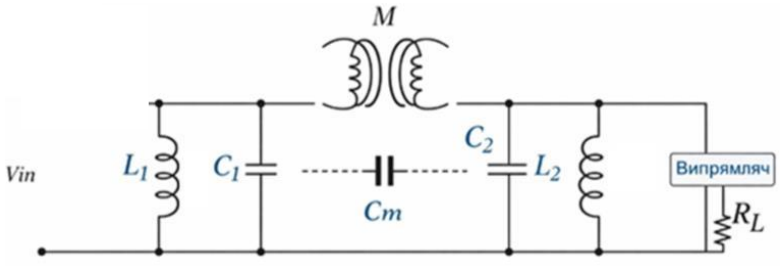


Рис. 3. Еквівалентна електрична схема системи бездротової передачі енергії
Джерело: власна розробка автора.

де L_1 – індуктивність передавального контуру; L_2 – індуктивність приймального контуру; C_1,C_2 – компенсаційні конденсатори; M – заємна індуктивність між котушками; C_m – міжелектродна ємність у ємнісній системі передачі; R_L – опір навантаження.

Представлена схема відображає узагальнену резонансну модель БПЕ-системи. Передача енергії між передавальним і приймальним контурами відбувається через параметр зв'язку, який у випадку індуктивної передачі визначається взаємною індуктивністю M, а у ємнісній системі - міжелектродною ємністю C_m. Зміна відстані між передавальними елементами призводить до зміни цих параметрів, що безпосередньо впливає на передану потужність і енергетичну ефективність системи.

Результати моделювання (табл. 4) показують, що ефективність IPT-системи суттєво залежить від взаємного розташування котушок та параметрів резонансної компенсації. Поєднання цих характеристик в одному графіку дозволяє комплексно оцінити ефективність функціонування індуктивних та ємнісних методів передачі енергії в різних режимах роботи та при зміні відстані між передавальними структурами (рис. 4).

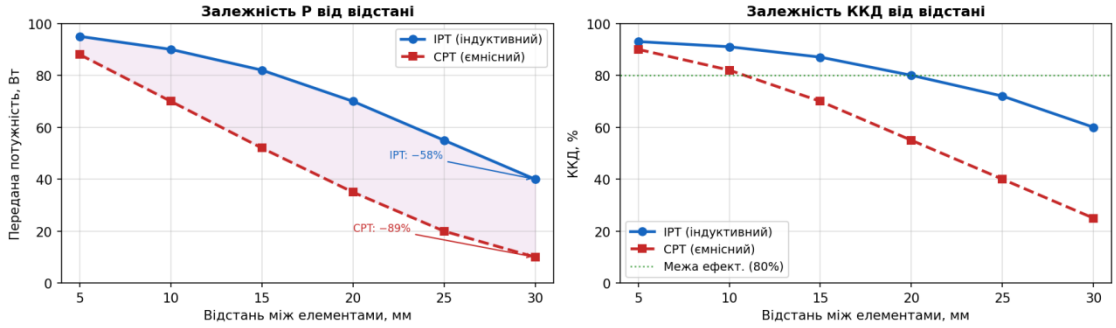


Рис. 4. Порівняльні залежності переданої потужності P(d) та коефіцієнта корисної дії η(d) від відстані для індуктивних та ємнісних систем передачі енергії
Джерело: сформовано автором на основі [5; 17]

Експериментальні результати моделювання демонструють, що індуктивна передача енергії (IPT) характеризується вищим рівнем переданої потужності та коефіцієнта корисної дії на малих і середніх відстанях. Водночас зі збільшенням відстані між передавальними елементами ефективність IPT систем швидко зменшується. Для ємнісного методу передачі енергії (CPT) характерним є нижчий рівень переданої потужності, однак відносно стабільніший характер зміни параметрів при збільшенні відстані. Це свідчить про те, що IPT та CPT методи доцільно розглядати як взаємодоповнюючі технології бездротової передачі енергії, придатні для різних діапазонів відстаней та рівнів потужності.

Отримані результати моделювання узгоджуються з результатами сучасних досліджень у сфері бездротової передачі енергії. Зокрема, у роботі B. Capi (V. Sari) та співавторів [16] показано, що ефективність індуктивних систем передачі енергії зменшується зі збільшенням відстані між передавальними котушками, що відповідає тенденціям, отриманим у даному дослідженні. Подібні залежності переданої потужності та коефіцієнта корисної дії для індуктивних і ємнісних систем також наведено у роботі C. Вікар (S. Viqar) та співавторів [20]. Це підтверджує адекватність використаної моделі COMSOL та коректність отриманих результатів чисельного моделювання.

Індуктивний метод характеризується більш плавним зниженням як переданої потужності, так і енергетичної ефективності при збільшенні відстані, що свідчить про його більшу стійкість до зміни просторового положення елементів. Ємнісний метод, навпаки, демонструє різке падіння енергетичних показників при збільшенні зазору, що обмежує його застосування умовами малих відстаней і стабільної геометрії. Отже, проведений розрахунковий експеримент та його графічна інтерпретація дозволили встановити, що ін-

дуктивний метод є більш придатним для систем середньої потужності з допустимим зміщенням елементів, тоді як ємнісний метод доцільний у компактних малопотужних застосуваннях із жорстко фіксованим положенням передавальних структур.

Проведений розрахунковий аналіз засвідчив, що основною науково-технічною проблемою бездротових систем передачі енергії є зниження переданої потужності та ККД зі збільшенням відстані між елементами. В індуктивних системах це пов'язано зі зменшенням коефіцієнта магнітного зв'язку та зростанням реактивних і омічних втрат, що обмежує ефективність при зміщенні котушок. У ємнісних системах критичним чинником є зменшення міжелектродної ємності та зростання реактивного опору, що призводить до різкого падіння струму й потужності навіть при незначному збільшенні зазору [9]. Суттєвий вплив мають паразитні параметри - активний опір провідників, вихрові струми, паразитні ємності та діелектричні втрати, які знижують добротність контурів і порушують умови резонансного узгодження. Додаткові обмеження формують вимоги електромагнітної сумісності та електробезпеки, оскільки високочастотні поля можуть впливати на навколишні пристрої або вимагати посиленого екранування. Нестабільність навантаження змінює умови узгодження та викликає відхилення від резонансного режиму, що спричиняє коливання потужності й зниження ефективності.

Підвищення ефективності та надійності індуктивних систем досягається насамперед оптимізацією геометрії котушок і стабілізацією магнітного зв'язку: доцільно застосовувати плоскі котушки з узгодженими розмірами передавального та приймального елементів, мінімізувати робочий зазор, передбачати конструктивне центрування для зменшення втрат при зміщенні та використовувати феритові екрани для локалізації поля й зниження розсіювання. Енергетичну ефективність варто забезпечувати роботою в резонансному режимі з коректно підібраними компенсаційними елементами та впровадженням адаптивного керування частотою або імпедансом, що підтримує узгодження при зміні навантаження і зменшує реактивну циркуляцію потужності.

Для ємнісних систем ключовими є стабільність міжелектродного зазору та контроль діелектричних втрат: рекомендовано збільшувати ефективну площу електродів у межах конструктивних обмежень, забезпечувати жорстку фіксацію відстані, застосовувати діелектрики зі стабільними параметрами та електростатичне екранування для зменшення витоків і впливу середовища. Частотний режим слід підбирати так, щоб зменшити реактивний опір без надмірного зростання втрат і вимог до ізоляції, а узгодження навантаження реалізовувати через керовані перетворювачі та прості алгоритми стабілізації вихідної потужності. Загалом практична оптимізація має бути спрямована на зменшення паразитних втрат, підтримання резонансних умов та забезпечення стійкого узгодження в усьому робочому діапазоні відстаней і навантажень.

Висновки. У роботі виконано цілісний технічний аналіз методів БПЕ та показано, що їх ефективність визначається насамперед характером електромагнітного зв'язку і чутливістю до геометричного зазору. Проведений розрахунковий експеримент підтвердив різну динаміку деградації енергетичних показників: індуктивні системи зберігають відносну стабільність потужності при зміні відстані, тоді як ємнісні демонструють різке нелінійне зниження переданої енергії через зменшення міжелектродної ємності та зростання реактивного опору. Отримані результати дозволили уточнити межі доцільного практичного застосування кожного методу. Чисельне моделювання показало, що при збільшенні відстані з 5 до 30 мм передана потужність IPT-системи зменшується приблизно на 58 %, тоді як для CPT-системи – майже на 89 %. Встановлено також, що паразитні параметри та відхилення від резонансного режиму істотно впливають на ККД і вимагають адаптивного узгодження. Наукова цінність роботи полягає у кількісному підтвердженні цих закономірностей на єдиній модельній основі, що забезпечує коректне порівняння методів без прив'язки до конкретної конструкції. Практична значущість результатів проявляється у м

Список використаних джерел:

1. Sidiku, M. B., Eronu, E. M., & Ashigwuike, E. C. (2020). A review on wireless power transfer: Concepts, implementations, challenges, and mitigation scheme. *Nigerian Journal of Technology, 39*(4), 1206–1215. https://doi.org/10.4314/njt.v39i4.29

2. Rahman, M. M., Shanto, M. S. I., Sarker, N., Rani, T., & Paul, L. C. (2024). A comprehensive review of wireless power transfer methods, applications, and challenges. *Engineering Reports*. https://doi.org/10.1002/eng2.12951

3. Detka, K., & Górecki, K. (2022). Wireless power transfer—a review. *Energies, 15*(19), 7236. https://doi.org/10.3390/en15197236

4. Okoyeigbo, O., Olajube, A. A., Shobayo, O., Aligbe, A., & Ibhaze, A. E. (2021). Wireless power transfer: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 655*(1), 012032. https://doi.org/10.1088/1755-1315/655/1/012032

5. Rehman, M., Mirsaeidi, S., Nor, N. M., Koondhar, M. A., Zainuri, M. A. A. M., Alaas, Z. M., & Ahmed, M. M. R. (2023). A review of inductive power transfer: Emphasis on performance parameters, compensation topologies and coil design aspects. *IEEE Access, 11*, 144978–145010. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3344041

6. Geetha, P., & Usha, S. (2022). A critical review on inductive wireless power transfer charging system in electric vehicle. *Energy Storage*. https://doi.org/10.1002/est2.407

7. Hui, S.-Y. R., Yang, Y., & Zhang, C. (2023). Wireless power transfer: A paradigm shift for the next generation. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 1. https://doi.org/10.1109/jestpe.2023.3237792

8. Lecluyse, C., Minnaert, B., & Kleemann, M. (2021). A review of the current state of technology of capacitive wireless power transfer. *Energies, 14*(18), 5862. https://doi.org/10.3390/en14185862

9. Yi, K. (2020). Capacitive coupling wireless power transfer with quasi-llc resonant converter using electric vehicles' windows. *Electronics, 9*(4), 676. https://doi.org/10.3390/electronics9040676

10. Wang, Z., Zhang, Y., He, X., Luo, B., & Mai, R. (2022). Research and application of capacitive power transfer system: A review. *Electronics, 11*(7), 1158. https://doi.org/10.3390/electronics11071158

11. Elkafrawi, I. M., Faraj, A. O., Faraj, A. M., & Alshalem, S. M. (2021). Wireless power transfer. *Libyan Journal of Engineering Science and Technology, 1*(1), 7–11. https://www.researchgate.net/publication/389633322_Wireless_Power_Transfer

12. Haerinia, M., & Shadid, R. (2020). Wireless power transfer approaches for medical implants: A review. *Signals, 1*(2), 209–229. https://doi.org/10.3390/signals1020012

13. Yan, H., Chen, Y., & Yang, S.-H. (2020). UAV-enabled wireless power transfer with base station charging and UAV power consumption. *IEEE Transactions on Vehicular Technology, 69*(11), 12883–12896. https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3015246

14. Huang, J., Zhou, Y., Ning, Z., & Gharavi, H. (2019). Wireless power transfer and energy harvesting: Current status and future prospects. *IEEE Wireless Communications, 26*(4), 163–169. https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1800378

15. Clerckx, B., Popovic, Z., & Murch, R. (2022). Future networks with wireless power transfer and energy Eksperymentalna perevirka roboty modulia bezprovidnoi peredachi danykh HC-11 vseredyni prymishchen. harvesting [scanning the issue]. *Proceedings of the IEEE, 110*(1), 3–7. https://doi.org/10.1109/jproc.2021.3133676

16. Sari, V. (2024). Design and implementation of a wireless power transfer system for electric vehicles. *World Electric Vehicle Journal, 15*(3), 110. https://doi.org/10.3390/wevj15030110

17. Van Mulders, J., Delabie, D., Lecluyse, C., Buyle, C., Callebaut, G., Van der Perre, L., & De Strycker, L. (2022). Wireless power transfer: Systems, circuits, standards, and use cases. *Sensors, 22*(15), 5573. https://doi.org/10.3390/s22155573

18. Irwanto, M., Nugraha, Y. T., Hussin, N., Nisza, I., Perangin-Angin, D., & Alam, H. (2022). Modelling of wireless power transfer system using MATLAB SIMULINK. У *2022 IEEE 13th control and system graduate research colloquium (ICSGRC)*. IEEE. https://doi.org/10.1109/icsgrc55096.2022.9845181

19. Shikdar, T. A., Dey, S., Mumtahina, S., Rashid, M. M., & Chowdhury, G. M. (2022). Design and simulation of single phase and three phase wireless power transfer in electric vehicle using

MATLAB/Simulink. In S. Mekhilef, R. N. Shaw, & P. Siano (Eds.), *Innovations in electrical and electronic engineering* (Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 894). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1677-9_8

20. Viqar, S., Ahmad, A., Kirmani, S., Rafat, Y., Hussan, M. R., & Alam, M. S. (2024). Modelling, Simulation and Hardware analysis of misalignment and compensation topologies of wireless power transfer for Electric Vehicle Charging application. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 101285. https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101285

21. He, X., Liu, S., Wu, J., Feng, Y., Wang, R., Li, W., & Weng, W. (2024). Wireless power and information dual transfer system via magnetically coupled resonators. *Communications Engineering*, *3*(1). https://doi.org/10.1038/s44172-023-00154-4

22. Liu, Z., Mi, C. C., & Zhang, C. (2022). *Wireless power transfer technologies for electric vehicles: A review*. *IEEE Transactions on Transportation Electrification, 8*(3), 2967–2985. https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3128951

23. Chang, J., Cai, W., Wang, H., Guo, Y., Wu, J., Rong, C., & Xia, C. (2025). *A wireless power transfer system for unmanned aerial vehicles with CC/CV charging based on topology switching*. *Applied Sciences, 15*(22), 11932. https://doi.org/10.3390/app152211932

24. Wireless Power Consortium. (2024). *Qi specification overview*. https://www.wirelesspowerconsortium.com/knowledge-base/qi-specification/

25. AirFuel Alliance. (2024). *AirFuel resonant wireless power standard*. https://airfuel.org/airfuel-resonant/

26. SAE International. (2024). *SAE J2954: Wireless power transfer for light-duty plug-in/electric vehicles and alignment methodology*. https://www.sae.org/standards/j2954_202408-wireless-power-transfer-light-duty-plug-electric-vehicles-alignment-methodology

References

1. Sidiku, M. B., Eronu, E. M., & Ashigwuike, E. C. (2021). A review on wireless power transfer: Concepts, implementations, challenges, and mitigation scheme. *Nigerian Journal of Technology, 39*(4), 1206–1215. https://doi.org/10.4314/njt.v39i4.29.

2. Rahman, M. M., Shanto, M. S. I., Sarker, N., Rani, T., & Paul, L. C. (2024). A comprehensive review of wireless power transfer methods, applications, and challenges. *Engineering Reports*. https://doi.org/10.1002/eng2.12951.

3. Detka, K., & Górecki, K. (2022). Wireless power transfer—a review. *Energies*, *15*(19), 7236. https://doi.org/10.3390/en15197236

4. Okoyeigbo, O., Olajube, A. A., Shobayo, O., Aligbe, A., & Ibhaze, A. E. (2021). Wireless power transfer: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *655*(1), 012032. https://doi.org/10.1088/1755-1315/655/1/012032.

5. Rehman, M., Mirsaeidi, S., Nor, N. M., Koondhar, M. A., Zainuri, M. A. A. M., Alaas, Z. M., Eldin, E. T., Ghamry, N. A., & Ahmed, M. M. R. (2023). A review of inductive power transfer: Emphasis on performance parameters, compensation topologies and coil design aspects. *IEEE Access*, 1. https://doi.org/10.1109/access.2023.3344041

6. Palani, G., & Sengamalai, U. (2023). A critical review on inductive wireless power transfer charging system in electric vehicle. *Energy Storage, 5*(5), e407. DOI: https://doi.org/10.1002/est2.407.

7. Hui, S.-Y. R., Yang, Y., & Zhang, C. (2023). Wireless power transfer: A paradigm shift for the next generation. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 1. https://doi.org/10.1109/jestpe.2023.3237792

8. Lecluyse, C., Minnaert, B., & Kleemann, M. (2021). A review of the current state of technology of capacitive wireless power transfer. *Energies, 14*(18), 5862. DOI: https://doi.org/10.3390/en14185862.

9. Yi, K. (2020). Capacitive coupling wireless power transfer with quasi-LLC resonant converter using electric vehicles' windows. *Electronics, 9*(4), 676. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics9040676.

10. Wang, Z., Zhang, Y., He, X., Luo, B., & Mai, R. (2022). Research and application of capacitive power transfer system: A review. *Electronics, 11*(7), 1158. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics11071158.

11. Elkafrawi, I. M., Faraj, A. O., Faraj, A. M., & Alshalem, S. M. (2021). Wireless power transfer. *Libyan Journal of Engineering Science and Technology, 1*(1), 7–11. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/389633322_Wireless_Power_Transfer.

12. Haerinia, M., & Shadid, R. (2020). Wireless power transfer approaches for medical implants: A review. *Signals, 1*(2), 209–229. DOI: https://doi.org/10.3390/signals1020012.

13. Yan, H., Chen, Y., & Yang, S.-H. (2020). UAV-enabled wireless power transfer with base station charging and UAV power consumption. *IEEE Transactions on Vehicular Technology, 69*(11), 12883–12896. DOI: https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3015246.

14. Huang, J., Zhou, Y., Ning, Z., & Gharavi, H. (2019). Wireless power transfer and energy harvesting: Current status and future prospects. *IEEE Wireless Communications, 26*(4), 163–169. DOI: https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1800378.

15. Clerckx, B., Popović, Z., & Murch, R. (2022). Future networks with wireless power transfer and energy harvesting [Scanning the issue]. *Proceedings of the IEEE, 110*(1), 3–7. DOI: https://doi.org/10.1109/JPROC.2021.3133676.

16. Sari, V. (2024). Design and implementation of a wireless power transfer system for electric vehicles. World Electric Vehicle Journal, 15(3), 110. https://doi.org/10.3390/wevj15030110

17. Van Mulders, J., Delabie, D., Lecluyse, C., Buyle, C., Callebaut, G., Van der Perre, L., & De Strycker, L. (2022). Wireless power transfer: Systems, circuits, standards, and use cases. Sensors, 22(15), 5573. https://doi.org/10.3390/s22155573

18. M. Irwanto, Y. T. Nugraha, N. Hussin, I. Nisza, D. Perangin-Angin and H. Alam, "Modelling of Wireless Power Transfer System Using MATLAB SIMULINK," 2022 IEEE 13th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC), Shah Alam, Malaysia, 2022, pp. 21-24, doi: 10.1109/ICSGRC55096.2022.9845181.

19. Shikdar, T.A., Dey, S., Mumtahina, S., Rashid, M.M., Chowdhury, G.M. (2022). Design and Simulation of Single Phase and Three Phase Wireless Power Transfer in Electric Vehicle Using MATLAB/Simulink. In: Mekhilef, S., Shaw, R.N., Siano, P. (eds) Innovations in Electrical and Electronic Engineering. ICEEE 2022. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 894. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1677-9_8

20. Viqar, S., Ahmad, A., Kirmani, S., Rafat, Y., Hussan, M. R., & Alam, M. S. (2024). Modelling, Simulation and Hardware analysis of misalignment and compensation topologies of wireless power transfer for Electric Vehicle Charging application. Sustainable Energy, Grids and Networks, 101285. https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101285

21. He, X., Liu, S., Wu, J., Feng, Y., Wang, R., Li, W., & Weng, W. (2024). Wireless power and information dual transfer system via magnetically coupled resonators. Communications Engineering. https://doi.org/10.1038/s44172-023-00154-4.

22. Liu, Z., Mi, C. C., & Zhang, C. (2022). Wireless power transfer technologies for electric vehicles: A review. *IEEE Transactions on Transportation Electrification, 8*(3), 2967–2985. https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3128951.

23. Chang, J.; Cai, W.; Wang, H.; Guo, Y.; Wu, J.; Rong, C.; Xia, C. A Wireless Power Transfer System for Unmanned Aerial Vehicles with CC/CV Charging Based on Topology Switching. Appl. Sci. 2025, 15, 11932. https://doi.org/10.3390/app152211932.

24. Wireless Power Consortium. (2024). *Qi specification overview*. https://www.wirelesspowerconsortium.com/knowledge-base/qi-specification/

25. AirFuel Alliance. (2024). *AirFuel resonant wireless power standard*. https://airfuel.org/airfuel-resonant/

26. SAE International. (2024). *SAE J2954: Wireless power transfer for light-duty plug-in/electric vehicles and alignment methodology*. https://www.sae.org/standards/j2954_202408-wireless-power-transfer-light-duty-plug-electric-vehicles-alignment-methodology).

Дата першого надходження статті до видання: 26.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.03.2026

UDC 621.3.032

Denys Smolyar[1], Anatoliy Prystupa[2]

[1]Postgraduate student of the Department of Electrical Engineering and Information and Measurement Technologies
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: smoliardenis@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0009-7207-669X

[2]Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Information and Measurement Technologies
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

ANALYSIS OF WIRELESS POWER TRANSFER METHODS

Relevance of the study stems from the growing demand for energy-efficient and reliable contactless power delivery in the context of electric mobility, autonomous electronic modules, and intelligent energy networks. Increasing design complexity and increasingly stringent electromagnetic compatibility requirements call for a rigorous technical analysis of wireless power transfer methods, accounting for power losses, parasitic parameters, and operational stability.

The purpose of the article is a technical investigation of wireless power transfer methods through examination of their physical principles, circuit implementation features, and quantitative evaluation of energy characteristics, with the aim of substantiating the feasibility of applying inductive and capacitive systems in modern technical devices.

Research methods encompass theoretical analysis of electromagnetic processes, development of a generalized structural model of a wireless power transfer system, and a computational experiment performed under typical operating conditions with variation of the geometric air gap. Analytical expressions were employed to evaluate transmitted power and efficiency, followed by comparative interpretation of the results.

Results reveal a pronounced difference in the sensitivity of inductive and capacitive systems to variations in the distance between transmitting and receiving elements. Inductive systems exhibit a gradual degradation of transmitted power and efficiency, whereas capacitive systems demonstrate a sharp nonlinear decline in energy performance as the gap increases. The influence of parasitic parameters and deviations from the resonant operating mode on system stability was identified.

Conclusions confirm that the stated objective has been achieved. It was established that the selection of a wireless power transfer method must account for the required power level, permissible transmission distance, and electromagnetic compatibility constraints. Inductive systems are more suitable for medium- and high-power applications, while capacitive solutions are preferable for compact, low-power devices operating under fixed geometrical conditions.

Future research directions in wireless power transfer include the development of adaptive impedance-matching algorithms analogous to maximum power point tracking (MPPT), capable of improving energy transfer efficiency under varying load and distance conditions. Further prospects include hybrid systems combining inductive (IPT) and capacitive (CPT) transfer for transportation applications and wireless charging platforms. Another promising direction is the development of contactless power supply systems for unmanned aerial vehicles (UAVs) aimed at extending autonomous operation time.

Keywords: *inductive coupling; capacitive coupling; resonant operation; electromagnetic field; energy efficiency; parasitic parameters; electromagnetic compatibility; power electronics; reactive impedance; contactless power supply.*

Fig.: 4. Table 4. References: 26.

Смоляр Д. В., Приступа А. Л. Аналіз методів бездротової передачі енергії. *Технічні науки та технології*, 2026. № 2(44). С. 444-458. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-444-458.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-459-465
УДК 621.311.1

Гліб Миколайович Стрункін

магістр, інженер ТОВ «Плутон ІС» (Запоріжжя, Україна)
E-mail: strunkingleb@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0009-1719-4132. **ResearcherID**: LNQ-2155-2024

«ФЕНОМЕН ЗАРЯДНОЇ ЛАВИНИ» В УМОВАХ СТАБІЛІЗАЦІЙНИХ ВІДКЛЮЧЕНЬ

Наведено відомості про збільшення встановленої потужності зарядних станцій в умовах стабілізаційних відключень електроенергії. Показано, що збільшення відсотка квартир з наявністю зарядних станцій призводить до надмірного споживання при відновленні енергопостачання. Проаналізовано зміну графіка споживання електроенергії житловим комплексом з різними відсотками оснащеності EcoFlow. Отримані прогнози вичерпання запасу електропроводки. Розроблено регресійні моделі залежності надлишкового споживання енергій у функції відсотка оснащеності акумуляторами та дозволеної потужності заряду. Поданий якісний аналіз феномену зарядної лавини на рівні енергосистеми.

Ключові слова: *стабілізаційні відключення; зарядні станції; відсоток оснащеності; регресійна модель; ліміт споживання; зарядна лавина.*

Рис.: 3. Бібл.: 17.

Актуальність теми дослідження. В умовах вимушеного відключення електроенергії для українських споживачів через недостатні маневрові потужності та обмеження генерації – стабілізаційних відключень – актуальним для населення стало придбання зарядних станцій, акумуляторів та безперебійних джерел живлення. За інформацією Яковенко Валерія, чия компанія DroneUA має статус офіційного дистриб'ютора EcoFlow на українському ринку, встановлена потужність зарядних станцій, яку викупив побутовий споживач, сягнула 1,6 ГВт, що відповідає потужності ядерного реактора [1]. Об'єм ринку зарядних станцій за таких обставин безперервно зростає: 34 тис. одиниць у 2022 р., понад 300 тис. у 2024 р. [2], понад 525 тис. у 2025 р. [3]. За нової реалії енергопостачання в середньому по Україні 25 % побутових споживачів відзначили зростання використаної електроенергії в порівнянні з аналогічним періодом, коли відключень не було. Для киян цей показник сягнув 41 % [4]. У зв'язку з чим можна прогледіти чітку кореляцію між зростанням попиту на акумуляторну техніку та підвищенням енергоспоживання в умовах відключення електропостачання. У свою чергу, підвищення споживання електроенергії за наявності світла може призвести до додаткового зменшення ліміту від Укренерго в разі нестачі потужності генерування [5]. Можна говорити про деякий феномен, за яким підвищення енергонезалежності побутових споживачів призводитиме до додаткового зменшення ліміту потужності для них та збільшення часу відсутності енергопостачання. Аналіз впливу відсотка забезпечення акумуляторною технікою побутових споживачів на ліміти енергії при стабілізаційних відключеннях є актуальним завданням.

Постановка проблеми. Для прогнозування відповідності впровадженого обмеження енергопостачання від Укренерго реальному об'єму електрики, який відбирають побутові споживачі, необхідно оцінити ступінь впливу їхньої енергонезалежності на ліміт енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В умовах динамічної зміни ситуації в українській енергосистемі питання впливу відсотка енергонезалежності побутових споживачів на ліміти Укренерго не досліджувалось. Склалася унікальна ситуація: у Європі та США такої проблеми взагалі не існує [6]. Країни, які стискалися з подібним обмеженням для побутових споживачів, ще не мали можливості впроваджувати великі значення встановленої потужності зарядних станцій [7; 8]. До сьогодення використання великих джерел безперервного енергоживлення обмежувалося лише для купірування поодиноких відключень чи для впровадження автономного енергопостачання для умов відсутності можливості підключення для мережі [9; 10]. Можна зауважити, що прогрес у сфері акумуляторів [11] та силової електроніки [12] збігся з трагічною необхідністю забезпечити повсякденне життя населення України.

© Г. М. Стрункін, 2026

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Інженерний прогноз можливого ліміту по електроенергії для побутових споживачів стискається з відсутністю можливості оцінити реальне збільшення енергоспоживання під час наявності світла внаслідок виникнення великих зарядних струмів акумуляторного обладнання.

Метою статті є побудова регресійної моделі для прогнозування ліміту енергії в умовах стабілізаційних відключень, зважаючи на ринкові дані про наявні джерела безперервного енергоживлення у населення.

Виклад основного матеріалу. Оцінювання реальних обсягів споживання електрики населенням стискається з різним відношенням до використання електричної енергії різними прошарками населення.

Для розрахунків скористаємося реальним графіком енергоспоживання житлового комплексу на 62 квартири (рис. 1) [13].

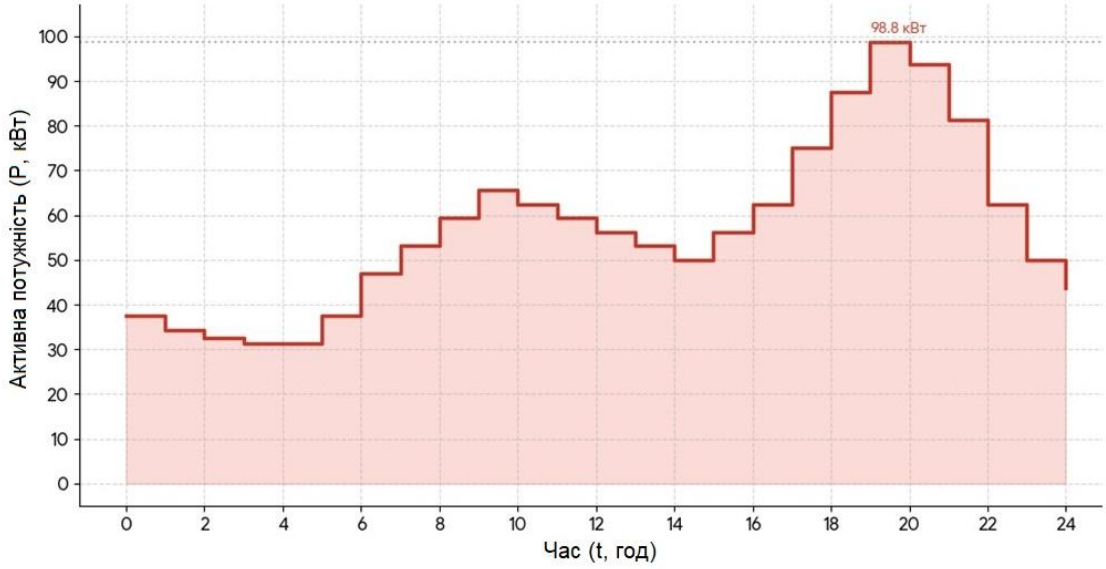


Рис. 1. Графік енергоспоживання житлового комплексу

Джерело: розроблено автором на основі [13].

Аналіз квартирного господарства показав, що основним споживачем електроенергії є холодильник та бойлер, які після відновлення енергопостачання активно працюють, відновлюючи, відповідно, холод та тепло. Однак у світлі останніх подій можна зазначити, що швидкий заряд EcoFlow призводить до збільшення струму споживання через режим швидкого заряджання. Таким чином, слід розділити споживачів за відсотками за наявністю означених пристроїв. Можна вважати, що холодильник має кожна квартира. Бойлер за відсутності постачання гарячої води та газового обігрівача мають 75 % квартир [14]. Щодо наявності зарядної станції, то справедливо можна припустити, що збільшення енергоспоживання при блекаутах спостерігають як раз господарі квартир, обладнаних акумуляторною технікою, тобто згідно з опитуванням [4] 25 % українців.

Узявши за основу для розрахунків графік відключення електрики для м. Запоріжжя [15] з режимом 5 на 4 (відсутність електрики, наприклад, з 0:00 до 5:00, з 9:00 до 14:00, з 18:00 до 23:00), побудуємо графік енергоспоживання з урахуванням нових умов. Для цього висунемо такі припущення:

1. Холодильники в усіх квартирах після подачі електроенергії вмикаються та працюють для компенсації нагріву приладу ще 2 години. При цьому, як показано у досліджені [16], їх споживання зростає в середньому на 22 %.

2. Бойлери в усіх обладнаних квартирах вмикаються та працюють 1 годину для компенсації внутрішніх втрат та витрат гарячої води. При чому, як розраховано в [17], витрата гарячої води супроводжується зниженням температури в бойлері за рахунок домішування нових об'ємів холодної. Для розрахунку прийнято, що витрати становили $^1/_4$ від об'єму бойлера. У такому випадку він витратить на 60 % більше електроенергії для компенсації зниження температури за рахунок домішування холодної води.

3. Зарядні станції повертатимуть заряд 0,5 кВт*год, який було витрачено для живлення навантаження 100 Вт за 5 годин. Враховуючи ККД зарядної станції на рівні 0,8, остаточно отримаємо потрібну енергію в 0,625 кВт*год. Будемо вважати, що налаштування зарядної станції відповідає обмеженню зарядної потужності в 500 Вт, тобто її заряд буде тривати 1 годину.

Розрахований за таких припущень графік споживання житлового комплексу зображено на рис. 2.

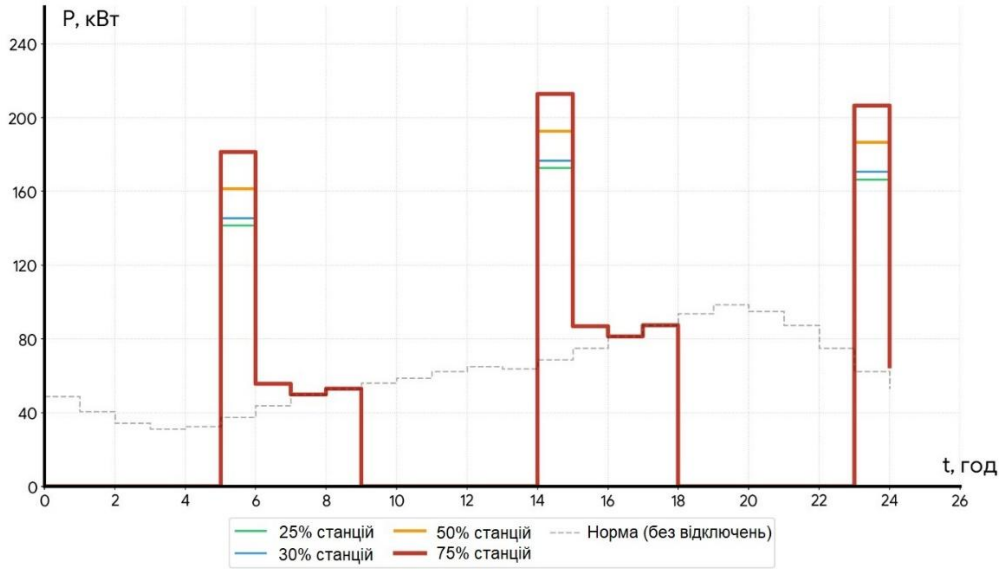


Рис. 2. Графік енергоспоживання житлового комплексу в умовах блекаутів
Джерело: розроблено автором.

Аналогічно побудовано графіки споживання в режимі відключень 5 на 4, зважаючи, що зарядними станціями обладнано 30, 50 та 75 % домогосподарств (рис. 2).

Аналіз показує, що навіть при 25 % станцій пік становить 162,5 кВт, що вже на 65 % вище за номінальну потужність будинку. Проєктний запас за потужністю звичайно становить 200 %. Якщо побудувати за отриманими даними лінійну регресію залежності пікового навантаження P_{peak} (кВт), у вигляді

$$P_{peak} = 0{,}8 \cdot N(\%) + 150{,}5, \quad (1)$$

де $N(\%)$ - відсоток квартир із зарядними станціями, то можна знайти, що проєктний запас за потужністю буде повністю вичерпано при обладнанні 59 % квартир зарядними станціями. Якщо взяти до уваги, що захисні апарати в кожній квартирі не повинні перевищувати 16 А, що відповідає потужності 228 кВт, то при обладнанні зарядними пристроями 97 % квартир вмикання електроенергії стане неможливим. Цікаво, що наявність холодильників та бойлерів дає деяку константу 150,5 кВт. Ця константа майже не змінюється з часом, бо її формування у населення на поточний час майже завершено.

Інший чинник, який суттєво впливає на вичерпання проєктного запасу комплексу – обмеження потужності швидкого заряджання акумуляторів. Аналогічно було розраховано пікові навантаження для різних величин обмеження зарядної потужності P_{ch} . Двофакторна регресійна модель записується у вигляді:

$$P_{peak}\left(N(\%), P_{ch}\right) = 0,8 \cdot N(\%) \cdot 0,5 P_{ch} + 150,5, \quad (2)$$

Графік для отриманої двофакторної моделі зображено на рис. 3.

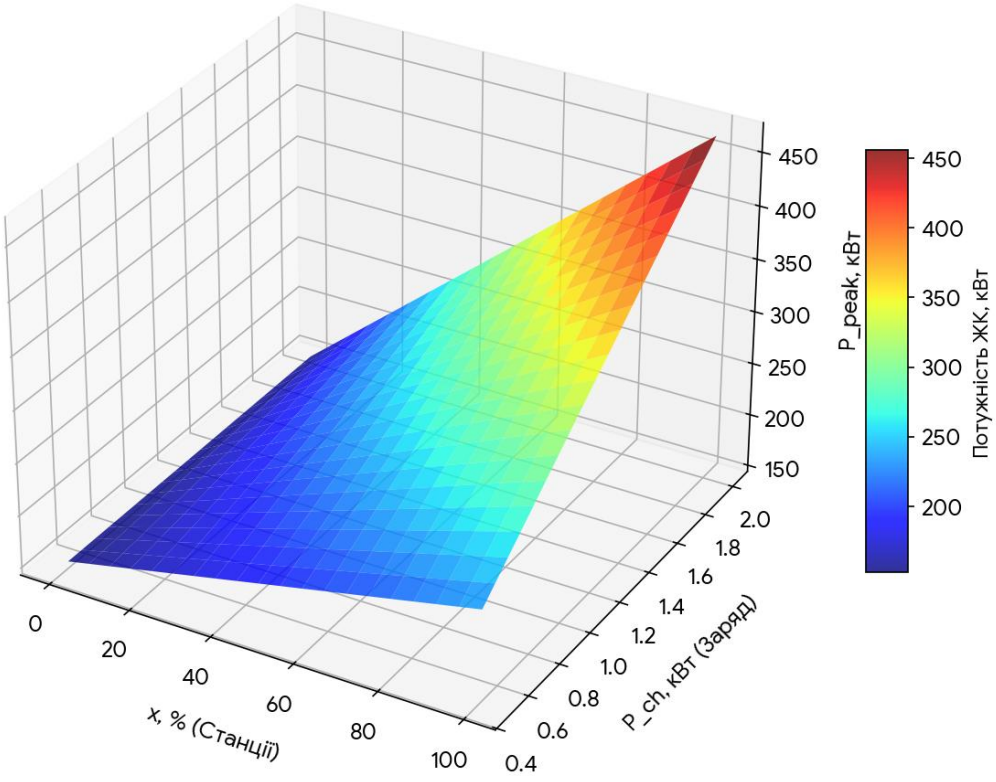


Рис. 3. Графік двофакторної моделі енергоспоживання житлового комплексу в умовах блекаутів

Джерело: розроблено автором.

Регресія (2) демонструє синергетичний ефект: збільшення дозволеної потужності зарядних пристроїв P_{ch} лінійно прискорює зростання пікового навантаження від кількості станцій $N(\%)$. При використанні потужних зарядних пристроїв 2 кВт критична межа стійкості мережі наступає вже при 15 % оснащених ними квартир.

Цей ефект на рівні міських електричних мереж в умовах діючого ліміту на споживання від Укренерго призводить до виникнення ситуації, коли після відновлення енергоживлення для частки споживачів (черги за відключенням), потрібно, в свою чергу, знижувати ліміт споживання. Тобто виникає такий собі позитивний зворотний зв'язок між кількістю зарядних станцій та лімітом потужності. Опишемо його на якісному рівні. Нехай діяло обмеження 200 МВт для деякого міста. Статистично відомо, що доля критичної інфраструктури в місті становить 25-30 %, тобто для інших споживачів дозволена потужність дорівнює близько 140 МВт, або близько 930 будинків, аналогічних розглянутим вище за умови їх оснащеності холодильниками та бойлерами (тобто 150 кВт споживання). При перевищенні ліміту навіть на 10 % (14 МВт) Укренерго вводить додаткові обмеження [5], тобто для кожного окремого будинку це складе додаткові 15 кВт, або

19 % оснащеності зарядними станціями за умови обмеження їх потужності заряду на рівні 500 Вт. Цей феномен неодноразово призводив до корегування лімітів Укренерго та виявився в умовах українських блекаутів вперше [5]. Пропонується для його позначення ввести термін **«феномен зарядної лавини»** – збільшення лімітів обсягів енергозабезпечення в умовах стабілізаційних відключень при підвищенні оснащення енергосистеми акумуляторними потужностями. Детальний статистичний опис цього ефекту – тема окремої роботи, для якого вкрай важливо вести детальну статистику продажу зарядних пристроїв. Для нівелювання феномену зарядної лавини доцільним є використання для заряду акумуляторів альтернативні джерела живлення, наприклад, сонячні панелі.

Висновки. У статті описано виникнення механізму надлишкового споживання електроенергії в умовах стабілізаційних відключень внаслідок оснащення споживачів акумуляторними потужностями. Побудовано регресійну модель споживання житлового комплексу залежно від відсотка оснащеності зарядними станціями та їх дозволеною потужністю. Навіть при потужності заряджання 500 Вт за умови оснащення 59 % квартир акумуляторами вичерпується проєктний запас по електропроводці. Підвищення потужності зарядного пристрою лінійно зменшує дозволений відсоток оснащеності квартир. На рівні енергосистеми цей ефект призводить до феномену, при якому високий відсоток наявності у населення акумуляторних джерел призводить до необхідності введення додаткових лімітів на споживання.

Список використаних джерел

1. Домашні та бізнес-станції перевищують потужність АЕС. (n.d.). *Delo.ua*. Отримано 1 квітня 2026 року з https://delo.ua/news/ukrayinci-nakupili-ecoflow-potuznistyu-za-atomnii-reaktor-459632/.

2. Сахно, А. (2025, May 3). *DroneUA за два роки збільшила продажі зарядних станцій ecoflow у 8 разів і відкрила перший в світі магазин бренду — delo.ua*. Останні новини України та світу онлайн — delo.ua. https://delo.ua/news/droneua-za-dva-roki-zbilsila-prodazi-zaryadnix-stancii-ecoflow-u-8-raziv-i-vidkrila-persii-oficiinii-u-sviti-magazin-brendu-445715/.

3. *Попит під тиском обстрілів: Як українці адаптуються до енергетичної...* (n.d.). Комерсант український: останні новини України за сьогодні. https://komersant.ua/popyt-pid-tyskom-obstriliv-iak-ukraintsi-adaptuiutsia-do-enerhetychnoi-nestabilnosti/.

4. Порощук, Н. (2026, February 26). *Чому при відключеннях світла зросли рахунки: Пояснення Yasno*. ГЛАВКОМ. https://glavcom.ua/economics/personal-money/chomu-pri-vidkljuchennjakh-svitla-zrosli-rakhunki-yasno-dalo-pojasnennja-1105284.html.

5. Увага! Перевищено ліміт споживання електроенергії. (n.d.). *Запоріжжяобленерго*. Отримано 1 квітня 2026 року з https://www.zoe.com.ua/news/%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%B3%D0%B0-%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B2%D0%B8%D1%89%D0%B5%D0%BD%D0%BE-%D0%BB%D1%96%D0%BC%D1%96%D1%82-%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%B6%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F-%D0%B5%D0%BB/.

6. Europe uninterruptible power supply (UPS) market size, share, and trends analysis report – industry overview and forecast to 2032. (n.d.). *Data Bridge Market Research*. Отримано 1 квітня 2026 року з https://www.databridgemarketresearch.com/reports/europe-uninterruptible-power-supply-ups-market.

7. Sargsyan, G., Balabanyan, A., & Hankinson, D. (2006). *From crisis to stability in the Armenian power sector: Lessons learned from Armenia's energy reform experience* (Working Paper No. 74). World Bank. https://doi.org/10.1596/978-0-8213-6589-2.

8. Rupcic, T. (2024). Navigating the archives: Writing the history of development of electrical infrastructure in socialist Yugoslavia (1945–1991). *Revue d'Histoire de l'Énergie*. https://doi.org/10.3917/jehrhe.012.0170.

9. Loeffler, C., & Spears, E. (2015). *Uninterruptible power supply system*. In Hwaiyu Geng (Ed.), *Data center handbook* (pp. 495–521). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118937563.ch27.

10. Curtis, P. M. (2011). UPS systems: Applications and maintenance with an overview of green technologies. In *Maintaining mission critical systems in a 24/7 environment* (pp. 223–264). IEEE. https://doi.org/10.1002/9781118041642.ch10.

11. IEEE. (2022). *IEEE guide for batteries for uninterruptible power supply systems* (IEEE Std 1184-2022, Rev. of IEEE Std 1184-2006). https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9774336.

12. Tong, J., & Liu, J. (2024). Design of an uninterruptible power supply (UPS) monitoring system based on STM32. In *2024 9th international conference on intelligent informatics and biomedical sciences (ICIIBMS)* (pp. 311–315). IEEE. https://doi.org/10.1109/iciibms62405.2024.10792730.

13. *Добовий графік навантаження житлових будинків, проектування електропостачання*. (n.d.). Відповіді на запитання. https://jak.bono.odessa.ua/articles/dobovij-grafik-navantazhennja-zhitlovih-budinkiv.php.

14. Національний екологічний центр України. (n.d.). *Ставлення населення України до енергозбереження: Результати всеукраїнського соціологічного опитування*. https://necu.org.ua/wp-content/uploads/Stavlennya_ua_do_energozberezhennia_full002_vseukr.pdf.

15. ТОВ «Запоріжжяобленерго». (n.d.). *Стабілізаційні відключення електроенергії*. https://www.zoe.com.ua/outage/.

16. Li, B., & Alleyne, A. G. (2010). A dynamic model of a vapor compression cycle with shut-down and start-up operations. *International Journal of Refrigeration*, *33*(3), 538–552. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.09.011.

17. Chandra, Y. P., & Matuska, T. (2019). Stratification analysis of domestic hot water storage tanks: A comprehensive review. *Energy and Buildings*, *187*, 110–131. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.052.

References

1. Domashni ta biznes-stantsii perevyshchuiut potuzhnist AES. (n.d.). Delo.ua. Otrymano 1 kvitnia 2026 roku [Home and business stations exceed the capacity of nuclear power plants. [Electronic resource]. – Accessed mode: https://delo.ua/news/ukrayinci-nakupili-ecoflow-potuznistyu-za-atomnii-reaktor-459632/.

2. Sakhno, A. (2025, May 3). DroneUA za dva roky zbilshyla prodazhi zariadnykh stantsii ecoflow u 8 raziv i vidkryla pershyi v sviti mahazyn brendu [In two years, DroneUA has increased sales of ecoflow charging stations eightfold and opened the brand's first store worldwide]. *delo.ua*. *Ostanni novyny Ukrainy ta svitu onlain — The latest news from Ukraine and around the world online delo.ua.* https://delo.ua/news/droneua-za-dva-roki-zbilsila-prodazi-zaryadnix-stancii-ecoflow-u-8-raziv-i-vidkrila-persii-oficiinii-u-sviti-magazin-brendu-445715/.

3. Popyt pid tyskom obstriliv: Yak ukraintsi adaptuiutsia do enerhetychnoi… (n.d.). [Demand under the pressure of shelling: how Ukrainians adapt to energy instability.] [Electronic resource]. – Accessed mode: https://komersant.ua/popyt-pid-tyskom-obstriliv-iak-ukraintsi-adaptuiutsia-do-enerhetychnoi-nestabilnosti/.

4. Poroshchuk, N. (2026, February 26). Chomu pry vidkliuchenniakh svitla zrosly rakhunky: Poiasnennia Yasno. [Why electricity bills have gone up during power cuts: An explanation from Yasno.] HLAVKOM https://glavcom.ua/economics/personal-money/chomu-pri-vidkljuchennjakh-svitla-zrosli-rakhunki-yasno-dalo-pojasnennja-1105284.html.

5. Uvaha! Perevyshcheno limit spozhyvannia elektroenerhii. (n.d.). Zaporizhzhiaoblenerho. Otrymano 1 kvitnia 2026 roku z [Why electricity bills have gone up during power cuts: An explanation from Yasno.] https://www.zoe.com.ua/news/%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%B3%D0%B0-%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B2%D0%B8%D1%89%D0%B5%D0%BD%D0%BE-%D0%BB%D1%96%D0%BC%D1%96%D1%82-%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%B6%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F-%D0%B5%D0%BB/.

6. Europe Uninterruptible Power Supply (UPS) Market Size, Share, and Trends Analysis Report – Industry Overview and Forecast to 2032. https://www.databridgemarketresearch.com/reports/europe-uninterruptible-power-supply-ups-market.

7. Sargsyan, G., Balabanyan, A., & Hankinson, D. (2006). *From crisis to stability in the Armenian power sector: Lessons learned from Armenia's energy reform experience* (Working Paper No. 74). World Bank. https://doi.org/10.1596/978-0-8213-6589-2.

8. Rupcic, T. (2024). Navigating the archives: Writing the history of development of electrical infrastructure in socialist Yugoslavia (1945–1991). *Revue d'Histoire de l'Énergie*. https://doi.org/10.3917/jehrhe.012.0170.

9. Loeffler, C., & Spears, E. (2015). *Uninterruptible power supply system*. In Hwaiyu Geng (Ed.), *Data center handbook* (pp. 495–521). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118937563.ch27.

10. Curtis, P. M. (2011). UPS systems: Applications and maintenance with an overview of green technologies. In *Maintaining mission critical systems in a 24/7 environment* (pp. 223–264). IEEE. https://doi.org/10.1002/9781118041642.ch10.

10. Peter M. Curtis, "UPS Systems: Applications and Maintenance With an Overview of Green Technologies," in Maintaining Mission Critical Systems in a 24/7 Environment, IEEE, 2011, 223-264, doi: https://doi.org/10.1002/9781118041642.ch10.

11. IEEE. (2022). *IEEE guide for batteries for uninterruptible power supply systems* (IEEE Std 1184-2022, Rev. of IEEE Std 1184-2006). https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9774336.

12. Tong, J., & Liu, J. (2024). Design of an uninterruptible power supply (UPS) monitoring system based on STM32. In *2024 9th international conference on intelligent informatics and biomedical sciences (ICIIBMS)* (pp. 311–315). IEEE. https://doi.org/10.1109/iciibms62405.2024.10792730.

13. Dobovyi hrafik navantazhennia zhytlovykh budynkiv, proektuvannia elektropostachannia. [Daily load profile for residential buildings; design of the electricity supply system]. (n.d.). Vidpovidi na zapytannia]. *Answers to the questions.* https://jak.bono.odessa.ua/articles/dobovij-grafik-navanta-zhennja-zhitlovih-budinkiv.php.

14. Natsionalnyi ekolohichnyi tsentr Ukrainy. (n.d.). Stavlennia naselennia Ukrainy do enerhozberezhennia: Rezultaty vseukrainskoho sotsiolohichnoho opytuvannia [National Ecological Centre of Ukraine. (n.d.). The Ukrainian public's attitude towards energy saving: Results of a nationwide sociological survey]. https://necu.org.ua/wp-content/uploads/Stavlennya_ua_do_energozberezhennia_full002_vseukr.pdf.

15. Stabilization power outages. https://www.zoe.com.ua/outage/.

16. Li, B., & Alleyne, A. G. (2010). A dynamic model of a vapor compression cycle with shutdown and start-up operations. *International Journal of Refrigeration*, *33*(3), 538–552. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.09.011.

17. Chandra, Y. P., & Matuska, T. (2019). Stratification analysis of domestic hot water storage tanks: A comprehensive review. *Energy and Buildings*, *187*, 110–131. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.052.

Дата першого надходження статті до видання: 08.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

UDC 621.311.1

Hlib Strunkin

M.Eng., engineer "Pluton IC" LLC (Zaporizhzhya, Ukraine)
E-mail: strunkingleb@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0009-1719-4132. **ResearcherID**: LNQ-2155-2024

"CHARGE AVALANCHE PHENOMENON" IN CONDITIONS OF STABILIZATION SHUTDOWNS

Information is provided on the increase in the installed capacity of charging stations for household consumers in the conditions of stabilizing power outages in Ukraine. The Ukrainian situation of blackouts with a large percentage of the population having large batteries has no analogues in the past. It is shown that an increase in the percentage of apartments with charging stations leads to excessive consumption when the power supply is restored. A consumption schedule for a typical residential complex in the absence of outages is provided. Apartment devices are described that lead to a change in the energy consumption schedule in the conditions of stabilizing shutdowns and assumptions about their operation are introduced when the power supply is restored. A change in the energy consumption schedule for a typical residential complex with different percentages of EcoFlow equipment is analyzed. Forecasts are obtained, which can be used to predict the depletion of the electrical wiring supply and the impossibility of turning on the electricity. Two-factor regression models of the dependence of excess energy consumption as a function of the percentage of battery equipment and the permitted charge power are developed. A qualitative analysis of the impact of the population's equipment with charging stations on Ukrenergo limits is presented, according to which the occurrence of additional battery charging current leads to a rapid depletion of the introduced limits. The term "charging avalanche phenomenon" is proposed at the power system level under conditions of stabilization outages, which describes the positive feedback between the percentage of the population's equipment with batteries and the energy limit. Further steps are outlined for a statistical study of the charging avalanche phenomenon to create a flexible forecasting tool.

***Keywords**: stabilization shutdowns; charging stations; percentage of equipment; regression model; consumption limit; charging avalanche.*

Fig.: 3. References: 17.

Стрункін Г. М. «Феномен зарядної лавини» в умовах стабілізаційних відключень. *Технічні науки та технології,* 2026. № 2(44). С. 459-465. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-459-465.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-466-483
УДК 621.3

Богдан Олександрович Велігорський[1], Максим Анатолійович Хоменко[2]

[1]студент аспірантури кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: bogdan_vel@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0008-4492-4156
Google Scholar: https://scholar.google.com/citations?user=LTc0_2UAAAAJ&hl=en

[2]кандидат технічних наук, доцент кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: mr.homax@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-9084-3527
Google Scholar: https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=3K50Dg8AAAAJ

МЕТОДИ КЕРУВАННЯ MICROGRID В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Представлено складові Microgrid та наведено два основні режими роботи. Наведено приклади невизначеностей, які існують у Microgrid. Розглянуто методи керування Microgrid в умовах невизначеності та виконано їх порівняння між собою з погляду легкості інтеграції в систему, обчислювальної ефективності та ефективності роботи конкретно при невизначеності. Обґрунтовано поділ усіх методів керування Microgrid на 3 групи: Conventional, Advanced ma Intelligent.

Ключові слова: *невизначеність; прогнозне керування; Microgrid; відновлювальні джерела електроенергії; модельно-прогнозне керування; навчання з підкріпленням; оптимальне керування.*

Рис.: 9. Бібл.: 18.

Актуальність теми дослідження. Електроенергія є значним відкриттям людства, яке дає змогу вирішувати низку промислових та суспільних задач: від підвищення ефективності виробництва до забезпечення комфортного життя. У сучасному світі важко уявити людину, яка б жодного разу не користувалася електроприладами. Тому можна стверджувати, що електропостачання стало невід'ємною частиною життя людини у XXI столітті. Однак те, що, на перший погляд, сприймається як давно досліджене та просте, насправді є цілим комплексом обладнання, що генерує, розподіляє та передає електроенергію до споживачів. І навіть найменша помилка в одному з елементів може призвести до виходу з ладу цілої системи. Енергетична галузь впродовж кількох останніх десятиліть залишається однією з найбільш вагомих для людства.

Основними трендами останніх років у світовій енергетичній галузі є впровадження відновлювальних джерел електроенергії (сонячна енергія, сила вітру), зменшення загального споживання, забезпечення стабільної та безвідмовної для споживачів роботи електроенергетичного обладнання. Більшість із цього також є актуальним і для України. Проте найбільш важливим серед цих трендів у наш час для України є забезпечення стабільного та безперебійного електропостачання. Наслідки бойових дій та обстрілів часто призводять до руйнувань стаціонарних електростанцій, підстанцій, розподільчих мереж тощо. Це у свою чергу призводить до аварійних та планових відключень електроенергії для побутових споживачів і бізнесу, чим опосередковано погіршує якість життя населення. Тому постає питання надійного та рівномірного постачання електроенергії всім споживачам в умовах підвищеної ймовірності виходу з ладу окремих вузлів енергомережі за рахунок залучення альтернативних і більш мобільних джерел енергії, зокрема, відновлювальних. Одним зі шляхів інкорпорації відновлювальних джерел електроенергії в місцях, де централізоване цілодобове енергопостачання впровадити чи відновити дуже важко, є включення в енергосистему країни мереж на основі Microgrid.

Постановка проблеми. Більшість задач, характерних для сучасного етапу розвитку електроенергетики, дає змогу вирішити інтеграція мереж на основі Microgrid в енергомережу країни. Однак при керуванні Microgrid потрібно мати справу з невизначеностями.

© Б. О. Велігорський, М. А. Хоменко, 2026

Microgrid (мікромережі, «мікросітки») – сукупність взаємопов'язаних споживачів електроенергії й розподілених енергетичних ресурсів, що працює як цілісний контрольований об'єкт стосовно мережі [1]. Такі системи об'єднують генерацію, накопичення та споживання електроенергії для підвищення надійності та автономності, працюючи як окремо від великої мережі, так і синхронно, забезпечуючи резервне живлення, інтегруючи відновлювані джерела (сонце, вітер) та знижуючи залежність від централізованого постачання. Вони можуть працювати в ізольованому (автономному) або мережевому режимах, пропонуючи ефективне управління енергією та можливість незалежного енергопостачання.

Упродовж останніх десятиліть особливо актуальним при проєктуванні будь-яких систем керування є питання вирішення можливих невизначеностей. Невизначеності виникають у будь-якій галузі: в енергетиці, в економіці, у соціально-демографічних процесах тощо. Оскільки будь-який процес містить низку вагомих та малопомітних факторів, які можуть впливати на подальший розвиток подій, то це означає, що майбутній стан системи може кардинально відрізнятися від очікуваного. Однак, яким конкретно буде цей стан, як його передбачити і взаємодіяти з ним і є основним завданням прогнозного керування, зокрема вирішення невизначеностей.

Вміння передбачати майбутнє та вирішувати таким чином невизначеність дає змогу отримати значну економічну вигоду. На підставі отриманої інформації можливим є зменшення потенційних збитків від аварій та неочевидних, на перший погляд, проблем, що можуть призвести до виходу з ладу обладнання.

Загалом впровадження Microgrid у свою чергу формує нові проблеми: генерація достатньої потужності, економічна доцільність, фінансування, віртуальна та фізична безпека обладнання тощо. У даній статті буде розглянута проблема керування Microgrid за умови невизначеностей та основні методи, що можуть її вирішувати.

Результати дослідження дають змогу виявити сильні та слабкі сторони кожного з розглянутих рішень та визначити, які саме вдосконалення необхідні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує велика кількість статей, присвячених опису основних принципів роботи мереж на основі Microgrid, порівняльному аналізу методів, які використовуються для прогнозного керування, а також конкретних прикладів застосування Microgrid з метою вирішення прикладних задач. Слід зауважити, що кількість статей, які містять ключове слово «microgrid» з кожним роком стає все більшою: якщо ще у 2017 році на інформаційному ресурсі ScienceDirect кількість відповідних статей становила 1143, то за весь 2025 рік їх було опубліковано 6008, тобто за 9 років кількість зросла у понад 5 разів. Це свідчить про зростаючий інтерес серед науковців до теми локальних енергосистем.

У статті «A comprehensive review on DC microgrid control and energy management strategies» авторів S.D. Sandeep, Satyajit Mohanty, Shashi Bhushan Mohanty та Pratap Sekhar Puhan зосереджується увага на питанні управління системами на базі Microgrid постійного струму (DC). У дослідженні наводяться ключові схеми керування DC microgrid (Centralized, Decentralized, Distributed, Hierarchical), а також їх особливості [2]. Окремим розділом статті є огляд класичних та заснованих на застосуванні штучного інтелекту (AI based) методів енергетичного контролю, виділяючи при цьому останні як перспективні. Зрештою, представляється перелік проблем при впровадженні Microgrid, які все ще потребують вирішення (необхідність стійких комунікаційних протоколів, масштабованість систем керування тощо).

До оглядових також можна віднести статтю «A review of intelligent control strategies for energy management systems in microgrids» авторів Mpho Sam Nkambule, Ali Nabil Hasan і Thokozani Shongwe. У ній наводиться категоризація Microgrid (Conventional, Smart), робочі режими мікромереж (Grid-Connected, Islanded) [3]. Окрема увага надається

існуючим підходам до керування електроенергетичними системами незалежно від їх типу (Stochastic, MPC, AI-driven тощо), а також оптимізації роботи. Важливою складовою статті є огляд типів потенційних кібератак на Microgrid та визначення вразливих місць мережі, що необхідно враховувати під час впровадження Microgrid.

Питання керування перетворювачами потужності за допомогою підходів droop та inner loop порушується в статті «Advanced control strategies for microgrids: A review of droop control and virtual impedance techniques». Подібно до двох попередніх розглянутих наукових праць, у цій також здійснюється огляд архітектури управління Microgrid (Centralized, Decentralized, Distributed). Проте, на відміну від інших праць, представляються аспекти управління Microgrid-мережами кожного типу: AC microgrid, DC microgrid та Hybrid (AC-DC) microgrid [4].

У статті «A review on microgrid control: Conventional, advanced and intelligent control approaches» авторів Bijayeeni Samal, Mitali Mahapatra, Swagat Pati, Manoj Kumar Debnath здійснюється детальний огляд структури та архітектури Microgrid та режимів роботи Microgrid. Значна увага приділяється методам керування Microgrid (PID controller, LQR, MPC, Reinforcement Learning тощо), а також питанню стійкості досліджуваної системи (Robust control) [5]. З погляду змісту, у цю статтю включено всі оглядові питання з теми Microgrid, притаманні розглянутим попереднім статтям, але з більшою деталізацією, що добре підходить тим, хто тільки починає працювати з Microgrid.

На основі вищенаведеного огляду можна зробити такі висновки.

- З кожним роком інтерес до Microgrid серед науковців поступово зростає, про що свідчить зростаюча кількість публікацій.
- Більшість оглядових статей зосереджена на питанні структури та архітектури Microgrid і лише деякі з них детально розглядають методи управління.
- Велика увага приділяється нерозв’язаним питанням (масштабованість, оптимізація керування, безпека), що особливо корисно для науковців, які тільки починають проводити дослідження.
- Відсутня чітка та регламентована класифікація типів Microgrid та їхніх методів, про що свідчать розбіжності у вмісті статей.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Більшість оглядових статей розглядають структуру та архітектуру мереж на основі Microgrid, а також методи керування Microgrid. Однак питанню використання методів управління Microgrid з точки зору можливих невизначеностей (uncertainty) при прогнозному керуванні приділяється дуже мало уваги. Незважаючи на те, що в деяких статтях все ж є інформація про те, як методи підходять для вирішення питання невизначеності, усе ж вона розкрита мало та досить часто губиться у великому масиві оглядової інформації.

Метою дослідження є ознайомлення з методами оптимального керування системами з Microgrid, у тому числі в умовах невизначеності, висвітлення основних проблем імплементації алгоритмів відповідних методів під час впровадження Microgrid, а також виділення переваг та недоліків кожного з розглянутих рішень. Крім того, необхідно з’ясувати невизначеності у Microgrid. Ці результати дозволять спростити процес впровадження та проєктування нових алгоритмів, які зроблять процес керування системою на основі Microgrid більш простим, масштабованим та ефективним.

Виклад основного матеріалу. Microgrid – це інтегрована система генерації, електроенергії, розподільчої інфраструктури, а також систем накопичення електроенергії (за необхідності), які дозволяють забезпечувати стабільне постачання електроенергії кінцевим споживачам. При цьому системи на базі Microgrid відрізняються від, на перший погляд, подібних за функціональністю рішень, таких як smart grids та віртуальні станції (VPP – Virtual Power Plants), двома характерними ознаками [6]:

- Microgrid включає в себе вузли генерації та навантаження з фіксованими обмеженнями;

- Microgrid може працювати в одному з двох основних режимів: мережевому (gird connected) та ізольованому (islanded).

Архітектура мережі на основі Microgrid у мережевому та ізольованому режимах роботи відповідно представлена на рисунках 1 і 2.

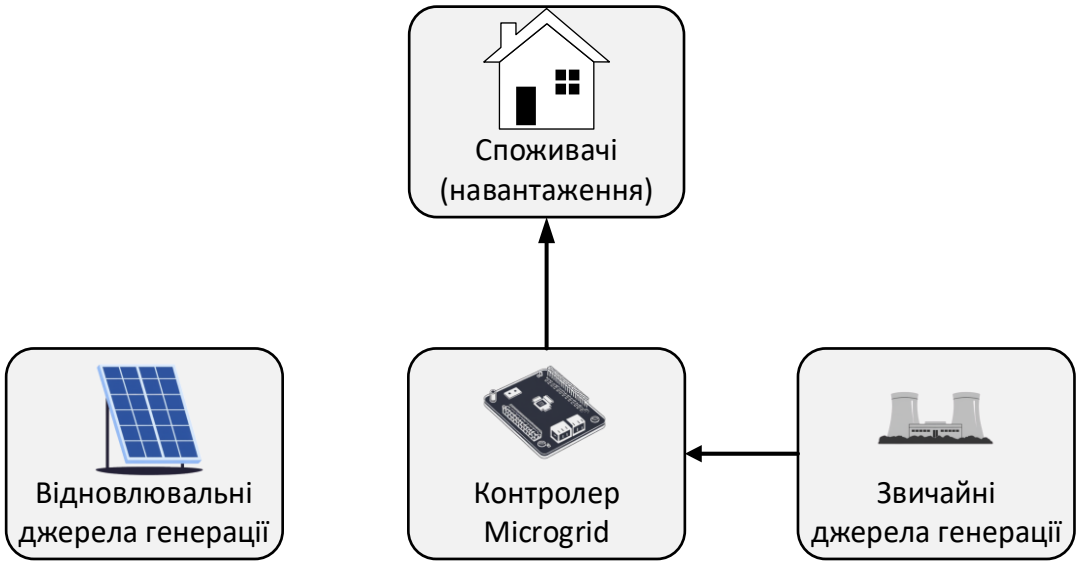


Рис. 1. Архітектура системи на основі Microgrid (мережевий режим роботи)
Джерело: розроблено авторами.

Основними компонентами системи на основі Microgrid є:

- відновлювальні джерела електроенергії (сонячні, вітрові та гідроелектростанції);
- звичайні (невідновлювальні та централізовані, як-от теплові та атомні електростанції) джерела генерації електроенергії;
- споживачі (навантаження), яким передається згенерована електроенергія;
- контролер Microgrid.

Головною складовою у Microgrid є контролер. Перелік задач контролера включає в себе забезпечення стабільного енергопостачання споживачам, перемикання між мережевим та ізольованим режимами, а також прогнозне керування всією мережею таким чином, щоб використати можливості відновлювальних джерел електроенергії і задовольнити потреби всіх споживачів.

Слід зауважити, що звичайні джерела генерації електроенергії, як правило, розміщуються поза Microgrid. Однак для кращого розуміння режимів роботи Microgrid їх слід розміщувати на діаграмах.

У випадку мережевого режиму роботи Microgrid споживачам подається електроенергія з централізованих (звичайних) джерел генерації (атомні, теплові електростанції), а відновлювальні джерела працюють у режимі накопичення електроенергії.

Однак у місцях, де забезпечити цілодобове та стабільне централізоване електропостачання неможливо, або в разі надзвичайних ситуацій, за яких нормальна функціональність звичайних джерел генерації порушується, стає у пригоді ізольований режим роботи (див. рис. 2). У цьому випадку споживачі продовжують отримувати електроенергію, але вже накопичену з відновлювальних джерел.

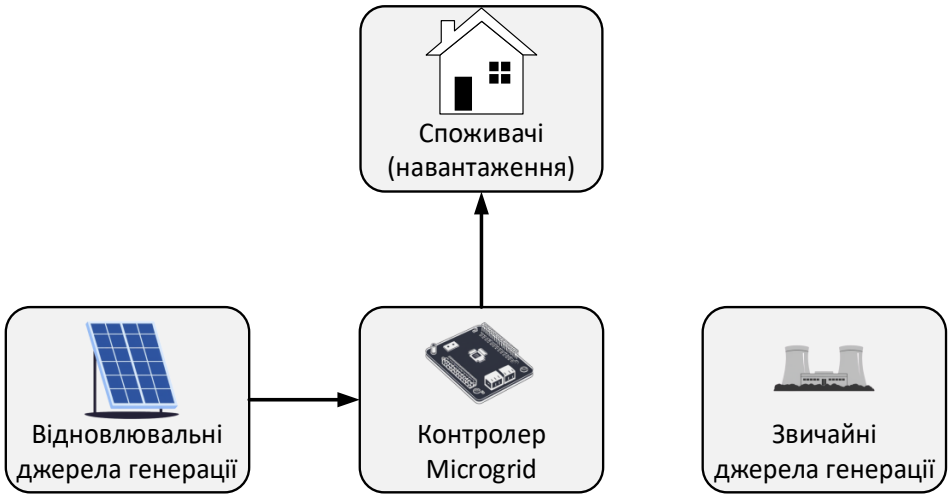


Рис. 2. Архітектура системи на основі Microgrid (ізольований режим роботи)
Джерело: розроблено авторами.

Метою прогнозного керування Microgrid є виконання обчислень на основі даних та алгоритмів, які дозволяють виконувати вибір режиму роботи на основі кількості згенерованої відновлювальними джерелами енергії, приблизного числа споживачів тощо з метою мінімізації економічних втрат. Таким чином, особливість відновлювальних джерел електроенергії – залежність від погодних умов, загальне споживання, а також потенційні проблеми з обладнанням формують невизначеність при здійсненні процесу керування мережею.

Для вирішення задачі оптимізації управління в Microgrid використовують різні алгоритми. Згідно із [5], усі відомі алгоритми оптимального керування можна поділити на 3 великі групи:

- Conventional control (традиційні);
- Advanced control (прогресивні);
- Intelligent control («розумні»).

Традиційні методи керування Microgrid (Conventional Control). До традиційних методів управління Microgrid відносять PID та LQR [5].

PID (Proportional-Integral Regulator), або PID-controller – пропорційно-інтегральний регулятор; алгоритм автоматичного керування, який має на меті підтримувати керовану величину близько до заданого значення, автоматично коригуючи при цьому керуючий вплив. Більш точного та стабільного керування системою можна досягти шляхом включення додаткових параметрів [7].

На рис. 3 представлена схема PID.

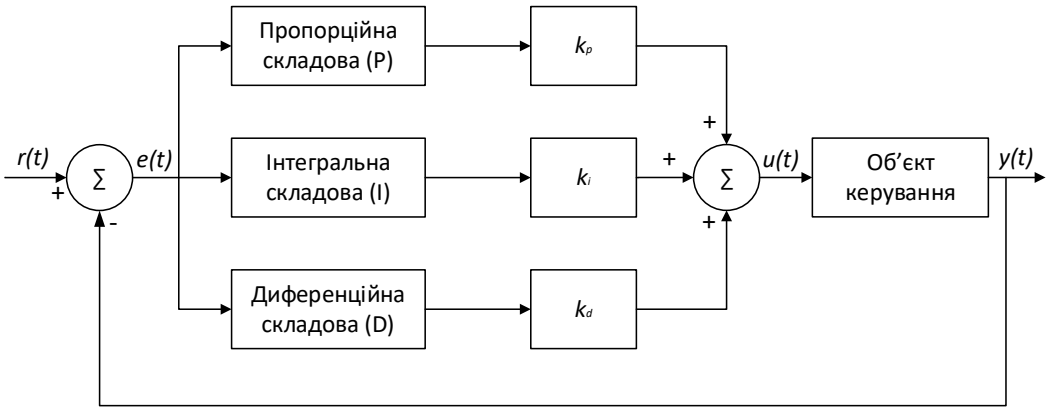


Рис. 3. Схема PID
Джерело: розроблено авторами.

Формула PID:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau)d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (1)$$

Керуючий сигнал *e(t)* обчислюється на основі похибки *e(t) = r(t) – y(t)*, де *r(t)* – задане значення, а *y(t)* – виміряне значення.

Пропорційна складова $k_p e(t)$ в (1) дає змогу реагувати на статичну похибку, що виникає у процесі роботи контролера. Чим більшим є значення похибки, то тим сильнішою є дія.

Статична похибка у рівнянні (1) усувається інтегральною складовою $k_i \int e(t)dt$. Однак, неправильно підібрані значення можуть спричинити додаткові коливання та перерегулювання.

Зрештою, диференційною складовою $k_d \frac{de(t)}{dt}$ у рівнянні (1) зменшується перерегулювання.

Загалом PID використовується в системах зі збуреннями, а також у випадках, коли модель системи є невідомою та складною. Крім того, ще однією особливістю є гнучка модифікованість, що дозволяє адаптувати PID під свої потреби. Однак, попри свою простоту та універсальність, PID чутливий до шумів і погано працює з нелінійними системами, якими зазвичай і є системи керування Microgrid. Звичайний PID не включає прогнозування, а тому вирішення невизначеності при керуванні Microgrid є обмеженим лише до невеликих збурень та помірних похибок.

Ще одним представником традиційних методів, що можуть здійснювати автоматичне керування системою є LQR.

LQR (Linear-Quadratic Regulator) – лінійно-квадратичний регулятор; підхід до автоматичного керування системою, заснований на зворотному зв’язку (feedback) від цієї ж системи, що включає в себе повний стан системи (вектор стану *x*), який використовується для здійснення подальшого управління. LQR пропонує оптимальний закон для динамічної системи, який мінімізує конкретну квадратичну функцію [8], що робить цей підхід більш пристосованим до Microgrid, ніж PID.

Схема LQR зображена на рис. 4.

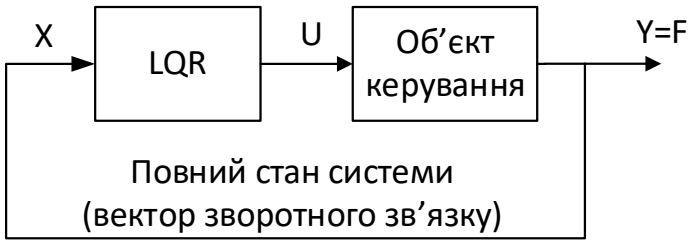


Рис. 4. Схема LQR

Джерело: розроблено авторами.

Вхідний сигнал *X* визначається на основі *F*, який є різницею між значенням на виході контролера та бажаним значенням. Сигнал *U* є керуючим.

Опис системи в LQR:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2)$$

З вектором стану системи *x* у (2) та вектором керування *u* впливають матриці *A* та *B*. *A* є матрицею стану системи, що описує взаємозв’язки між змінними стану та процес зміни системи без урахування керуючих впливів. Матриця *B* визначає, як керуючий сигнал *u* впливає на роботу стани системи, а також ефективність та напрям дії самого керування.

У LQR здійснюється пошук оптимального закону керування:

$$u(t) = -Kx(t) \quad (3)$$

K у законі керування динамічною системою (3) обчислюється на основі матриць *A* і *B*, а також матриць ваг *Q* (або *Y*, вага штрафу за відхилення стану) і *R* (або *Z*, вага штрафу за керування). *K* є рішенням алгебраїчного рівняння Ріккаті:

$$K = Z^{-1}B^{T}X \tag{4}$$

Функція вартості в LQR має наступний вигляд:

$$J = \int_{0}^{\infty} x(t)^{T} Y x(t) + x(t)^{T} Z u(t) dt \tag{5}$$

Технологія LQR широко використовується для Microgrid з метою оптимізації, мінімізації/максимізації функції вартості (cost function) для визначення найкращої стратегії керування. Однак для застосування LQR і забезпечення належної точності у Microgrid необхідною є лінеаризація моделі, оскільки Microgrid зазвичай є нелінійною системою. Крім того, LQR не враховує обмеження, що може також позначатися на оптимальності керування.

Прогресивні методи керування Microgrid (Advanced control). На відміну від традиційних методів управління, прогресивні методи підходять для реалізації системи на основі Microgrid без необхідності здійснювати модифікацію самих методів, підлаштовуючи їх під конкретну задачу. Особливо актуально це для випадку роботи з нелінійностями та невизначеностями.

Типовими методами, що належать до категорії прогресивних, є MPC та Stochastic control [5].

MPC (Model Predictive Control) – модельно-прогнозне керування; різновид автоматичного керування, який виник у кінці 1970-х років і за останні майже 50 років пройшов довгий шлях становлення та реалізації в різноманітних системах, у тому числі й Microgrid. Загалом поняття «Model Predictive Control» не позначає конкретну методику керування, а використовується для загального опису методів, які застосовують модель для визначення подальшої поведінки об'єкта керування шляхом мінімізації цільової функції (objective function) [9]. Різноманітні алгоритми MPC (такі як receding horizon Predictive Control - RHPC) відрізняються між собою моделлю, що використовується у процесі роботи, а також збуреннями (noises) і функцією втрат (cost function), яка потребує мінімізації.

На будь-якому заданому кроці MPC-контролер отримує або визначає поточний робочий стан Microgrid. Після цього він вирішує обмежену задачу оптимізації на основі внутрішньої моделі Microgrid та поточного стану системи, щоб визначити мінімальні витрати на горизонті прогнозування.

Функція витрат в MPC:

$$J = \sum_{K=0}^{N-1} \left(\left\| x_{K+1} - x_{ref,K+1} \right\|_{Q}^{2} + \left\| u_{K} \right\|_{R}^{2} \right) + \left\| x_{N} - x_{ref,N} \right\|_{P}^{2}, \tag{6}$$

У функції втрат (6) коефіцієнт *N* є горизонтом прогнозування (prediction horizon; визначає, наскільки далеко від поточного стану слід здійснювати планування поведінки системи), *K* є часовим кроком (time step). $x_{K,}$ $x_{ref\,K}$ та u_K – стан системи, відношення та значення виходу керування відповідно. $||x_{K+1} - x_{ref\,K+1}||_{q}^{2}$ – відхилення стану (state deviation; різниця між прогнозованим значенням та бажаним на кожному кроці, де матриця *Q* визначає кількість можливих варіантів). $||x_N - x_{ref\,N}||_{P}^{2}$ – кінцева вартість (terminal cost; вартість у кінці горизонту прогнозування). $||u_K||_{R}^{2}$ – зусилля керування (control effort; визначає великий вхідний сигнал керування, що може свідчити про надмірне використання виконавчих механізмів, а матриця *R* обчислює вартість використання вхідних сигналів керування). x_N – обмеження (terminal constraints; забезпечують стабільність).

Після виконання розрахунків контролером застосовується початкова дія до Microgrid, і алгоритм повторюється (рис. 5).

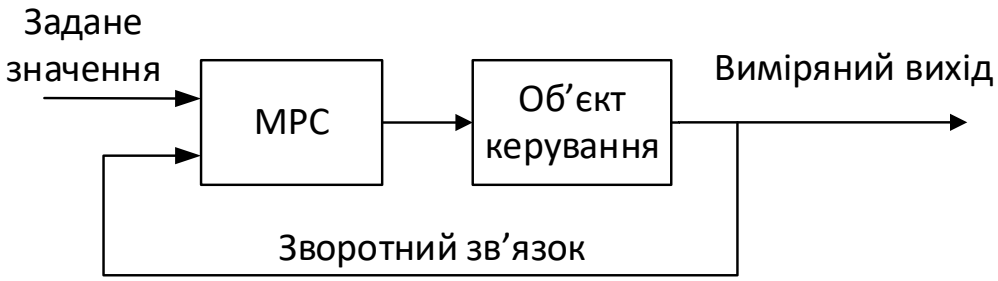


Рис. 5. Схема MPC

Джерело: розроблено авторами.

Слід зауважити, що MPC має також властивості традиційного оптимального управління, такі як достатній обсяг для роботи з Microgrid з множинними входами та виходами (multi-input multi-output), врахування часових затримок і стійкість проти помилок моделі.

Перевагами MPC є [9]:

- можливість застосування в системах, якими керують особи, що не володіють достатніми знаннями про управління системою;
- можливість застосування для керування як простими, так і складними системами, у тому числі нестабільними й з великими часовими затримками;
- здатність обробляти багатоваріантність;
- наявність feed forward control, що дає змогу компенсувати вимірювані збурення;
- легка реалізація;
- відкритість методології, яка дає змогу створювати розширення в мабутньому.

Незважаючи на значну кількість переваг MPC, похідні обчислення є більш складними порівняно з PID-controller. Звісно, якщо динамка процесу не змінюється, то прогнозування може бути здійснено заздалегідь. Однак адаптивне керування вимагає обчислень кожної ітерації, що може призвести до суттєвих втрат обчислювальних ресурсів виробничих пристроїв, які, крім цього, повинні виконувати інші робочі функції [9]. До того ж ще одним слабким місцем MPC є вимога доступності відповідної моделі, а тому модель має бути максимально точною до реального об'єкта керування. Попри свої недоліки, MPC зпшаш підходить для вирішення задачі управління Microgrid в умовах невизначеності, а самі алгоритми легко інтегруються в будь-яку систему.

Окремим випадком MPC є Economic MPC (економічний MPC, EMPC). EMPC – різновид Model Predictive Control, у якому головна мета керування має чіткий економічний зміст, а не спрямована на стабілізацію управління біля заздалегідь заданої точки [10].

Функція витрат в EMPC має такий вигляд:

$$J = \sum l(x_k, u_k) \tag{7}$$

У виразі (7) $l(x_k, u_k)$ – економічний критерій. Ним може бути енергоспоживання, собівартість продукції, ефективність процесу, енергоспоживання тощо. Оптимальний режим роботи може змінюватися з часом або бути періодичним, що і є задачею для EMPC. Крім того, цей вид керування поєднує в собі оптимізацію та керування в режимі реального часу. Прикладом EMPC в енергосистемі є мінімізація вартості електроенергії та втрат.

Для Microgrid економічний критерій може мати такий вигляд:

$$l(x_k, u_k) = c_{buy} P_{grid}(u_k) - c_{sell} P_{export}(u_k). \tag{8}$$

У (8) c_{buy} – поточна вартість купівлі електроенергії, c_{sell} – поточна вартість продажу електроенергії, $P_{grid}(u_k)$ – електроспоживання системи (залежить від сигналу керування), а $P_{export}(u_k)$ – електроспоживання, що відправляється в мережу (залежить від сигналу керування).

Ще одним поширеним способом керування, що належить до Advanced control, є Stochastic control (стохастичне керування). Характерною особливістю цього різновиду управління є його орієнтованість на керування системою в умовах невизначеності. Слід зазначити, що цей підхід інколи відносять до таких, що вирішують задачі оптимізації, який має на меті зменшення вартості управління, підвищення надійності чи ефективності системи паралельно з розв'язанням задачі керування в умовах невизначеності [11].

Невизначеності системи зазвичай виражаються у вигляді методів теорії ймовірностей. Процес прийняття рішень системою у випадку застосування Stochastic control зазвичай виконується поетапно. При цьому поточне рішення має вплив на подальші варіанти функціонування системи.

Ключовими засобами впровадження стохастичного керування в Microgrid є динамічне програмування і Марківські процеси.

Динамічне програмування (dynamic programming) – ефективний метод вирішення задач, розроблений Річардом Беллманом [12]. Його суть полягає у розкладанні однієї задачі оптимізації на декілька дрібніших, внаслідок чого одна складна задача розбивається на декілька менших і простіших. Зрештою, на основі одержаних рішень у кожній задачі виводиться загальний розв'язок задачі оптимізації. Такі поетапні обчислення чудово підходять для цифрових обчислювальних пристроїв, особливо тих, які можуть здійснювати паралельні обчислення.

Схематичне представлення суті динамічного програмування наведене на рис. 6.

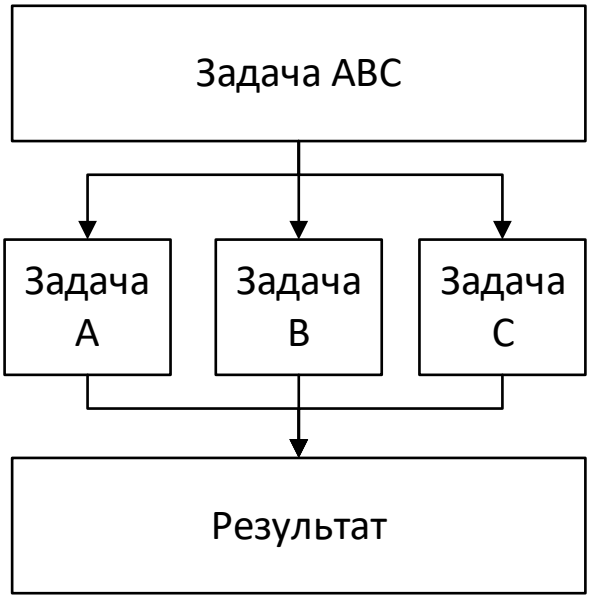


Рис. 6. Схема динамічного програмування

Джерело: розроблено авторами.

Основою динамічного програмування є рівняння Беллмана:

$$V(s) = \max_{a}[R(s,a) + \gamma \sum P(s'|s,a)V(s')]. \quad (9)$$

У рівнянні (9) s' позначає стан, a – дію, γ – фактор знижки (discount factor). $V(s')$ – функція-значення (value function), *R(s, a)* – миттєва винагорода (immediate reward), $P(s'|s,a)$ – ймовірність переходу до наступного стану.

Динамічне програмування особливо ефективне у випадках, коли прийняття рішень в системі здійснюється у чітко зазначеному порядку. Однак, динамічне програмування має і свої недоліки. Велика кількість утворених унаслідок декомпозиції підзадач вимагає більших обчислювальних ресурсів, що зменшує ефективність алгоритму та призводить до більших часових затримок. Крім того, виникають також інтерполяційні проблеми, що теж накладає свої обмеження на універсальність методу динамічного програмування [12].

Марківські процеси (Markov decision process) визначаються як керовані стохастичні процеси, що задовольняють Марківським властивостям [13]. Такими властивостями є часова (майбутній стан залежить лише від поточного, а не від попередніх), локальна (змінна умовно незалежна від усіх інших змінних, якщо відомі її безпосередні сусіди), та глобальна (дві множини змінних умовно незалежні, якщо їх розділяє третя множина в графі).

Математично Марківські процеси описується у вигляді кортежу *(S, A, T, p, r)*, де *S* – простір станів процесу, A – множина усіх можливих дій, які керують динамікою станів, *T* – множина часових проміжків прийняття рішень, *p()* – функція ймовірності переходу зі стану, *r()* – функція винагорода відповідних переходів між станами [13].

Структура Марківського процесу представлена на рисунку 7.

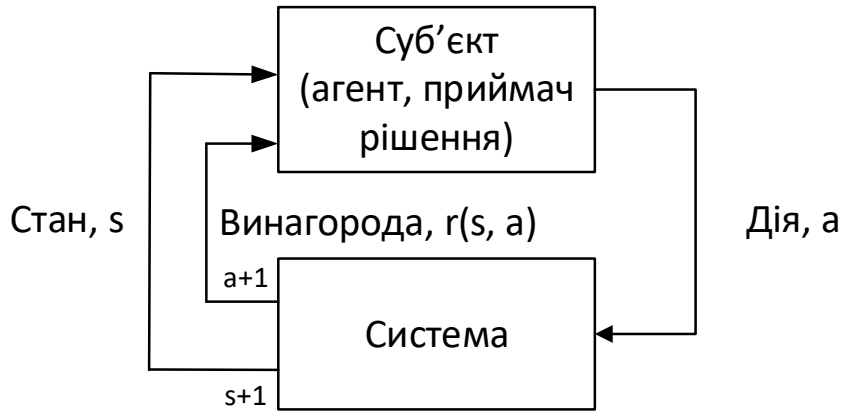


Рис. 7. Структура Марківського процесу

Джерело: розроблено авторами.

Застосування Марківських процесів дозволяє моделювати процес прийняття рішень у випадках, коли частина вихідних даних має випадковий характер, а інша частина визначається приймачем рішення. Водночас цей підхід потребує чіткого визначення усіх можливих станів та дій.

Загалом, стохастичні методи дуже добре підходять для здійснення керування Microgrid в умовах невизначеності, оскільки їх можна представити математично за допомогою числових ймовірностей. Проте обчислювальна ефективність цих методів залишається на низькому рівні через наявність численних переходів між станами та декомпозицію, що проявляється у збільшеному часі обчислень для великих і складних систем, зокрема Microgrid.

«Розумні» методи керування Microgrid (Intelligent control). Штучний інтелект (artificial intelligence) у наш час є одним із найбільш затребуваних та впроваджуваних напрямків у бізнесі та виробництвах по всьому світу [14]. Пройшовши довгий шлях від суто наукової проблеми, штучний інтелект став суттєвим допоміжним засобом у розроблених рішеннях: від надання допомоги при керуванні транспортним засобом до розсилки сповіщень про потенційно цікаві товари на основі переглянутих на вебсайті зразків.

Таким чином, штучний інтелект може використовуватися не лише як кінцевий продукт, а і як допоміжний засіб при проєктуванні чогось нового. Зокрема, методи, які працюють на засадах AI лежать в основі різноманітних алгоритмів оптимізації. Це також стосується і алгоритмів керування Microgrid.

З технічного погляду штучний інтелект – сукупність інформаційно-обчислювальних засобів для вирішення задач та прийняття рішень шляхом здобуття нового та використання вже накопиченого досвіду системи подібно до того, як працює людський мозок [14]. Система на основі штучного інтелекту здебільшого здатна засвоювати нову інформацію, систематизувати наявні знання і використовувати їх для вирішення задач, а не лише виконувати записану програмістом функцію.

Велику роль у штучному інтелекті відіграють нейронні мережі. Нейронні мережі – це особливий тип комп'ютерних алгоритмів, які допомагають розв'язувати дуже складні завдання, подібні до тих, які ми розв'язуємо, міркуючи та ухвалюючи рішення. Ці мережі назвали так через їхню схожість зі структурою людського мозку – нейронною мережею. З біологічного погляду, мозок людини складається з великої кількості нейронів – нервових клітин, які здатні приймати, обробляти та відправляти далі інформацію у вигляді електричних та хімічних сигналів. Інформація передається від одного нейрона до іншого, що таким чином утворює складні зв'язки та дає змогу людському мозку діяти відповідно до того, які саме нейрони були збуджені. Нейрон містить у своєму складі два важливих компоненти: дендрити, що приймають сигнали від інших нейронів, та аксон, задачею якого є передача сигналу до іншого нейрона. Саме завдяки аксонам і дендритам можливою є передача інформації через довгі ланцюжки нейронів. Однак для того щоб нейрон «збудився», необхідне перевищення певного порогового значення.

Математична модель нейрона подібна до біологічної за своєю суттю. Вона зображена на рис. 8.

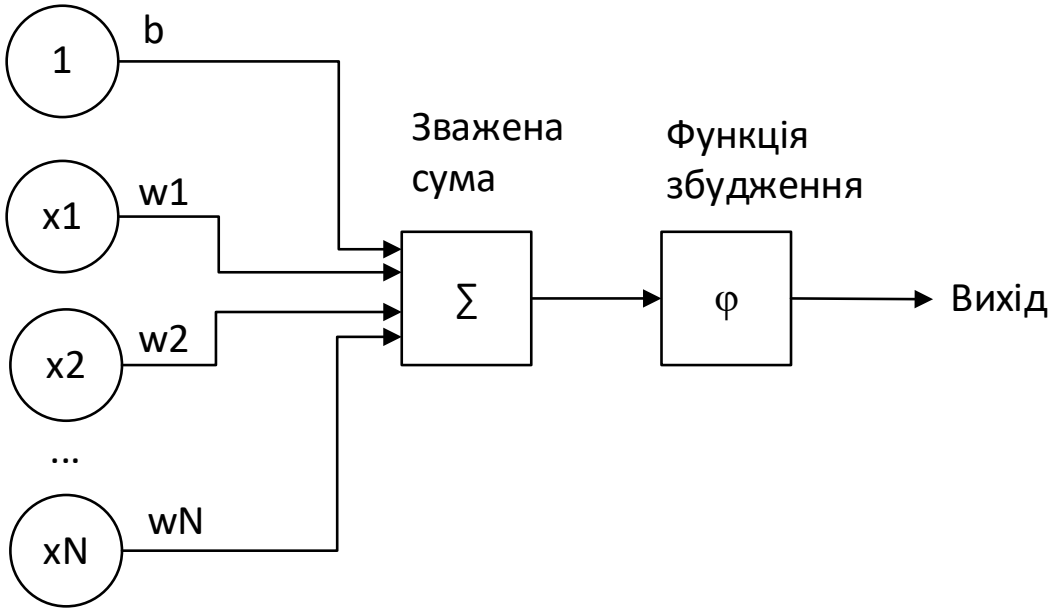


Рис. 8. Математична модель нейрона

Джерело: розроблено авторами.

Математичні нейрони представляються у вигляді вузлів із заданими коефіцієнтами.

$$sum = \vec{X}^T \vec{W} + \vec{B} = \sum_{i+1}^{n} x_i w_i + b \tag{10}$$

$$output = \varphi(sum) \tag{11}$$

Функція збудження (Activation function) обчислює значення від параметра - суми добутків вхідних нейронів на відповідні коефіцієнти (зважена сума (Weighted sum function), 10). Ця функція використовується для визначення того, чи досяг нейрон порогового значення активації (11).

Реальні штучні нейронні мережі можуть бути багатошаровими. За допомогою різноманітних методів, як-от метод зворотного поширення помилки, можливим є самонавчання системи, зокрема Microgrid, з метою подальшого управління на основі відгуку, який дає система.

Для навчання нейронних мереж застосовують алгоритми машинного навчання (Machine Learning). Машинне навчання досліджує методи та алгоритми навчання нейронних мереж з метою прийняття рішень і прогнозування поведінки об'єкта за рахунок самостійного вдосконалення [15]. У машинному навчанні важливу роль відіграють дані. Чим більше даних надходить до системи, яка навчається, тим більш «розумною» та досвідченою є ця система, а отже, дає змогу приймати більш раціональні та ефективні рішення.

Існує 4 типи машинного навчання:

- навчання з учителем (Supervised Learning);
- навчання без учителя (Unsupervised Learning);
- навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning);
- напівкероване навчання (Semi-supervised Learning).

Навчання з учителем здійснюється під контролем людини. Для того, щоб навчити систему, припустимо, розпізнавати образи, відповідні зображення-приклади повинні містити мітки – правильні відповіді, що є індикатором правильності «міркувань» системи. Перевагою цього типу машинного навчання є забезпечення надійного контролю над процесом навчання системи завдяки нагляду людини. Проте ручний контроль може бути затратною в часі операцією, а тому не є оптимальним рішенням у випадку великих обсягів даних для навчання.

За некерованого навчання, або навчання без учителя алгоритм, за яким навчається нейронна мережа, сам здійснює пошук ознак і відмінностей між ними. На відміну від навчання з учителем, цей спосіб машинного навчання не передбачає зовнішнього втручання та контролю людини, а тому відповідальність за «успішність» навчання системи повністю покладається на саму систему. Цей тип навчання є більш економним з погляду зусиль людини, проте точність роботи системи може бути меншою.

Проміжним рішенням між навчанням з учителем та без учителя є напівкероване навчання. Частково допомога в навчанні системи надається людиною, а частково алгоритм працює сам.

Навчання з підкріпленням дає змогу навчити систему (приймача рішень) вибудовувати оптимальну стратегію за рахунок отримання винагород (rewards) та штрафів (penalties) або оцінок на основі «успішності» навчання системи. Такий підхід дозволяє більш гнучко навчати систему, однак оцінки як результати навчання потребують адекватного визначення.

У Microgrid серед підходів Intelligent control широко використовують Reinforcement Learning та Genetic Algorithms.

Навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning) знайшло застосування у Microgrid у таких задачах, як передбачення споживчого навантаження (load forecasting), оптимізація енергоресурсів (energy optimization), торгівля енергоресурсами (energy trading), а також виявлення збоїв у роботі (defect detection). Отже, основним призначенням Reinforcement Learning є його використання для вирішення невизначеностей споживання, параметрів струму і напруги, робочих режимів тощо у Microgrid.

Як уже зазначалося вище, машинне навчання засноване на великих обсягах даних. Усі дані, що надходять до алгоритму Reinforcement Learning, потребують очищення, вилучення неповних даних і нормалізації [16]. Сам алгоритм повинен пройти процес навчання з використанням попередньо оброблених даних. Цей процес включає в себе ітеративне коригування параметрів моделі до тих пір, поки не будуть досягнуті точні прогнози. Крім того, велику роль відіграє втручання в роботу моделі час від часу з метою отримання надійних прогнозів.

Слід також зазначити, що Reinforcement Learning у Microgrid може використовуватися разом із фізичними моделями в складі гібридних моделей (Hybrid), маючи на меті досягнення більш ефективного та надійного керування Microgrid і формуванні точніших прогнозів, з урахуванням яких і буде працювати система [17].

Загалом, навчання з підкріпленням є чудовим підходом до навчання нейронної мережі для керування роботою Microgrid в умовах невизначеностей, які представляються у вигляді великої кількості шарів нейронів мережі та ймовірностей переходу від одного шару до іншого. До того ж штучний інтелект активно розвивається у наш час, а отже, відповідні алгоритми машинного навчання є перспективними з погляду майбутнього вдосконалення. Проте існуючі нині алгоритми машинного навчання вимагають додаткових часових затримок на здійснення навчання моделі та не усувають повністю необхідність втручання людини.

Окрему увагу слід звернути на категорію алгоритмів керування Microgrid, які засновані на еволюційних обчисленнях. Такі алгоритми отримали назву генетичних.

Генетичні алгоритми (Genetic Algorithms) – загальна назва алгоритмів оптимізації та навчання нейронних мереж, які імітують біологічну еволюцію (природний відбір, схрещування, мутації тощо) для знаходження кращих рішень у складних задач та здійснення оптимізації. Існує багато варіантів генетичних алгоритмів, які відрізняються між собою незначними деталями. Проте спільним для всіх алгоритмів цієї категорії є наявність двох базових етапів: відбору (selection), під час якого відбувається виділення кращих рішень у популяції, а також етап формування нового покоління рішень (replacement) на основі схрещування попередніх [18]. З кожною новою ітерацією генетичного алгоритму набір рішень покращується, і внаслідок зміни кількох поколінь (здійснення кількох ітерацій) можливим є знаходження оптимального рішення, яке задовольняє поставленим умовам задачі.

Спершу в генетичному алгоритмі створюється початкова випадковим чином сформована сукупність рішень-кандидатів – популяція рішень (population). Далі визначається, наскільки кожне з рішень у популяції – індивід (individual), задовольняє кінцевому рішенню. Зміст індивіда в генетичному алгоритмі полягає в можливому варіанті рішення. Індивід представляється у вигляді обчислювальної структури даних, яка називається хромосомою (chromosome), що кодується у вигляді набору символів фіксованої довжини. Кожен символ є представленням біологічного гена. Під видами (species) розуміють окремих індивідів, об’єднаних спільною характеристикою. Наступним кроком алгоритму є схрещування (crossover, crossing over) кількох відібраних на етапі відбору рішень між собою, створюючи таким чином нових нащадків. Для урізноманітнення знайдених рішень генетичні алгоритми здійснюють мутацію (mutation), яка полягає у зміні окремих генів відібраних індивідів. Процедури схрещування та мутації визначаються імовірностями. Після остаточного формування нового покоління рішень алгоритм переходить до нової ітерації, починаючи із перевірки рішень на оптимальність.

Загальна схема однієї повної ітерації генетичного алгоритму наведена на рис. 9.

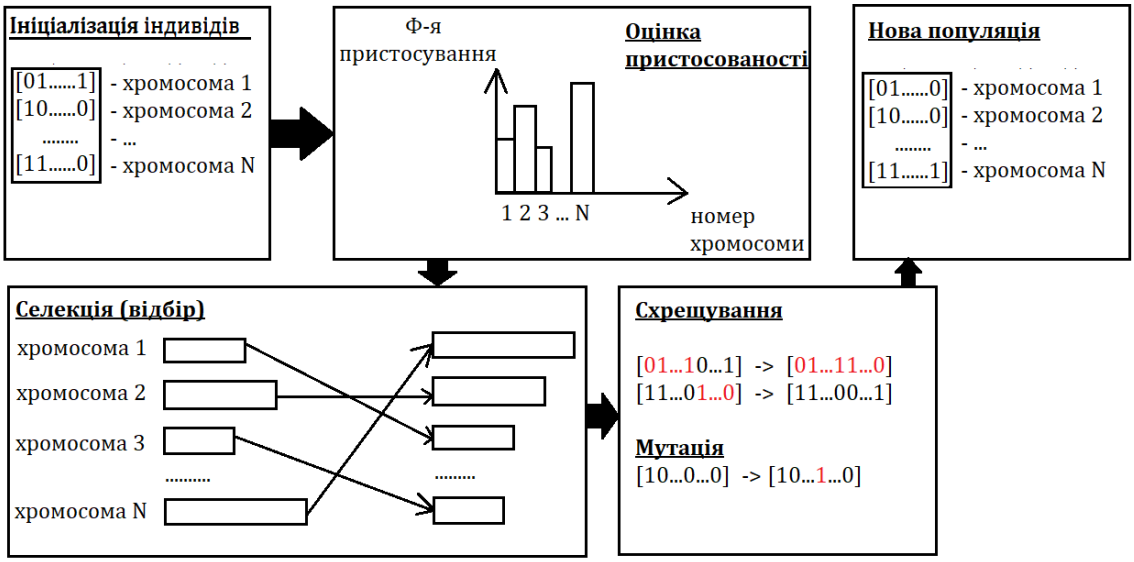


Рис. 9. Загальна схема повної ітерації генетичного алгоритму
Джерело: розроблено авторами.

Генетичні алгоритми є особливим способом вирішення задач оптимізації. Завдяки різноманітності отримуваних рішень, генетичні алгоритми здатні вирішувати задачі, які можуть містити декілька оптимальних рішень. До того ж генетичні алгоритми ефективні у випадку, коли кількість можливих розв'язків є надто великою для повного їх перебору. Вони добре підходять для вирішення задачі планування ресурсів, зокрема в мережі на базі Microgrid, а також здійснення прогнозного керування в умовах невизначеності. Крім того, генетичні алгоритми легко інтегруються до будь-якої системи. Проте, необхідним є чітке визначення початкової множини розв'язків та їх математичне представлення у вигляді хромосом. Ще одним недоліком генетичного алгоритму є складність обчислень та порівняно низька обчислювальна ефективність, оскільки інколи для пошуку оптимального рішення потрібно здійснювати кілька десятків ітерацій, що вимагає більших апаратних затрат.

Отже, навчання з підкріпленням та генетичний алгоритм добре працюють з невизначеністю. Однак спільним їхнім недоліком є знижена обчислювальна ефективність з огляду на необхідність здійснювати велику кількість ітерацій у деяких випадках для пошуку оптимального рішення задачі.

Порівняння методів керування Microgrid. Кожна із розглянутих груп алгоритмів по-своєму вирішує завдання керування Microgrid в умовах невизначеності.

Спільною рисою традиційних методів керування, таких як PID і LQR є їх простота реалізації та необхідність модифікації з метою інтеграції в систему, яка працює в умовах невизначеності.

Доцільність застосування прогресивних методів керування залежить від конкретного методу. У випадку MPC відповідний алгоритм легко інтегрувати в існуючу систему, але обробка невизначеності не є основною задачею, яку вирішує даний метод. Якщо ж розглядати стохастичні методи – динамічне програмування і Марківські процеси, то вони найкраще серед усіх підходять для керування системою в умовах невизначеності з огляду на те, що невизначеність зручно представляти математично у вигляді ймовірності, але через наявність декомпозиції їх обчислювальна ефективність може бути дуже низькою.

Перспективними є «розумні» методи керування Microgrid, зокрема навчання з підкріпленням. Штучний інтелект активно розвивається, а тому обчислювальна ефективність відповідних методів теж може вдосконалюватися в подальшому. Генетичні алгоритми мають знижену обчислювальну ефективність, обумовлену великою кількістю ітерацій для пошуку оптимальних рішень, але можуть добре вирішувати невизначеності, якщо оптимальних рішень декілька.

Таким чином, постає задача розробки алгоритму керування Microgrid в умовах невизначеності, який би раціонально виконував основну задачу – здійснення оптимального керування за невизначеності, а також мав би високу обчислювальну ефективність і легко інтегрувався в будь-яку систему. Розглянуті алгоритми не є досконалими: ті, що добре обробляють невизначеність, мають низьку обчислювальну ефективність, а ті, що легко інтегруються, мають гіршу адаптованість до прогнозного керування і т. ін.

Висновки. У статті проаналізовано типові методи та алгоритми, які дозволяють здійснювати оптимальне керування Microgrid з акцентом на їхню ефективність в умовах невизначеностей та нелінійних систем. Обґрунтовано доцільність та логічність поділу всіх існуючих методів управління на 3 великі групи: Conventional control (традиційні та прості в реалізації методи, як-от PID і LQR), Advanced control (більш складні методи, наприклад MPC та Stochastic control) й Intelligent control (методи, засновані на засадах штучного інтелекту й еволюційних обчислень, такі як Reinforcement Learning та Genetic Algorithm). Найбільш перспективними методами визнано представників Intelligent control, хоча їх обчислювальна ефективність ще не є досконалою. Методи PID і LQR є простими в реалізації, але погано підходять для керування Microgrid в умовах невизначеності. Прогнозне керування на основі MPC легко інтегрується в будь-яку систему, може працювати з невизначеностями, однак обчислювальна ефективність, як і призначеному для роботи з uncertainty Stochastic control, залишається на низькому рівні.

Виокремлено основні невизначеності, які існують в системах на основі Microgrid: невизначеність обсягу згенерованої електроенергії відновлювальних джерел, неивзначеність обсягу споживання, невизначеність робочого режиму, невизначеності параметрів струмів і напруг окремих вузлів.

Виділено 3 якісні характеристики методів оптимального керування Microgrid: ефективність при роботі з невизначеностями, обчислювальна ефективність і легкість інтеграції.

На основі здійсненого аналізу зроблено висновок про важливість розробки методу прогнозного керування Microgrid, який би був легкоінтегрованим, мав високу обчислювальну ефективність і міг би належним чином працювати в умовах невизначеності.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на аналіз статистичних даних, які би давали загальну оцінку споживання електроенергії окремими електроприладами, на основі чого можна виділити певні тенденції споживачів електроенергії і використати ці дані як основу майбутнього алгоритму прогнозного керування Microgrid.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті

Під час написання статті автори використовували генеративний ШІ-інструмент Canva AI image generator (https://www.canva.com/ai-image-generator/) для створення ілюстративних картинок складових Microgrid на рисунках 1 і 2. Після використання цього інструменту автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Zhang, P. (2024). *Microgrids: Theory and practice*. https://www.google.com.ua/books/edition/Microgrids/Uvj6EAAAQBAJ.

2. Sandeep, S.D., Mohanty, S., Mohanty, S.B & Puhan, P.S. (2025). A comprehensive review on DC microgrid control and energy management strategies. *Results in Engineering, 26* https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105479.

3. Nkambule. M.S., Hasan. A.N. & Shongwe. T.. (2025). A review of intelligent control strategies for energy management systems in microgrids. *Energy Conversion and Management: X*. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101323.

4. Yogithanjali Saimadhuri, K. N., & Janaki, M. (2025). Advanced control strategies for microgrids: A review of droop control and virtual impedance techniques. *Results in Engineering*, *25*, 103799. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103799.

5. Samal, K.B., Mahapatra, M., Pati, S & Debnath, M.K. (2026). A review on microgrid control: Conventional, advanced and intelligent control approaches. *Unconventional Resources. Volume 9.* https://doi.org/10.1016/j.uncres.2025.100297.

6. Guyer, J. P. (2021). *An introduction to electric power microgrids*. The Clubhouse Press. https://www.google.com.ua/books/edition/An_Introduction_to_Electric_Power_Microg/HvQuEAAAQBAJ.

7. Guillermo, J., Aniruddha, D. & Shankar, P. (2005). *PID Controllers for Time-Delay Systems*. Birkhauser Boston. https://www.google.com.ua/books/edition/PID_Controllers_for_Time_Delay_Systems/gpE5Mae-RlAC.

8. Chacko, S. J., P. C., N., & Abraham, R. J. (2024). Optimizing LQR controllers: A comparative study. *Results in Control and Optimization, 14*, 100387. https://doi.org/10.1016/j.rico.2024.100387.

9. Camacho, E. F., & Alba, C. B. (2013). *Model predictive control*. Springer. https://www.google.com.ua/books/edition/Model_Predictive_Control/tXZDAAAAQBAJ.

10. Ellis, M., Liu, J., & Christofides, P. D. (2016). *Economic model predictive control: Theory, formulations and chemical process applications*. Springer. https://www.google.com.ua/books/edition/Economic_Model_Predictive_Control/U0zADAAAQBAJ

11. Yamashita, D.Y., Vechiu I. & Gaubert J.. (2020). A review of hierarchical control for building microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews. 118.* https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109523.

12. Luus, R. (2000). *Iterative Dynamic Programming*. CRC Press. https://www.google.com.ua/books/edition/Iterative_Dynamic_Programming/NWYWUgmx7EoC.

13. Sigaud, O. & Buffet, O. (2010). *Markov Decision Process in Artificial Intelligence*. Wiley. https://www.google.com.ua/books/edition/Markov_Decision_Processes_in_Artificial/2J8_-O4-ABIC.

14. Introduction to Artificial Intelligence. (2020). IndraStra Global. https://www.google.com.ua/books/edition/Introduction_to_Artificial_Intelligence/1L8OEAAAQBAJ.

15. Machine learning: Concepts, methodologies, tools and applications. (2011). Information Resources Management Association. https://www.google.com.ua/books/edition/Machine_Learning_Concepts_Methodologies/1GWcHmCrl0QC.

16. Alaelddin, F. M., Sultan S.M., Lee, J. & Lim, S. (2023). Deep-reinforcement-learning-based IoT sensor data cleaning framework for enhanced data analytics, *Sensors 23 (4) 1791*. https://doi.org/10.3390/s23041791.

17. Pinosky, A., Abraham, I., Broad, A., Argall B. & Murphey, T.D. (2023). Hybrid control for combining model-based and model-free reinforcement learning, *Int. J. Robot Res. 42 (6)*, 337–355. https://doi.org/10.1177/02783649221083331.

18. Chambers L. (1995). *The Practical Handbook of Genetic Algorithms*. CRC Press. https://www.google.com.ua/books/edition/The_Practical_Handbook_of_Genetic_Algori/JOavDwAAQBAJ.

References

1. Zhang, P. (2024). *Microgrids: Theory and practice*. https://www.google.com.ua/books/edition/Microgrids/Uvj6EAAAQBAJ.

2. Sandeep, S.D., Mohanty, S., Mohanty, S.B & Puhan, P.S. (2025). A comprehensive review on DC microgrid control and energy management strategies. *Results in Engineering, 26* https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105479.

3. Nkambule. M.S., Hasan. A.N. & Shongwe. T.. (2025). A review of intelligent control strategies for energy management systems in microgrids. *Energy Conversion and Management: X*. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101323.

4. Yogithanjali Saimadhuri, K. N., & Janaki, M. (2025). Advanced control strategies for microgrids: A review of droop control and virtual impedance techniques. *Results in Engineering*, *25*, 103799. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103799.

5. Samal, K.B., Mahapatra, M., Pati, S & Debnath, M.K. (2026). A review on microgrid control: Conventional, advanced and intelligent control approaches. *Unconventional Resources. Volume 9.* https://doi.org/10.1016/j.uncres.2025.100297.

6. Guyer, J. P. (2021). *An introduction to electric power microgrids*. The Clubhouse Press. https://www.google.com.ua/books/edition/An_Introduction_to_Electric_Power_Microg/HvQuEAAAQBAJ.

7. Guillermo, J., Aniruddha, D. & Shankar, P. (2005). *PID Controllers for Time-Delay Systems*. Birkhauser Boston. https://www.google.com.ua/books/edition/PID_Controllers_for_Time_Delay_Systems/gpE5Mae-RlAC.

8. Chacko, S. J., P. C., N., & Abraham, R. J. (2024). Optimizing LQR controllers: A comparative study. *Results in Control and Optimization, 14*, 100387. https://doi.org/10.1016/j.rico.2024.100387.

9. Camacho, E. F., & Alba, C. B. (2013). *Model predictive control*. Springer. https://www.google.com.ua/books/edition/Model_Predictive_Control/tXZDAAAAQBAJ.

10. Ellis, M., Liu, J., & Christofides, P. D. (2016). *Economic model predictive control: Theory, formulations and chemical process applications*. Springer. https://www.google.com.ua/books/edition/Economic_Model_Predictive_Control/U0zADAAAQBAJ

11. Yamashita, D.Y., Vechiu I. & Gaubert J.. (2020). A review of hierarchical control for building microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews. 118.* https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109523.

12. Luus, R. (2000). *Iterative Dynamic Programming*. CRC Press. https://www.google.com.ua/books/edition/Iterative_Dynamic_Programming/NWYWUgmx7EoC.

13. Sigaud, O. & Buffet, O. (2010). *Markov Decision Process in Artificial Intelligence*. Wiley. https://www.google.com.ua/books/edition/Markov_Decision_Processes_in_Artificial/2J8_-O4-ABIC.

14. Introduction to Artificial Intelligence. (2020). IndraStra Global. https://www.google.com.ua/books/edition/Introduction_to_Artificial_Intelligence/1L8OEAAAQBAJ.

15. Machine learning: Concepts, methodologies, tools and applications. (2011). Information Resources Management Association. https://www.google.com.ua/books/edition/Machine_Learning_Concepts_Methodologies/1GWcHmCrl0QC.

16. Alaelddin, F. M., Sultan S.M., Lee, J. & Lim, S. (2023). Deep-reinforcement-learning-based IoT sensor data cleaning framework for enhanced data analytics, *Sensors 23 (4) 1791*. https://doi.org/10.3390/s23041791.

17. Pinosky, A., Abraham, I., Broad, A., Argall B. & Murphey, T.D. (2023). Hybrid control for combining model-based and model-free reinforcement learning, *Int. J. Robot Res. 42 (6),* 337–355. https://doi.org/10.1177/02783649221083331.

18. Chambers L. (1995). *The Practical Handbook of Genetic Algorithms*. CRC Press. https://www.google.com.ua/books/edition/The_Practical_Handbook_of_Genetic_Algori/JOavDwAAQBAJ.

Дата першого надходження статті до видання: 04.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.03.2026

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

UDC: 621.3

Bohdan Velihorskyi[1], Maksym Khomenko[2]

[1]PhD student of the Department of Electronics, Automatics, Robotics and Mechatronics
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: bogdan_vel@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0008-4492-4156
Google Scholar: https://scholar.google.com/citations?user=LTc0_2UAAAAJ&hl=en

[2]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electronics, Automatics, Robotics and Mechatronics
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: mr.homax@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-9084-3527
Google Scholar: https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=3K50Dg8AAAAJ

MICROGRID CONTROL METHODS UNDER UNCERTAINTY

From the end consumer`s point of view stable 24/7 energy supply is one of the most crucial needs in XXI century. With stationary thermal power plants and substations' damage and their aging, the new challenges for electric power systems engineers are arisen, leading to the need of incorporating decentralized and smart solutions. Microgrids is one of the examples of these solutions, consisting of distributed energy sources.

The importance of renewable energy sources, provided by solar or wind power plants is increased in microgrids. However, renewable energy sources are not available anytime and anywhere, which is caused by weather changes. Furthermore, energy consumers' activity is not constant through the time. This is where uncertainty in microgrids is arisen. One of the ways of overcoming uncertainty in microgrids is incorporating the predictive control based on various control methods.

The actual researches in microgrids clarify the lack of works describing challenging uncertainty in microgrids.

The purpose of the article is to familiarize with methods of optimal control of microgrid systems, including uncertainty, to highlight the main problems of implementing algorithms of the corresponding methods during the implementation of Microgrid, as well as highlighting the advantages and disadvantages of each of the solutions. In addition, it is necessary to clarify the uncertainties in microgrid. These results will simplify the process of implementation and design of new algorithms that will make the process of controlling a system based on microgrid simpler, scalable and effective.

As the result of work, the common reasons of uncertainty in microgrid solutions are explained. Microgrid control methods and approaches in terms of working with uncertainty are analyzed. Division all microgrid control methods into three groups (Conventional, Advanced and Intelligent) is justified. Commonly used methods for microgrids control are compared in terms of integration difficulty, efficiency and working with uncertainty.

Obtained results can be helpful for future researches related to microgrids and predictive control methods.

Keywords: *uncertainty; predictive control; microgrid; renewable energy sources; model-predictive control; reinforcement learning; optimal control.*

Fig.: 9. References: 18.

Велігорський Б. О., Хоменко М. А. Методи керування microgrid в умовах невизначеності. *Технічні науки та технології,* 2026. № 2(44). С. 466-483. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-466-483.

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-484-498
УДК 351.86

Віталій Іванович Зацерковний[1], Ігор Романович Ніколюк[2]

[1]доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри геоінформатики
Київський національний університет імені Тараса Шевченка ННІ «Інститут геології» (Київ, Україна)
E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0003-5187-6125. **Scopus ID:** 57200165109

[2]аспірант
Київський національний університет імені Тараса Шевченка ННІ «Інститут геології» (Київ, Україна)
E-mail: nikoliuk.igor@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0006-0750-2603. **Researcher ID:** rid105343

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ПОШКОДЖЕНЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ ВІД ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНОЛОГІЙ ГІС ТА ДЗЗ

Військові дії на території України призвели до масштабної механічної деградації ґрунтового покриву на сотнях тисяч гектарів родючих земель. Розглянуто застосування технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для ідентифікації та оцінки площ сільськогосподарських угідь, забруднених вибухонебезпечними предметами (ВНП). Запропоновано підхід до інтеграції супутникових даних, безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та методів математичного моделювання для створення карт ризику та визначення пріоритетності розмінування. Особливу увагу приділено використанню спектральних індексів, машинного навчання та геоінформаційних систем (ГІС).

Представлені підходи до розробки методики оцінки пошкоджень сільськогосподарських угідь, спричинених ВНП. Запропоновано комплексну систему оцінювання, яка враховує фізичні, хімічні та економічні наслідки забруднення земель. Обґрунтовано необхідність впровадження стандартизованих підходів для ефективного відновлення аграрного сектору.

Ключові слова: *дистанційне зондування Землі (ДЗЗ); вибухонебезпечними предметами (ВНП); сільськогосподарські угіддя; машинне навчання; геоінформаційні системи (ГІС); екологічні пошкодження.*

Рис.: 12. Бібл.: 17.

Актуальність теми дослідження. Військові дії на території України призвели до масштабного забруднення сільськогосподарських земель вибухонебезпечними предметами (ВНП) та деградації ґрунтового покриву на сотнях тисяч гектарів родючих земель. Деградація супроводжується порушенням структури ґрунту, зміною його фізико-механічних властивостей та зниженням родючості. В умовах обмеженого доступу до небезпечних територій традиційні методи польових досліджень стають малоефективними або взагалі неможливими.

Для забезпечення безпечного та оперативного моніторингу стану сільськогосподарських угідь в умовах триваючої війни на перший план виходять сучасні геоінформаційні технології (ГІТ) та методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які дозволяють фіксувати просторові аномалії та розраховувати площі зруйнованих ділянок без фізичної присутності на об'єкті, що свідчить про актуальність теми дослідження.

Постановка проблеми. В умовах військових дій, що тривають на території України, значні площі сільськогосподарських угідь зазнають механічних, фізичних та хімічних пошкоджень, які проявляються у вигляді порушення структури ґрунту, деградації рослинного покриву, зміни вологості та мікрорельєфу, а також потенційного забруднення ВНП, включно з вибуховими вирвами, уламками боєприпасів і продуктами детонації [14,15]. Наявність ВНП – мін, нерозірваних авіаційних і артилерійських боєприпасів, касетних елементів, гранат та інших залишків війни що не вибухнули або залишилися після бойових дій, унеможливлює повноцінне використання угідь, призводить до деградації ґрунтового покриву, зниження врожайності та зростання соціально-економічних ризиків для сільських громад. Це створює довготривалу загрозу життю населення, функціонуванню аграрного сектору та екологічній безпеці держави [8].

Видалення ВНП супроводжується рядом перешкод, які ускладнюють процес їх виявлення, ідентифікації та знешкодження (природними умовами, глибоким заляганням або маскуванням ВНП у ґрунті, наявністю великої кількості металевих уламків і сторонніх предметів, які залишаються після бойових дій і призводять до хибного спрацьову-

© В. І. Зацерковний, І. Р. Ніколюк, 2026

вання, непередбачуваним станом ВНП, великими площами забруднених територій, недостатньою кількістю спеціалізованої техніки, необхідністю дотримання суворих вимог безпеки та значними витратами часу і ресурсів. Ще однією проблемою є втрата або відсутність картографічних матеріалів або інформації про типи використовуваних наземних мін або райони, де вони були встановлені.

У таких умовах особливої актуальності набуває впровадження сучасних геоінформаційних технологій та методів дистанційного зондування Землі, які дозволяють здійснювати оперативне, просторово безперервне та безконтактне отримання інформації про зміни земельних ресурсів без безпосереднього доступу до потенційно небезпечних територій, що особливо важливо в умовах воєнних дій та обмеженого доступу людей до контрольованих площ загрозу життю та здоров'ю дослідників, а також наявність мінно-вибухових ризиків.

Мета дослідження: просторовий аналіз земель пошкоджених ВНП, розробка підходів до ідентифікації та кількісної оцінки сільськогосподарських угідь, пошкоджених внаслідок військових дій з використанням вегетаційного індексу NDVI та проведення кількісної оцінки зруйнованих земель з використанням технологій ГІС.

Об'єкт дослідження: стан сільськогосподарських угідь, що зазнали механічного руйнування ВНП внаслідок ведення інтенсивних бойових дій.

Предмет дослідження: нормалізований диференційний вегетаційний індекс – NDVI в задачах ідентифікації механічних пошкоджень сільськогосподарських угідь від ВНП.

Вихідні дані: мультиспектральні супутникові знімки Sentinel-2A [10] та Planet Scope [16], знімки надвисокої розрізненості Google Earth Pro, програмне забезпечення QGIS, глобальний класифікатор земного покриву Land Cover, векторні дані OpenStreetMap.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема деградації ґрунтів унаслідок бойових дій та впливу ВНП є предметом активних досліджень як в Україні, так і за кордоном. Сучасні наукові підходи до оцінки таких змін охоплюють комплекс методів, що дозволяють вивчати фізичні, хімічні та біологічні трансформації ґрунтового покриву. Питання оцінки деградації та пошкодження ґрунтів ВНП розглядали ряд українських науковців, серед яких можна виділити праці Білого Т., Бончковського О., Дем'янюк О., Мазур С., Поляченко І., Симочко Л., Сплодитель А., Солохи М. та ряду інших. Серед зарубіжних науковців виділимо Giacomo Certini, Riccardo Scalenghe, William I. Woods Paulo Pereira, Damia Barceló, Tamás Stadler**,** Ágoston Temesi**,** Zoltán Lakner, David R. Montgomery, Joseph P. Hupy**,** Thomas Koehler та інші.

У їхніх дослідженнях висвітлюються процеси механічного руйнування ґрунтового профілю, зміни фізико-хімічних властивостей, а також накопичення токсичних речовин, що негативно впливають на екологічний стан територій і їхню господарську придатність. Незважаючи на значну кількість наукових публікацій, присвячених цій проблематиці, вона залишається недостатньо вивченою та потребує подальших комплексних і детальних досліджень.

Виклад основного матеріалу. Сільське господарство є фундаментальною основою глобальної продовольчої безпеки у світі. Для України, яка має унікальний фонд найродючіших ґрунтів у Європі та історично була одним із ключових гарантів глобальної продовольчої стабільності, збереження сільськогосподарських угідь має надзвичайно важливе значення. Однак військові дії, які розгорнулися на території України призвели до масштабних руйнувань природного середовища, зокрема значних площ земель сільськогосподарського призначення.

Вплив інтенсивних бойових дій на сільськогосподарські угіддя має комплексний характер і призводить до кількох основних видів деградації ґрунтового покриву. Зокрема, виділяють механічний, фізичний та хімічний впливи [6].

ВНП становлять значну загрозу для життя і здоров'я населення, а також для об'єктів інфраструктури та навколишнього середовища. А їх чутливість до вибуху з часом або під впливом атмосферних чинників посилює небезпеку для людей [12].

На рис. 1. представлена динаміка жертв від ВНП в Україні 2013-2025 рр.

Механічний вплив на ґрунти проявляється насамперед через безпосереднє руйнування ґрунтового покриву та засмічення території. За даними дослідження ГО «Екодія», основними чинниками цього виду деградації є утворення вирв (бомботурбація), рух важкої військової техніки та масове розлітання осколків, що призводить до змін гранулометричних фракцій та руйнування верхнього родючого шару ґрунту. Цей шар, що формується століттями, є ключовим для сільського господарства та збереження екосистем.

Вибухи також викидають у ґрунт токсичні сполуки, включаючи вуглекислий газ, закис азоту, водяну пару, формальдегід, пари ціаніду та інші токсиканти. Ці речовини не тільки знижують якість ґрунту, але й можуть мігрувати у водні системи, загрожуючи здоров'ю людей і тварин, повільно отруюючи організми [9].

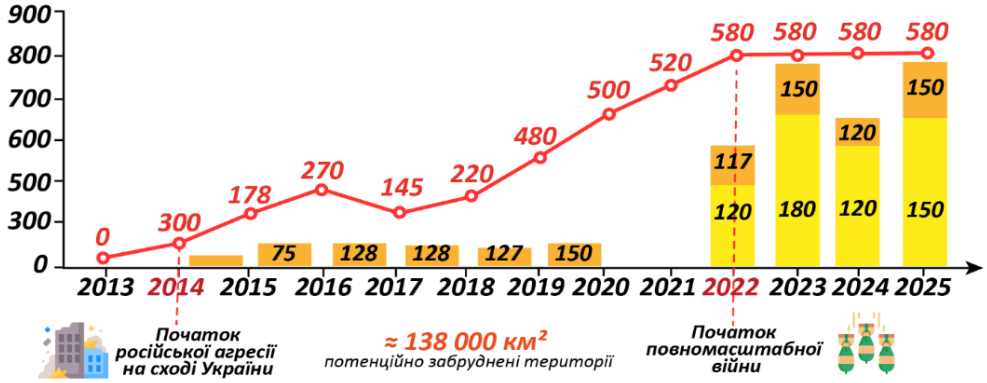


Рис. 1. Динаміка жертв від ВНП в Україні 2013-2025 рр.

Джерело: [13; 17; 4].

Хімічний вплив стосується токсичного забруднення ґрунтів небезпечними сполуками, що виділяються в результаті детонації. У районах ведення бойових дій спостерігається значне підвищення вмісту важких металів у ґрунтах – подекуди їх концентрації можуть перевищувати природний фон у десятки разів. Додаткову загрозу становлять численні уламки боєприпасів, які залишаються після вибухів. Зокрема, артилерійські снаряди калібру 120 мм утворюють приблизно 1600–2350 фрагментів, а калібру 152 мм — до 2700–3500 уламків масою від 1 грама і більше. Матеріалом для виготовлення оболонок таких боєприпасів зазвичай є чавун із додаванням сталі, до складу якого входять не лише залізо та вуглець, але й домішки сірки, міді та інших елементів. Після вибуху ці речовини потрапляють у ґрунт, де можуть поступово переміщуватися в нижчі горизонти, досягаючи ґрунтових вод [5].

У результаті розриву боєприпасів будь-якого калібру відбувається часткова хімічна реакція, що призводить до забруднення ґрунтів та атмосфери. Окрім відносно безпечних CO_2 та водяної пари, у процесі окиснення 1 кг вибухівки в повітря потрапляє кілька десятків куб. м токсичних газів: SO2, NOx, CO. Урешті, з атмосфери оксиди сірки та нітрогену повернуться в ґрунт через кислотні дощі, які змінюють pH ґрунту та викликають опіки рослин. Виходить, ґрунт стає кінцевою ланкою хімічного ураження боєприпасами [3].

Забруднення ґрунтів паливно-мастильними матеріалами та іншими нафтопродуктами відбувається внаслідок руху та пошкоджень сухопутної військової техніки. Фахівці констатують, що у ґрунтах, просочених паливно-мастильними матеріалами, знижується водопроникність, витісняється кисень, порушуються біохімічні та мікробіологічні процеси. Внаслідок цього погіршується водний, повітряний режими та колообіг поживних речовин, порушується кореневе живлення рослин, гальмується їхній ріст і розвиток, що спричиняє загибель [5].

Твердий нафтовий парафін досить важко руйнується й окислюється на повітрі. Він надовго може заблокувати всі пори ґрунтового покриву, позбавивши ґрунт можливості вільного вологообміну і дихання. Це, передусім, призводить до повної деградації біоценозу. Шкідливий екологічний вплив смолисто-альфальтенових компонентів на ґрунтові екосистеми полягає не в хімічній токсичності, а в значній зміні водно-фізичних властивостей ґрунтів. Якщо нафта просочується згори, її смолисто-асфальтенові компоненти сорбуються переважно у верхньому, гумусовому горизонті, іноді міцно цементуючи його. При цьому зменшується поровий простір ґрунтів [1].

Фізичний вплив військових дій полягає у глибокій зміні структурних властивостей ґрунтового покриву, що проявляється насамперед через вібраційне та теплове навантаження. Потужні енергетичні імпульси від детонації боєприпасів і постійні вібрації від руху важкої техніки спричиняють критичне ущільнення ґрунту, витискання вологи, утворення порожнин та деформацію мікрорельєфу. Водночас інтенсивний тепловий вплив від порохових і вихлопних газів руйнує гранулометричний та агрегатний склад землі, порушуючи її термічний і водний режими. Це призводить до кисневого голодування ґрунтових мікроорганізмів та різкого зниження біорізноманіття [6].

Таким чином, військові дії завдають катастрофічної шкоди сільськогосподарським угіддям. Через вибухові кратери, ущільнення ґрунту важкою технікою та сильне хімічне забруднення родючі поля перетворюються на небезпечні пустки. Вирощувати на них безпечну продукцію стає просто неможливим. У майбутньому це неминуче призведе до величезних фінансових втрат: щоб відновити ці землі, знадобляться десятиліття розмінування та рекультивації ґрунту, що призведе до колосальних економічних збитків.

Розробка методики використання МДЗ для виявлення пошкоджень на сільськогосподарських угіддях.

В умовах воєнного стану та масового замінювання територій традиційні польові дослідження ґрунтів стають вкрай небезпечними, дороговартісними, а подекуди – фізично неможливими. Тому для проведення ідентифікації та моніторингу пошкоджених земель активно використовуються методи дистанційного зондування Землі. Застосування мультиспектральних знімків дозволяє фіксувати механічні руйнування ґрунтово-рослинного покриву забезпечуючи геометричну локалізацію уражених ділянок для подальшого розрахунку площ та економічних збитків.

Для виявлення пошкоджених полів фахівцями широко застосовується нормалізований диференційний вегетаційний індекс – NDVI. Він базується на здатності здорової рослинності інтенсивно поглинати червоне світло для фотосинтезу та сильно відбивати ближнє інфрачервоне випромінювання і розраховується за формулою:

$$NDVI=\frac{NIR-RED}{NIR+RED}, \quad (1)$$

де NIR – ближнє інфрачервоне світло; Red – видиме червоне світло.

Фізичний зміст використання NDVI для пошуку артилерійських вирв та траншей полягає в тому, що вибух миттєво знищує зелену біомасу, викидаючи на поверхню оголений мінеральний ґрунт. Це призводить до різкого локального падіння значень індексу в епіцентрі вибуху порівняно зі здоровим посівом навколо, що дозволяє математично відділити пошкоджені ділянки від вцілілого поля.

Прикладом ефективного застосування цього індексу є дослідження вітчизняних фахівців щодо геопросторового аналізу пошкоджень від війни на території сільськогосподарських угідь Запорізької області. Дослідники застосували комплексний підхід: на рівні кожного окремого поля обчислювалася відносна різниця індексу NDVI (dNDVI) за найкоротший проміжок часу до та після ймовірного пошкодження. В результаті вдалося виявити різноманітні ураження угідь: вирви від артилерійських вибухів, сліди руху військової техніки, вигорілі ділянки та масштабні фортифікаційні споруди [2].

У межах дослідження було використано мультиспектральні знімки середньої розрізненості Sentinel 2A (10 м) та високої розрізненості Planet Scope (3 м) [16], які вже пройшли атмосферну та геометричну корекції. Використання знімків такої розрізненості дає можливість виявляти території з концентраціями воронок від розривів снарядів, окремі сліди авіаційних ударів, зони ущільнення ґрунтового покриву внаслідок пересування військової техніки, а також масштабні фортифікаційні споруди (рис. 2).

Також, при завантаженні знімків важливо вибирати період з середини весни до середини осені для захоплення рослинності на різних стадіях росту. Протягом цього часу рослинність служить чітким індикатором механічного впливу на ґрунт, дозволяючи простежити такий вплив крізь нерівномірний рослинний покрив.

Як приклад використання запропонованої методики були використані землі сільськогосподарського призначення на території Бучанського району Київської області, які стали місцем найінтенсивніших фаз бойових дій на початку повномасштабного вторгнення, що спричинило масштабні артилерійські обстріли як населених пунктів, так і сільськогосподарських угідь.



а) *б)*

Рис. 2. Вирви від вибухів на території Бучанського району:
а) на RGB знімку Sentinel 2A;
б) на RGB знімку Planet Labs

Джерело: розроблено авторами.

Внаслідок бойових дій фіксувалися руйнування інфраструктури, а також деградація ґрунтового покриву, зокрема через утворення воронок від снарядів, механічне порушення структури ґрунту та його ущільнення військовою технікою.

Територія дослідження представлена на рис. 3.

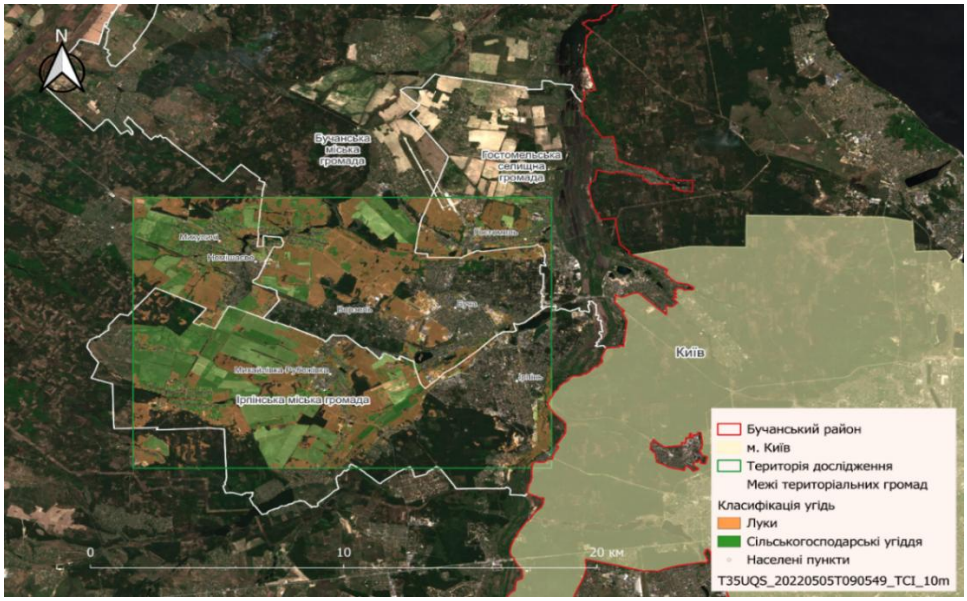


Рис. 3. Територія дослідження

Джерело: розроблено авторами.

Для цього дослідження було використано 8-ми канальні супутникові знімки Planet Scope [16]. При цьому здійснювався суворий відбір знімків, у результаті якого завантажено безхмарні знімки, а ідентичні календарні дати: 11.05.2021 року (довоєнний період) та 11.05.2022 року (стан після деокупації регіону).

Для цього дослідження було використано метод визначення часових змін шляхом обчислення різниці нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (dNDVI) між двома роками:

$$dNDVI = NDVI(2021)-NDVI(2022). \quad (2)$$

Суть цього підходу полягає у математичному порівнянні стану ґрунтово-рослинного покриву на тій самій території до початку бойових дій та після їх завершення.

Безпосередня процедура геоінформаційного аналізу в програмному середовищі QGIS складалася з кількох послідовних етапів підготовки та обробки просторових даних.

Спершу здійснено інтеграцію завантажених знімків до проєкту ГІС. З використанням інструмента «Калькулятор растрів» (Raster Calculator) для обох часових зрізів (2021 та 2022 років) було розраховано NDVI.

Оскільки об'єктом даного дослідження є виключно сільськогосподарські угіддя, виникла необхідність просторово ізолювати цільові території від інших класів земель. Для вирішення цієї проблеми було завантажено та інтегровано актуальний растровий класифікатор земного покриву Land Cover (рис. 4).

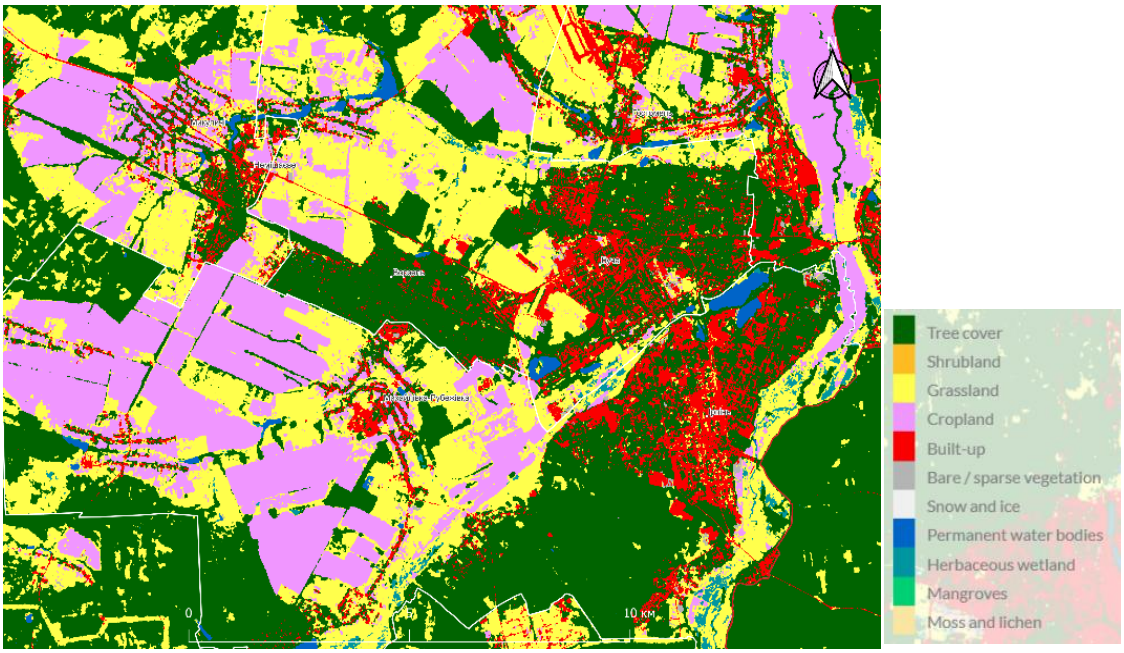


Рис. 4. Класифікація земельних угідь на території Бучанського району [11] (за даними ESA, 2026)

За допомогою інструментів перекласифікації та фільтрації з усього масиву даних було виокремлено та залишено лише класи трав'янистої рослинності та орних земель. Це дозволило створити базову маску сільськогосподарських угідь.

Також, використовуючи векторні об’єкти з OpeenStreetMap, було вилучено також території, які попадають під населені пункти для того, щоб також не допустити ріллю на території присадибних ділянок.

В результаті було отримано значення NDVI виключно на території сільськогосподарських угіддях (рис. 5).



а) б)

Рис. 5. Розрахований індекс NDVI для території дослідження станом на: а) 11 травня 2021 року; б) 11 травня 2022 року

Джерело: розроблено авторами

Також для ідентифікації додатково використовувались знімки надвисокої розрізненості з Google Earth Pro, де можна детальніше переглянути пошкоджені землі (рис. 6). На основі візуального дешифрування було зафіксовано, що для вирв характерні значення NDVI біля від 0,2 до 0,45.



а *б*

в

Рис. 6. Територія біля аеропорту «Антонов»: а – на моделі NDVI станом на 11.05.2021; б – на моделі NDVI станом на 11.05.2022; в – на знімку Google Earth станом на 04.2022

Джерело: розроблено авторами.

Використовуючи *формулу (1)* було розраховано різницю dNDVI між 2021 та 2022 роками. Визначено, що значення різниці індексу, які становлять 0,1 і більше, з високою ймовірністю відповідають осередкам повного або часткового знищення рослинності внаслідок бойових дій.

Для автоматизації процесу виділення цих зон в інструменті «Калькулятор растрів» було проведено бінарну класифікацію отриманого растра dNDVI. За допомогою логічного виразу (dNDVI >= 0,1) масив даних було розділено на два класи: пікселям із показником падіння вегетації менше ніж 0,1 було присвоєно значення «0» (неушкоджена територія або природний фон), тоді як пікселі зі значенням 0,1 та вище отримали значення «1» (зона пошкодження, вирва). Отриманий растровий шар було перетворено в векторний з використанням відповідних інструментів.

Отриманий первинний векторний шар потребував додаткового експертного коригування. Хоча поріг відсікання ≥ 0,1 дозволив виділити основний масив пошкоджень, до результатів класифікації потрапила певна кількість хибних просторових аномалій. З рис. 3.5 бачимо, що під такі ж значення, що і пошкоджені снарядами ділянки потрапили суцільні поля. Головною причиною цього стали агротехнічні зміни на полях, зокрема потрапляння до маски ділянок із відкритим (голим) ґрунтом. Якщо у базовому 2021 році поле перебувало на стадії активної вегетації, а у 2022 році було зоране (рис. 7).

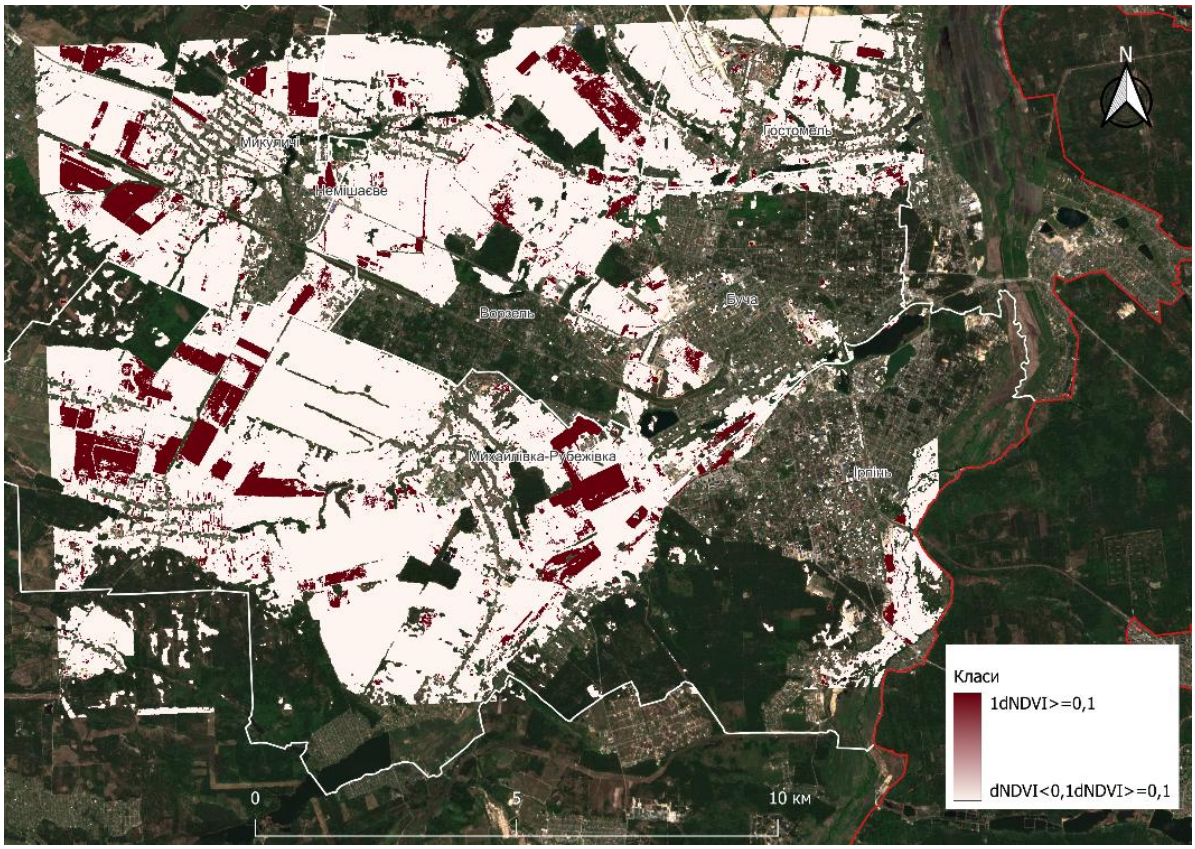


Рис. 7. Результат клисифікації dNDVI

Джерело: розроблено авторами.

Отже, надалі отриманого векторного об’єкта було вилучено клас «0», тобто неушкоджених земель та вручну вилучені об'єкти, які за математичними показниками потрапили в зону пошкоджень (dNDVI ≥ 0,1), але фактично не були пов'язані з військовими діями, використовуючи при цьому для порівняння знімки надвисокої розрізненості. До таких хибних об’єктів можна віднести залишки вологих низин та природні нерівномірності сходів культур.

У кінці було отримано векторний шар, який складається з 5540 об’єктів, які позначають певні пошкодження, укріплення або сліди проїзду важкої техніки, загальною площею 709412,63 км^2 або 70,9412 га (рис. 8).

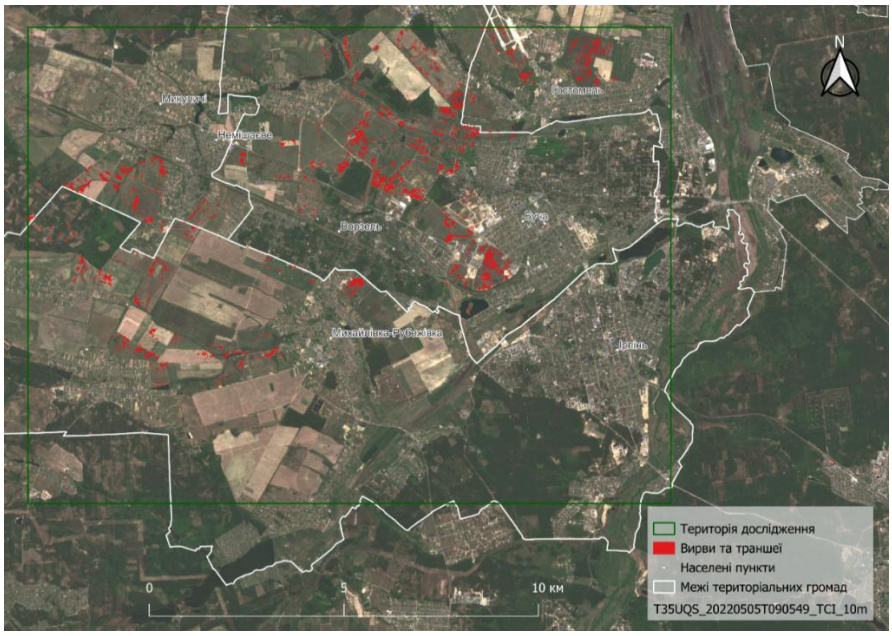


Рис. 8. Пошкоджені сільськогосподарські угіддя внаслідок артилерійських обстрілів, будування укріплень та проїзду важкої техніки

Джерело: розроблено авторами.

Попри отримані кількісні результати та просторову візуалізацію пошкоджень, використаний метод не можна впевнено назвати абсолютно дієвим. Одним із «підводних каменів» є фактор сівозміни. Якщо у 2021 році на ділянці фіксувалася активна вегетація (наприклад, посіви озимих культур), а у 2022 році це ж поле перебувало у стані відкритої зораної ріллі, вегетаційний індекс закономірно демонструє різке падіння. Програмний алгоритм хибно ідентифікує таку різницю між вегетацією та голим ґрунтом як зону масованого механічного ураження, оскільки математичний показник dNDVI долає встановлений поріг ($\geq 0{,}1$).

Другим об’єктом застосування методики стала територія Дегачівської міської територіальної громади Харківської області (рис. 9).

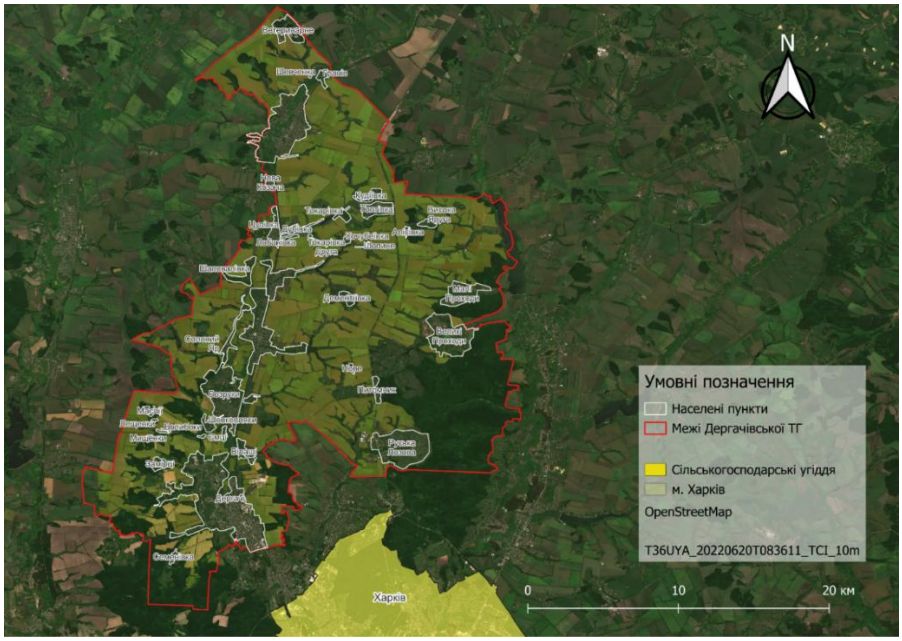


Рис. 9. Дергачівська міська територіальна громада Харківської області

Джерело: розроблено авторами.

Дергачівська міська громада Харківської області, як прикордонна зона з перших днів повномасштабного вторгнення зазнала інтенсивних артилерійських обстрілів із застосуванням ствольної артилерії, реактивних систем залпового вогню та мінометів. Унаслідок таких обстрілів значних пошкоджень зазнали не лише житлові території, але й агроландшафти. Зокрема, біля с. Безруки 2 вересня 2022 року фіксувалися численні пожежі сухої рослинності на площах понад 1 га, що є типовим наслідком артилерійських ударів по відкритих територіях, включаючи поля та пасовища [7].

Для дослідження було використано мультиспектральний знімок Sentinel 2A за 20 червня 2022 року та 25 червня 2020 року. У 2021 році в червні всі знімки характеризуються високим значенням хмарності, тому за альтернативу обрано підхожий знімок 2020 року. Далі проведений аналогічний алгоритм пункту 3.1 з визначення різниці значень NDVI за 2020 та 2022 роки за формулою (2).

Візуально переглядаючи результати, можна чітко помітити світлі плями на тлі сільськогосподарських полів із густою рослинністю. Порівняння з супутниковими знімками Google Earth підтверджує, що ці ділянки відповідають воронкам (рис. 10).



а *б*

в

Рис. 10. Порівняння території, що зазнала інтенсивних обстрілів:
а – на моделі NDVI станом на 25.06.2020; б – на моделі NDVI станом на 20.06.2022;
в – на знімку Google Earth станом на 06.2022

Джерело: розроблено авторами.

Емпіричним шляхом було встановлено, що показники NDVI в епіцентрах ідентифікованих вирв коливаються в межах від 0,15 до 0,40. При цьому розрахована різниця індексів (dNDVI) між 2020 та 2022 роками для цих же уражених ділянок продемонструвала надзвичайно широкий діапазон значень: від 0,01 до 0,40. Такий великий розкид математичних показників робить метод порогового відсікання вкрай ненадійним. Зниження порогу dNDVI до мінімальної межі з метою захоплення всіх фактичних вирв неминуче призводить до масового включення в результати хибних об'єктів.

З метою усунення цих недоліків для Дергачівської громади було застосовано інший метод – просторова фільтрація локальних аномалій на основі одного актуального знімка (за 20 червня 2022 року). Суть цього підходу полягає у пошуку різких просторових перепадів значень вегетації (артефактів) у межах одного поля шляхом порівняння кожного пікселя з його безпосереднім оточенням. Це виконується із застосуванням Simple filter плагіну SAGA в QGIS з метод фільтрації Mean (середнє), який усереднює пікселі й робить знімок "мильним". Після цього для виявлення локальних аномалій в «Калькуляторі растра» було знайдено різницю між отриманим щойно згладженим растром та розрахованим раніше NDVI за 2022 рік.

З отриманого на виході растра встановлено, що значення на рівні 0,05 і вище з високою достовірністю відповідає реальним осередкам влучань снарядів. Відповідно до цього критерію, за допомогою логічного виразу отриманий растр аномалій було розділено на два класи: пікселям із різницею менше ніж 0,05 було присвоєно значення «0» (неушкоджена фонова територія), тоді як пікселі з різницею 0,05 та більше отримали значення «1» (зона пошкодження).

Візуальне порівняння отриманого бінарного растра зі знімками надвисокого розрізнення показало, скупчення пікселів, що потрапляють у зону «1» з високою точністю збігаються з розташуванням артилерійських вирв у межах сільськогосподарських полів. Однак також до пошкоджених потрапила велика кількість лісосмуг. Це пояснюється тим, що на межі відкритого поля та густої деревної рослинності виникає різкий природний перепад спектральних характеристик (рис. 11). Проте велика кількість лісосмуг у зоні бойових дій використовувалася як природні лінії укриття і дійсно зазнала суттєвих артилерійських руйнувань, ця тематика потребує окремих досліджень.

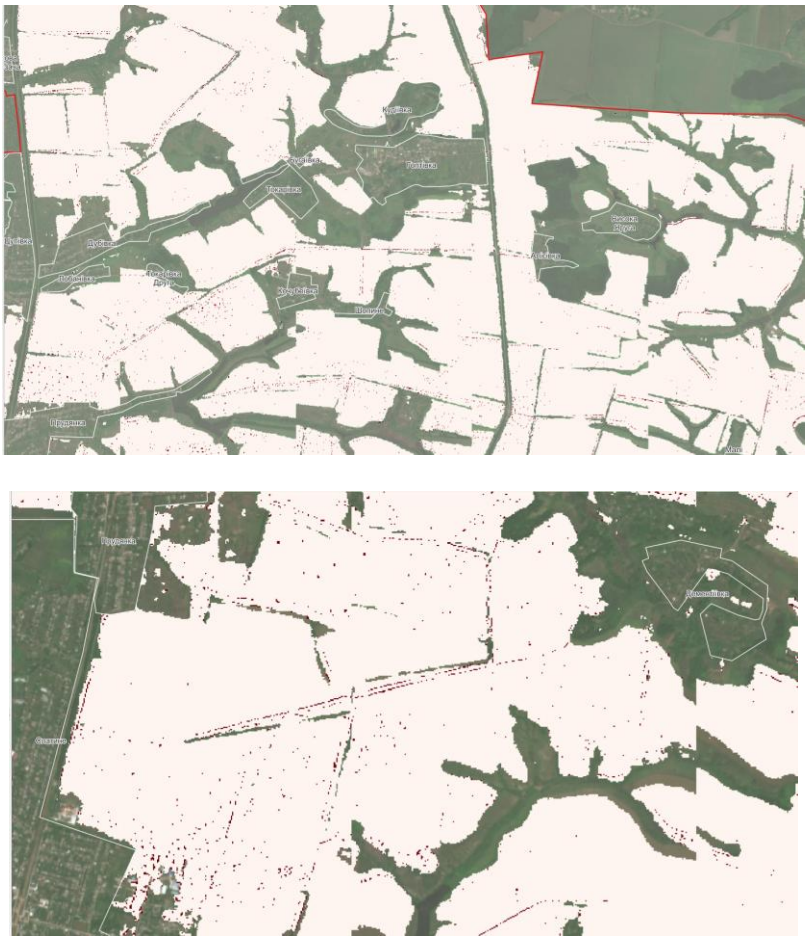
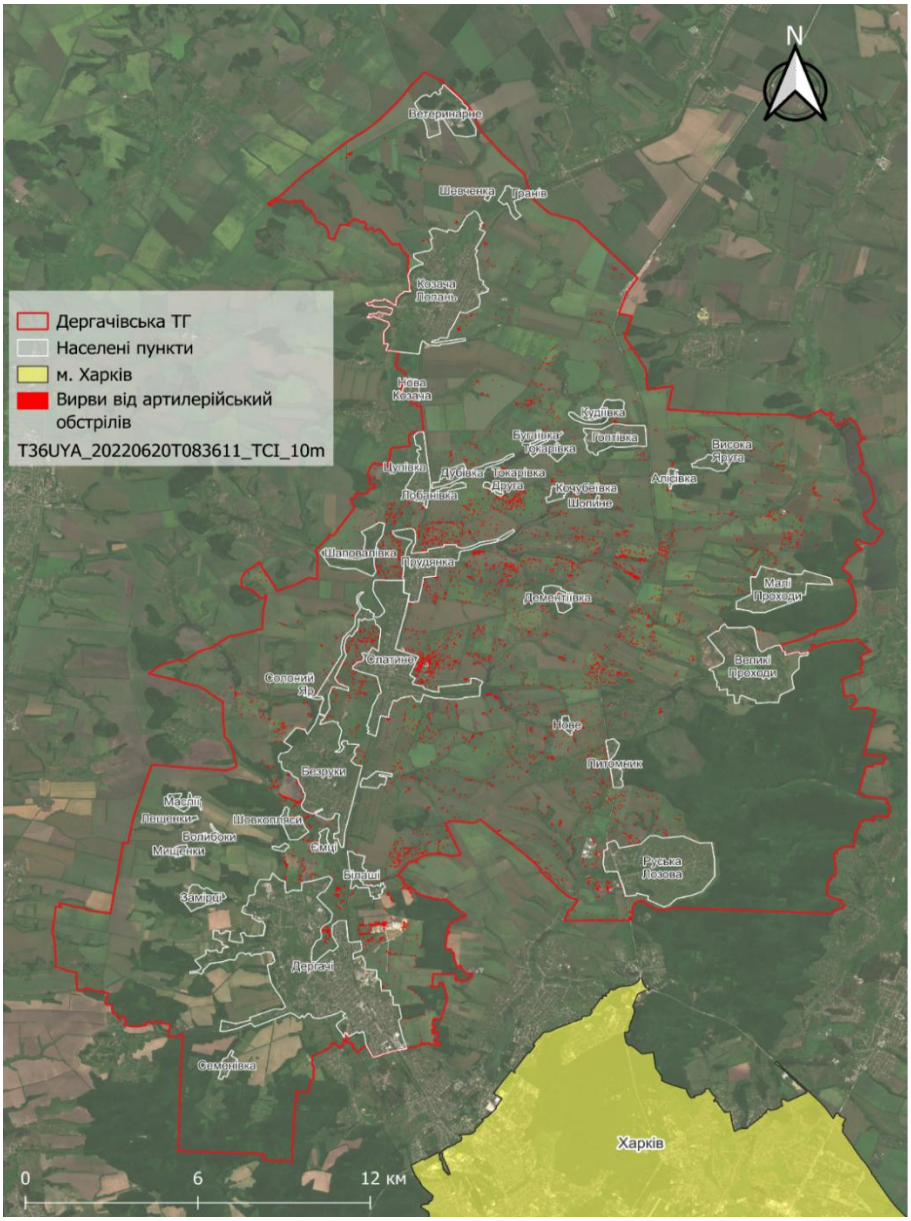


Рис. 11. Результат використання методу знаходження локальних аномалій
Джерело: розроблено авторами.

Для вирішення цієї проблем бінарний растр було векторизовано і проведене ретельне ручне коригування: вектори, які накладалися на лісосмуги були вилучені. В результаті у фінальному наборі даних залишилися контури, які з великою ймовірністю належать механічним руйнуванням ґрунту на території сільськогосподарських угідь (рис. 12).

У результаті відкоригований шар мітить 4961 векторний об’єкт, що ідентифікуються, як механічні пошкодження від артобстрілів із загальною площею 720950,6 м^2 або 72,0951 га.


N
Дергачівська ТГ
Населені пункти
м. Харків
Вирви від артилерійський обстрілів
T36UYA_20220620T083611_TCI_10m
Ветеринарне
Шевченка
Гранів
Козача Лопань
Нова Козача
Кудіївка
Гопівка
Булдики
Гончарівка
Мерефа
Дубівка
Тожарівка
Друга
Побірченка
Кочубеївка
Шелюне
Висока Яруга
Алфіївка
Шаповалівка
Прудянка
Мерефа
Мерефа
Мерефа

Висновки. Виконано комплекс геоінформаційних робіт з оцінки механічного пошкодження сільськогосподарських угідь внаслідок військових дій.

Проведено ідентифікація пошкоджених земель на території Бучанського району методом визначення часових змін (dNDVI) . Обчисливши різниці індексу вегетації за 2021 та 2022 роки було ідентифіковано масив цих земель. За порогового значення dNDVI 0,1 виділено 5540 векторних об'єктів пошкоджень. Проте, виникла проблема в чутливості цього методу до фактору сівомін. До порогового значення окрім уражених зон також потрапляють зорані землі, що в результаті вимагає додаткового ретельного експертного коригування.

Визначено пошкоджені угіддя на території Дергачівської громади з використанням методу просторової фільтрації локальних аномалій на основі одного знімка за 2022 рік. Алгоритм пошуку різких просторових перепадів із порогом відсікання від 0,05 дозволив автоматично ізолювати осередки влучань снарядів. При цьому виникла проблема захоплення лісосмуг через різкий перепад спектральних характеристик на межах полів, що було успішно усунуто шляхом ручного коригування.

В результаті дослідження встановлено, що в межах території інтересу в Бучанському районі станом на травень 2022 року площа уражень становила 70,9412 га, а в межах Дергачівської громади — 72,0951 га. Порівняльний аналіз довів, що метод просторової фільтрації локальних аномалій є більш точним, достовірним та менш трудомістким інструментом моніторингу сільськогосподарських земель порівняно з методом часових змін.

Проведені дослідження підтверджують працездатність пропонованої методики оцінки пошкоджень сільськогосподарських угідь від ВНП.

Список використаних джерел

1. Ангурець, О., Хазан, П., Колесникова, К., Кущ, М., Чернохова, М., & Гавранек, М. (2022). *Наслідки для довкілля війни росії проти України*. Режим доступу: https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/cleanair.org.ua-war-damages-ua-version-04-low-res.pdf.

2. Барабаш, І. О., Пархомчук, О. М., & Шелестов, А. Ю. (2023). Геопросторовий аналіз пошкоджень від війни в Україні. *Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених*, 352–356.

3. Василюк, О., & Колодежна, В. (2022). *Якою має бути доля пошкоджених вибухами українських територій?* https://uncg.org.ua/iakoiu-maie-buty-dolia-poshkodzhenykh-vybukhamy-ukrainskykh-terytorij.

4. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. (2024). *Офіційний сайт*. https://dsns.gov.ua.

5. Експерти БТУ-Центр. (2024). *Війна в Україні знищує ґрунти — як врятувати мертві землі*. https://superagronom.com/blog/925-viyna-v-ukrayini-znischuye-grunti--yak-vryatuvati-mertvi-zemli.

6. Сплодитель, А., Голубцов, О., Чумаченко, С., & Сорокіна, Л. (2023). *Вплив війни Росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу*. Центр екологічних ініціатив «Екодія». https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii-summary1.pdf.

7. Укрінформ (2022). *На Харківщині через обстріли рф горіли чотири будинки та сім господарчих споруд*. https://www.ukrinform.ua/rubric-regions/3564040-na-harkivsini-cerez-obstrili-rf-gorili-cotiri-budinki-ta-sim-gospodarcih-sporud.html.

8. Bolshanina, S., Krupska, A., Szewczuk-Karpisz, K., & Yanovska, G. (2026). Alteration of physicochemical soil properties induced by military explosions. *Environmental Protection, 11*(1).

9. Bulba, I., Drobitko, A., Zadorozhnii, Y., & Pismennyi, O. (2024). Identification and monitoring of agricultural land contaminated by military operations. *Scientific Horizons, 27*(7), 107–117. https://sciencehorizon.com.ua/en/journals/tom-27-7-2024/identifikatsiya-ta-monitoring-zabrudnenikh-silskogospodarskikh-zemel-vnaslidok-boyovikh-diy.

10. Copernicus (2026). *Copernicus Browser*. https://browser.dataspace.copernicus.eu/.

11. ESA (2026). *Worldwide land cover mapping*. https://esa-worldcover.org/en.

12. Kasban, H., et al. (2010). A comparative study of landmine detection techniques. *International Journal of Computer Applications, 8*(4), 1–8.

13. Landmine Monitor (2024). *Landmine monitor report 2024*. https://www.the-monitor.org.

14. Ma, Y., Lyu, D., Sun, K., Li, S., Zhu, B., Zhao, R., Zheng, M., & Song, K. (2022). Spatiotemporal analysis and war impact assessment of agricultural land in Ukraine using RS and GIS technology. *Land*, *11*(10), 1810. https://doi.org/10.3390/land11101810.

15. Mironov, I. V., et al. (2025). *Ekolohichni naslidky viiskovykh dii dlia zemelnoho fondu Ukrainy*. In *Materialy XV Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Naukova vesna»* (pp. 113–115).

16. Planet Labs (2026). *Planet Explorer*. https://www.planet.com/explorer/.

17. United Nations Mine Action Service (2023). *International mine action standards (IMAS 08.10; IMAS 08.20)*.

References

1. Anhurets, O., Khazan, P., Kolesnykova, K., Kushch, M., Chernokhova, M., & Havranek, M. (2022). *Naslidky dlia dovkillia viiny rosii proty Ukrainy [Environmental consequences of Russia's war against Ukraine]*. https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/cleanair.org.ua-war-damages-ua-version-04-low-res.pdf.

2. Barabash, I. O., Parkhomchuk, O. M., & Shelestov, A. Y. (2023). Heoprostorovyi analiz poshkodzhen vid viiny v Ukraini [Geospatial analysis of war damage in Ukraine]. In *Proceedings of the All-Ukrainian scientific conference* (pp. 352–356).

3. Vasyliuk, O., & Kolodezhna, V. (2022). *Yakoiu maie buty dolia poshkodzhenykh vybukhamy ukrainskykh terytorii? [What should be the future of Ukrainian territories damaged by explosions?].* https://uncg.org.ua/iakoiu-maie-buty-dolia-poshkodzhenykh-vybukhamy-ukrainskykh-terytorij.

4. State Emergency Service of Ukraine. (2024). *Official website*. https://dsns.gov.ua.

5. Eksperty BTU-Tsentr. (2024). *Viina v Ukraini znyshchuie grunty — yak vriatuvaty mertvi zemli [War in Ukraine destroys soils — how to restore dead lands]*. https://superagronom.com/blog/925-viyna-v-ukrayini-znischuye-grunti--yak-vryatuvati-mertvi-zemli.

6. Splodytel, A., Holubtsov, O., Chumachenko, S., & Sorokina, L. (2023). *Vplyv viiny rosii proty Ukrainy na stan ukrainskykh gruntiv. Rezultaty analizu [Impact of Russia's war against Ukraine on Ukrainian soils. Analysis results].* https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii-summary1.pdf.

7. Ukrinform. (2022). *In Kharkiv region, four houses and seven outbuildings burned due to Russian shelling*. https://www.ukrinform.ua/rubric-regions/3564040-na-harkivsini-cerez-obstrili-rf-gorili-cotiri-budinki-ta-sim-gospodarcih-sporud.html

8. Bolshanina, S., Krupska, A., Szewczuk-Karpisz, K., & Yanovska, G. (2026). Alteration of physicochemical properties induced by military explosions. *Environmental Protection, 11*(1).

9. Bulba, I., Drobitko, A., Zadorozhnii, Y., & Pismennyi, O. (2024). Identification and monitoring of agricultural land contaminated by military operations. *Scientific Horizons, 27*(7), 107–117. https://sciencehorizon.com.ua/en/journals/tom-27-7-2024/identifikatsiya-ta-monitoring-zabrudnenikh-silskogospodarskikh-zemel-vnaslidok-boyovikh-diy.

10. Copernicus. (2026). *Copernicus Browser*. https://browser.dataspace.copernicus.eu.

11. ESA. (2026). *Worldwide land cover mapping*. Retrieved from https://esa-worldcover.org/en

12. Kasban, H., et al. (2010). A comparative study of landmine detection techniques. *International Journal of Computer Applications, 8*(4), 1–8.

13. Landmine Monitor. (2024). *Landmine monitor report 2024*. https://www.the-monitor.org.

14. Ma, Y., Lyu, D., Sun, K., et al. (2022). Spatiotemporal analysis and war impact assessment of agricultural land in Ukraine using RS and GIS technology. *Land, 11*(10). https://doi.org/10.3390/land11101810

15. Mironov, I. V., et al. (2025). Environmental consequences of military actions for the land fund of Ukraine. In *Proceedings of the XV International scientific conference "Scientific Spring 2025"* (pp. 113–115).

16. Planet Labs. (2026). *Planet Explorer*. Retrieved from https://www.planet.com/explorer/

17. United Nations Mine Action Service. (2023). *International mine action standards (IMAS 08.10; IMAS 08.20)*.

Дата першого надходження статті до видання: 19.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.03.2026

UDC 351.86

Vitalii Zatserkovnyi[1], Igor Nikoliuk[2]

[1]Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Geoinformatics
Taras Shevchenko National University of Kyiv, SRI "Institute of Geology" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0003-5187-6125. **Scopus ID:** 57200165109

[2]PhD student
Taras Shevchenko National University of Kyiv, SRI "Institute of Geology" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: nikoliuk.igor@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0006-0750-2603. **Researcher ID:** rid105343

METHODOLOGY FOR ASSESSING DAMAGE TO AGRICULTURAL LAND CAUSED BY EXPLOSIVE HAZARDS USING GIS AND REMOTE SENSING TECHNOLOGIES

This paper addresses the problem of assessing damage to agricultural lands caused by explosive hazards because of military actions in Ukraine. It is shown that under conditions of limited access to hazardous areas, traditional field survey methods become ineffective, which necessitates the use of modern geoinformation technologies and Earth remote sensing data.

The aim of the study is to develop approaches for the identification and quantitative assessment of damaged agricultural lands using the NDVI vegetation index and GIS tools. The study is based on multispectral satellite imagery from Sentinel-2 and PlanetScope, as well as spatial data processing using QGIS software.

Two approaches to damage detection are proposed, namely: the analysis of temporal changes in the vegetation index (dNDVI) and the method of spatial filtering of local anomalies. These approaches were tested on the territories of the Bucha district of Kyiv region and the Dergachi community of Kharkiv region. It was found that the dNDVI method allows effective identification of damaged areas but is sensitive to agrotechnical changes. At the same time, the spatial filtering of local anomalies provides more accurate detection of impact sites and requires less time for data processing.

The results of the study made it possible to determine the areas of damaged lands, which exceed 70 hectares for each study area. The results obtained confirm the effectiveness of using GIS and remote sensing technologies for operational land monitoring and can be applied in planning demining activities and restoring agricultural production.

Keywords: *remote sensing (RS); explosive hazards (EH); agricultural land; machine learning; geographic information systems (GIS); environmental damage.*

Fig.: 12. References: 17.

Зацерковний В. І., Ніколюк І. Р. Методика оцінки пошкоджень сільськогосподарських угідь від вибухонебезпечних предметів за допомогою технологій ГІС ТА ДЗЗ *Технічні науки та технології*, 2026. № 2(44). С. 484-498. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-484-498.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-499-510
UDC 691.12: 699.86: 694.4.072.33

Maksym Bolotov[1], Oleh Novomlynets[2], Iryna Prybytko[3]

[1]PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding Technologies and Construction
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: m.bolotov@stu.cn.ua. **ORCID**: http://orcid.org/0000-0002-0915-4132
Scopus Author ID: 57190377278. **Researcher ID:** H-4183-2014

[2]Doctor in Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Department of Welding Technologies and Construction,
Chernihiv National University of Technology (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: o.novomlynets@stu.cn.ua. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-0774-434X
Scopus Author ID: 56938958300; 6507741249. **ResearcherID:** F-8166-2014

[3]PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding Technologies and Constructions,
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine).
E-mail: iryna.prybytko@stu.cn.ua **Scopus Author ID:**57217181853
Researcher ID: F-7325-2014 **ORCID**: http://orcid.org/0000-0002-8550-8318

A CASE STUDY ON THE CONSTRUCTION TECHNOLOGY AND ENERGY EFFICIENCY OF RESIDENTIAL HOUSING MADE OF BIO-COMPOSITE MATERIALS

The article considers the relevant topic regarding application of bio-composite hempcrete-based materials as the ecologically friendly, more energy efficient and resource keeping alternative to traditional ones. Such a "green" construction practices allow to reduce significantly global CO_2 emission, resource depletion creating stimulating environment for its inhabitants during all building`s life cycle. Implementation of hempcrete in Ukrainian construction practices can be extremely beneficial in terms of post-war reconstruction when the demand for affordable housing will go up dramatically. At the same time, there are some challenges limiting the widespread hempcrete application related with the lack of systematic experience in implementing such facilities locally, the absence of engineering-focused descriptions of construction technology as well as high level of consumer`s skepticism regarding the quality and durability of hempcrete-made buildings. Based on the real practical case of single-family residential housing the hemp-lime construction technologies were studied. The results of the thermal calculation of building`s envelope has revealed that single-stud hempcrete wall formation technique with the thickness of 150…250 mm doesn`t meet the Ukrainian regulatory requirements. The R-value of such walls doesn`t exceed of 2.5...717 $m^2 \cdot K/W$. In this context, to provide sufficient level of building`s envelope thermal efficiency the interior-stud technique with the thickness of hempcrete walls of 400 mm and more is needed. Our calculations have shown that R-value of such walls reach up to 5.601 $m^2 \cdot K/W$ that provides a high level of energy efficiency and should be utilized in Chernihiv`s Climate Zone.

***Keywords**: Sustainability; eco-construction; green building; hempcrete; thermal efficiency; construction technology.*
Fig.: 10. References: 17.

Urgency of the research. The environmental challenges of modern construction, related with greenhouse gas emissions, high-energy consumption and depletion of non-renewable resources, require a radical transformation of the construction sector [1].

The demand to decarbonize, enhance the energy efficiency of modern buildings, and implement circular economy principles has sparked researchers and practitioners` interest globally in safer, more sustainable, and environmentally friendly alternatives for construction materials [2]. Such an intentions were institutionalized through international certification systems implementation, such as LEED (USA), LBC (USA), DGNB (Germany), and BREEAM (UK), as well as others European programs aimed at decarbonizing the building stock [3].

Target setting. In this context, bio-based composites, particularly hemp-lime, widely known as hempcrete, are positioned as a renewable and potentially carbon-absorbing alternatives to traditional insulations and other construction materials [4]. Over the past two decades, hempcrete has been actively researched as a promising material for low-rise residential, as well as public buildings where structural loads are moderate and environmental performance plays essential role.

It is worth noting that the application of hempcrete aligns with the key principles of the European Green Deal (EGD), including reducing the carbon footprint, improving energy efficiency, and ensuring climate neutrality in the construction sector [5].

Construction practices using hempcrete demonstrate compliance with all these criteria: it has low energy consumption during production, the ability to continuously absorb CO_2 throughout its whole life cycle, high thermal insulation properties, and natural humidity regulation, which improve the indoor microclimate.

© M. Bolotov, O. Novomlynets, I. Prybytko, 2026

Actual scientific researches and issues analysis. Systematic reviews of recent scientific publications on hempcrete applications have shown that research mainly focuses on its thermophysical properties [3; 6; 7], moisture exchange and ecological life cycle balance [8], assessment of its mechanical strength, as well as its environmental friendliness and carbon footprint [9; 10].

For modern Ukraine, facing rapidly growing demands for technologically simple, resource, and energy-efficient construction solutions, driven by the large-scale destruction of residential infrastructure because of ongoing war, construction practices using hempcrete may become one of the national trends.

On the one hand, Ukraine possesses significant agricultural potential for growing industrial hemp, on the other hand, it faces limitation of traditional building materials and its constant rising costs. In the post-war period, this may become a prerequisite for the development of local production chains: "raw materials – building materials – residential facilities" in which hempcrete can play a pivotal role.

However, the lack of systematic experience in implementing such facilities locally, the absence of engineering-focused descriptions of construction technology as well as any regulatory documents along with the high level of consumer`s skepticism regarding the quality and durability of hempcrete-made buildings hinders the broader adoption of this technology here in Ukraine.

The research objective. Thus, this article aims to systematically present existing hempcrete technologies, as well as the advantages and limitations of its application, based on the results of a real case study, and to determine the prospects for its further implementation in low-rise construction in Ukraine in the context of modern European environmental requirements.

The statement of basic materials. As it was abovementioned, hempcrete is a bio-composite that is made up of hemp hurd mixed with a lime-based binder and water (see Fig. 1). Depending on its mixture design, particularly shives-to-binder ratio, thermophysical and mechanical properties of hempcrete can vary significantly.

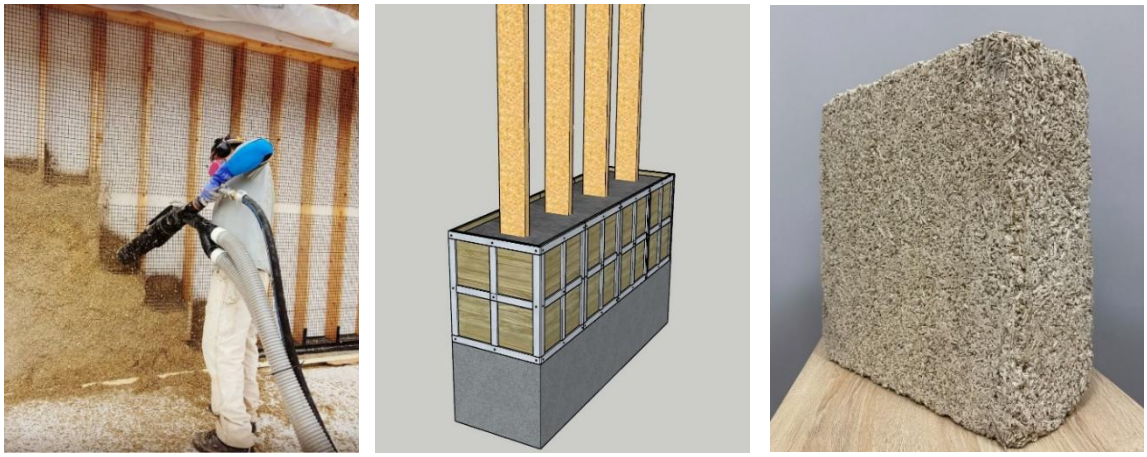
Normally, when it comes to the wall construction the prevalent hemp-to-binder ratio of 1:2 while hemp-to-water of 1:3 [11]. It has been established that an increase in lime in a hempcrete mix increases its compressive strength when its thermal efficiency goes down. According to [12], the mixture with the hemp-to-lime ratio of 0.25 (12% hemp, 49% lime, 39% water) shows better compressive strength at a level of 0.51 MPa compared to 0.83 hemp-to-lime ratio (24% hemp, 29% lime, 47% water) where compressive strength doesn`t exceed 0.07 MPa. At the same time, the mix with 0.83 hemp/lime ratio provides a better thermal performance with the thermal conductivity of 0.07 W/m·K versus 0.120 W/m·K for hemp-to-lime ratio of 0.25. This is exactly why hempcrete is utilized prevalently for a wall systems formation.



a *b*

Fig. 1. External view of a hemp hurds (shives) (a), and hempcrete-made element (b)

Currently for hempcrete application projection-spraying method, cast-in-place or prefabricated blocks are widely utilized (see Fig. 2).



a *b* *c*

Fig. 2. Techniques of hempcrete application:
a – projection-spraying [13]; b – cast-in-place (or in-situ); c – prefabricated hempcrete blocks

During projection spraying process dry hemp and lime are supplied through the hose by means of pressurized air stream while water supply is provided through the separate water inlet of the same hose. The whole hemp-lime-water mixture is applied through the delivery nozzle of the hose to infill the mold assembled on the substrate (wall in particular) as shown in Fig. 2, *a*. For this occasion, the factory-made hempcrete mixes are used. As it was shown in [11], this method of hempcrete application can reduce significantly the total setting time as well as duration of construction as a whole. At the same time, the using of mechanized mixture delivery doesn`t provide the high stability level of hempcrete quality with the high pores size disparity. The latter can lead to the increase in relative humidity of hempcrete that deteriorates dramatically of its thermal performances. On top of that, the highly trained operator is also required.

In-situ casting hempcrete process implies the hemp-binder-water mixing directly on construction site with the subsequent application into a formwork as given in Fig. 2, *b*. Normally, hempcrete casting around the timber-made structural frame to provide the bear-load capacity for the structure that is required. Typically, the 60 cm-tall OSB-3 shuttering with the thickness of 1.2-1.5 cm is used. Forced-action mixers with the size of 300…350 liters, as shown in Fig. 3, are widely utilized for mixture preparation. To achieve sufficient level of hempcrete compaction without voids and excessive porosity the application of external force is also needed [11].



Fig. 3. External view of the mixer for in-situ hempcrete preparation

It is noteworthy that cast-in-place technique doesn`t required sophisticated and specialized technical equipment but the quality of the mixture and its application strongly depends on builders` expertise.

The construction practice using prefabricated hempcrete blocks that were manufactured in controlled factory environment with further transportation on construction site provides greater quality of hempcrete mixture with more predictable thermal and mechanical properties. The example of such a prefabricated hempcrete block is shown in Fig. 2, *c*. It should be noted that this specific block was provided to us by the company Hempire Ukraine. The dimensions of these can vary ranging from 500×300×200 mm to 600×300×400 mm. The thin blocks with a thickness of 70…150 mm are also used for interior applications. As the mortar, the lime-sand mixture is used [11]. The example of premanufactured hempcrete block building is shown in Fig. 4.



Fig. 4. Premanufactured hempcrete block building [12]

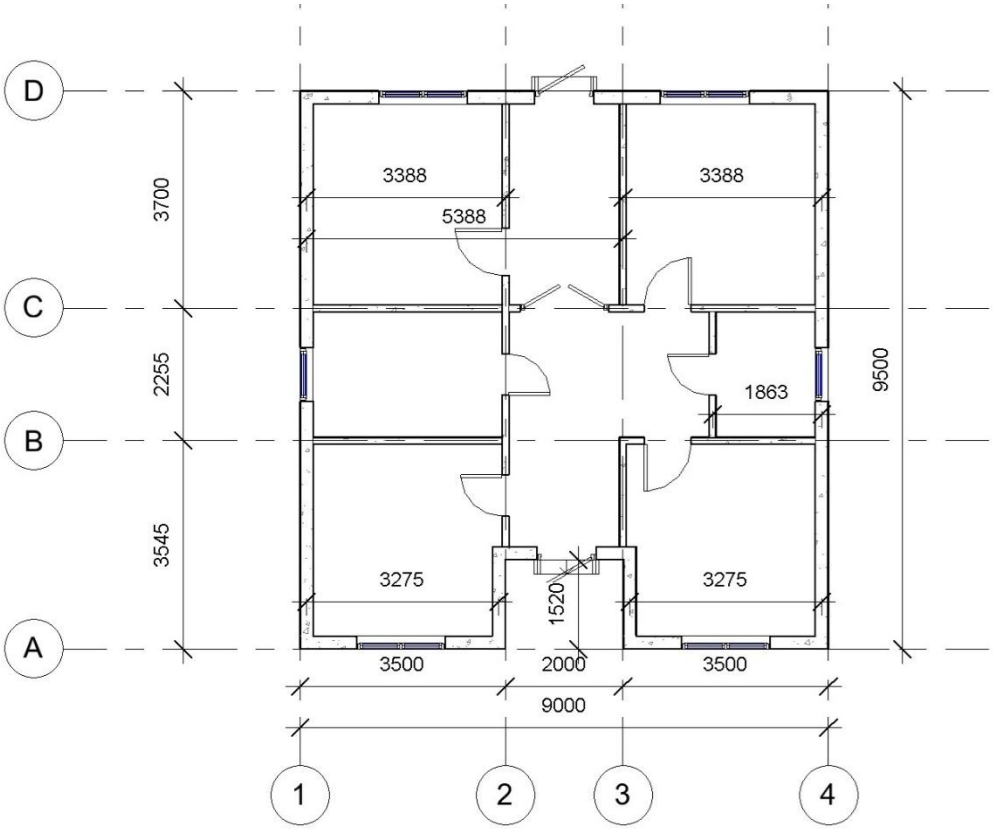
Our case study is focused on cast-in-place hempcrete application for construction of single-family residential house. The project is being implemented and supported by the Dutch foundation OpenDoorUkraine.nl (ODU) in a partnership with Hempire UA that is only one certified Ukrainian company regarding of binding materials production for hempcrete. According to the project, the building will have an area of 85 m^2 with the 60 m^2 of living space. The construction of this building that`s situated in the vicinity of Chernihiv in the village of Novoselivka, commenced in the fall of 2024 and currently ongoing. To increase the accuracy of project realization the BIM-technology particularly Autodesk Revit 2026 software was used [14]. The external view of facades, its 3D-models as well as floor design are given in Fig. 5.



a



b



c

Fig. 5. External view and its 3D models of studied building:
a – North-western façade; b – South-east façade; c – floor plan

Since it is known, the compressive strength of a hempcrete, generally, doesn't exceed 0.91 MPa regardless of mixture design, density, and form of its application [12]. It can't be utilized as a load-bearing material at all. In this case, it is used along with the structural framing, normally timber-made. In our case study, the timber studwork is made up of bottom plate of 50×150 mm; vertical studs of 50×150 mm are installed at a spacing of 400 mm; diagonal braces of 25×150 mm to ensure the spatial stiffness; and the top plate of 50×150 mm laid out in two layers with the total thickness of 300 mm to connect all vertical studs in one structural frame. 3D model of this frame and its cross-section are given in Fig. 6.

It is also noteworthy that wooden frame was built on monolithic foundation slab of 600 mm in thick that was previously covered with bituminous waterproofing membrane of 1 mm. Thus, the hempcrete exterior walls will be carefully protected from soil moisture, splashes of rain or snow.



Fig. 6. 3D model of structural frame and its cross-section

Initially, by using single stud framing technique the space between vertical studs with some compaction is infilled with hempcrete as it shown in Fig. 7a and Fig.8a accordingly. As it was mentioned above, for this occasion OSB-made shuttering that repeats the contour of the studs was used.

Typically, the compaction force is manually provided while any mechanical influences including vibrations or ramming are strictly prohibited. In this case, the applied force for hand-tamping doesn`t exceed of 5 MPa. After some hardenig of the mixture, the formwork is removed. For now, only 150 mm thick wall is assembled.

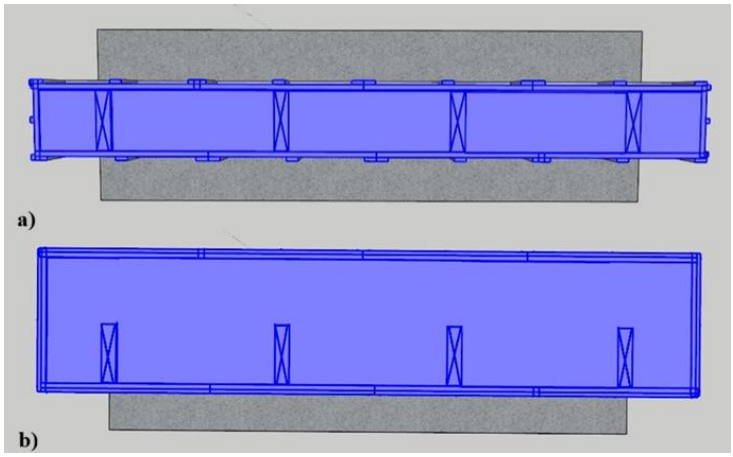


Fig. 7. Typical hempcrete wall sections that were used in our case study: a – single-stud; b – interior stud



a *b*

Fig. 8. 3D models of single-stud (a) and interior-stud (b) of hempcrete walls formation techniques

Interior-studs technique was utilized for a further wall formation (see Fig. 7, *b* and Fig. 8, *b*). For this occasion, the formwork is installed to create the contour of future exterior wall with the total thickness of 400 mm. Then in-situ hempcrete application technique is repeated.

After the all hempcrete walls have been formed its covered with the finishing layer of clay or lime/send-based plaster without any polymerized membrane between hemp-lime and finishes (see Fig. 9, *e*). This finishing system provides the sufficient level of vapor permeability and breathability for a hempcrete wall while other finishes particularly gypsum plaster or so deteriorates dramatically the features mentioned above and can`t be used in this context.

In Fig. 9, the external view of formed enclosures for the window opening (see Fig. 9, *a*), doorway (see Fig. 9, *b*) as well as external and internal corners formation of our studied case (see Fig. 9, *c, d*) are given.

It should be noted, that in our case, as an internal insulator the cottonwool plates of French brand Métisse with the thickness of 160 mm covered with the waterproofing membrane was used (see Fig. 9, *f*).



a *b* *c*



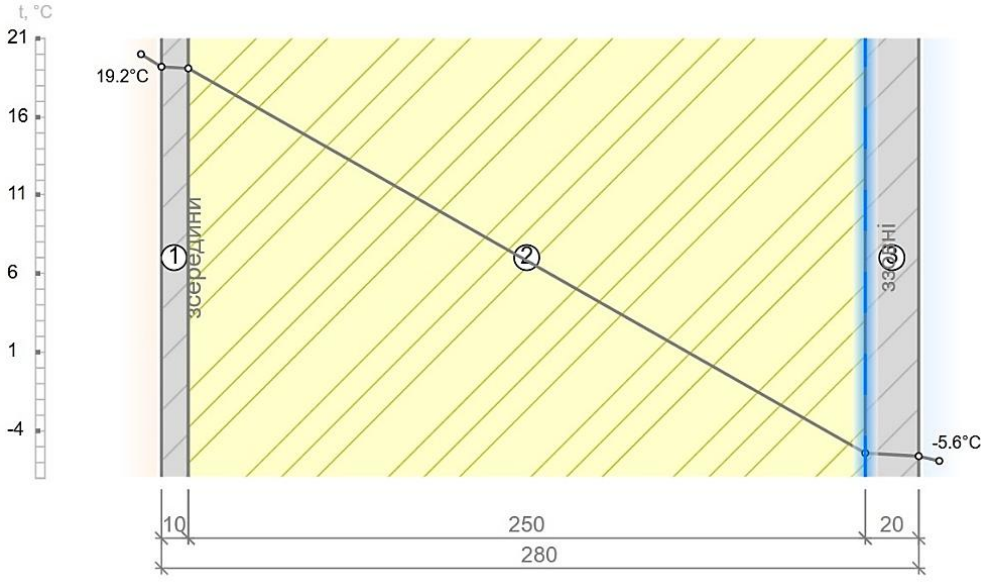
d *e* *f*

Fig. 9. External view of window opening (a), doorway (b), external and internal corners formation (c, d), first layer of external finishing (e), and internal insulation material (f)

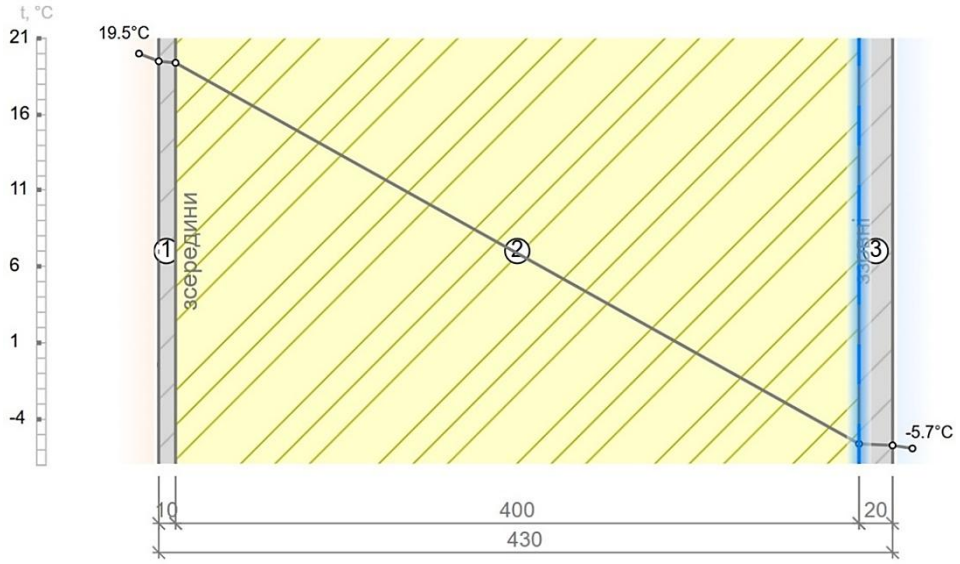
Another crucial aspect to investigate is the thermal efficiency of hempcrete-based technique. It is well known that depending on the thickness of hempcrete (250…500 mm) its R-value (reduced thermal resistance) can vary significantly ranging from ~2 up to ~5 (m^2·K/W).

In this case, the thermal calculations were carried out according to methodology extensively provided in [15], considering for a Climate Zone I that is inherent for Chernihiv region where standardized values of heat transfer resistance for enclosing structures of $R \geq 4$ (m^2·K/W) [16].

The calculation models of examined enclosing structures are given in Fig. 10. They are made up of internal lime/send finishing with the thickness of 20 mm with the subsequent hempcrete layer of 250 mm in thick (see Fig. 10, *a*) or 400 mm in thick (see Fig. 10, *b*) and internal finishing of lime/send mixture with the thickness of 10 mm. For thermal performance calculations it has been also suggested that low density of 250 kg/m^3 hempcrete mixture that is provided the highest level of thermal resistance about 0.071 W/m·K was utilized [12].



a



b

Fig. 10. Calculation models of examined enclosing structures: hempcrete layer with the thickness of 250 mm (a), and 400 mm (b) accordingly

The analysis of calculation results has reviled that for the wall structure with 250 mm of hempcrete infill the R-value does not exceed of 3.717 m^2·K/W while for the enclosures with 400 mm of hempcrete provides R-value at a level of 5.601 m^2·K/W.

Thus, to ensure the regulatory requirements the hempcrete-made walls with the thickness of 400 mm or more is needed. It`s worth to note that both structures provide good vapor permeability performances at a level of 1.143 m^2·h·Pa/mg and 1.679 m^2·h·Pa/mg for 250 mm and 400 mm hempcrete walls accordingly.

At the same time, the calculations have shown that in both cases the dew point is always presented inside the wall structure. The dew point temperature, which was calculated considering the air temperature is 20 °C and the relative humidity is 55% for both structures was about 9.92 °C. Assuming that the hempcrete is the porous bio-composite that is hygroscopic and diffusion-opened can easily absorb this moisture into its pores and capillaries and over time safely release it inside-out without deterioration its mechanical properties.

Conclusions. It can be concluded that bio-composites as a constructional material, particularly the hempcrete, can be extremely advantageous specifically in terms of global sustainability, carbon footprint reduction, and resource saving increasing energy efficiency of residential households.

At the same time, in a view of low mechanical properties of hempcrete it can`t be utilized as a load-bear structural material and typically applied along with the timber-made structural frame.

Regardless of hempcrete application technique, in order to ensure of high quality of hemp/lime mixture, sufficient compaction force, etc., the group of highly experienced workers is always required.

Based on a real practical case of single-family residential house construction the main techniques of cast-in-place hempcrete wall formation were examined. According to the thermal calculations it was established that single-stud hempcrete wall with the thickness of 150…250 mm doesn`t meet the Ukrainian regulatory requirements at all. The R-value of such walls doesn`t exceed of 2.5 – 3.717 m^2·K/W. In this context, to provide sufficient level of building`s envelope thermal efficiency the interior-stud technique with the thickness of hempcrete walls of 400 mm and more is needed. Our calculations have shown that R-value of such walls reach up to 5.601 $m^2$·K/W that provides a high level of energy efficiency and should be utilized in Chernihiv`s Climate Zone.

References

1. Bolotov, M., Bolotov, H., Prybytko, I., & Korzachenko, M. (2024). Sustainable practices of concrete manufacturing. *Technical Sciences and Technologies*, (2(36)), 15–30. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-2(36)-15-30.

2. Abera, Y. A. (2024). Sustainable building materials: A comprehensive study on eco-friendly alternatives for construction. *Composites and Advanced Materials, 33*. https://doi.org/10.1177/26349833241255957.

3. Pochwała, S., Makiola, D., Anweiler, S., & Böhm, M. (2020). The heat conductivity properties of hemp–lime composite material used in single-family buildings. *Materials, 13*(4), 1011. https://doi.org/10.3390/ma13041011.

4. Linh, D., Salomone, R., & Nguyen, Q. T. (2023). Circular bio-based building materials: A literature review of case studies and sustainability assessment methods. *Building and Environment, 244*, 110774. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110774.

5. *The European green deal*. (n.d.). European Commission. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en.

6. Korjenic, A., Petránek, V., Zach, J., & Hroudová, J. (2011). Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and Buildings*, 43(9), 2518–2523. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.012.

7. Brzyski, P., Barnat-Hunek, D., Suchorab, Z., & Łagód, G. (2017). Composite materials based on hemp and flax for low-energy buildings. *Materials, 10*(5), 510. https://doi.org/10.3390/ma10050510.

8. Volf, M., Diviš, J., & Havlík, F. (2015). Thermal, moisture and biological behaviour of natural insulating materials. *Energy Procedia, 78*, 1599–1604. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.219.

9. Maalouf, C., Ingrao, C., Scrucca, F., Moussa, T., Bourdot, A., Tricase, C., Presciutti, A., & Asdrubali, F. (2018). An energy and carbon footprint assessment upon the usage of hemp-lime concrete and recycled-PET façades for office facilities in France and Italy. *Journal of Cleaner Production*, *170*, 1640–1653. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.111.

10.Kremensas, A., Kairytė, A., Vaitkus, S., Vėjelis, S., & Balčiūnas, G. (2019). Mechanical performance of biodegradable thermoplastic polymer-based biocomposite boards from hemp shivs and corn starch for the building industry. *Materials*, *12*(6), 845. https://doi.org/10.3390/ma12060845

11.Steyn, K., de Villiers, W. & Babafemi, A.J. (2025). A comprehensive review of hempcrete as a sustainable building material. *Innov. Infrastruct. Solut.* 10, 97. https://doi.org/10.1007/s41062-025-01906-1

12.Tong, W., & Memari, A. M. (2025). State of the art review on hempcrete as a sustainable substitute for traditional construction materials for home building. *Buildings*, *15*(12), 1988. https://doi.org/10.3390/buildings15121988.

13.*Spray-Applied Hempcrete System Gets New U.S. Distributor — HempBuild Magazine*. (n.d.). HempBuild Magazine. https://www.hempbuildmag.com/home/espray-applied-hemp-usa.

14.Hanieiev, T., Barbash M., Bolotov, G., & Bolotov, M. (2021). Design of life support systems for the housing complex. *Technical Sciences and Technologies, (2(24*)), 244–250. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-2(24)-244-250.

15.Jellen, A. C., & Memari, A. M. (2025). State-of-the-Art review of hempcrete for residential building construction. *Designs*, *9*(2), 44. https://doi.org/10.3390/designs9020044.

16.Bolotov, M., & Prybytko, I. (2025). Thermal efficiency assessment of eco-oriented prefabricated modular buildings: case study. *Technical Sciences and Technologies, (3(41))*, 494–505. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-494-505.

17.Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine. (2022). *DBN V.2.6-31:2021: Thermal insulation and energy efficiency of buildings*. Kyiv, Ukraine.

Список використаних джерел

1. Bolotov, M., Bolotov, H., Prybytko, I., & Korzachenko, M. (2024). Sustainable practices of concrete manufacturing. *Technical Sciences and Technologies*, (2(36)), 15–30. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-2(36)-15-30.

2. Abera, Y. A. (2024). Sustainable building materials: A comprehensive study on eco-friendly alternatives for construction. *Composites and Advanced Materials, 33*. https://doi.org/10.1177/26349833241255957.

3. Pochwała, S., Makiola, D., Anweiler, S., & Böhm, M. (2020). The heat conductivity properties of hemp–lime composite material used in single-family buildings. *Materials, 13*(4), 1011. https://doi.org/10.3390/ma13041011.

4. Linh, D., Salomone, R., & Nguyen, Q. T. (2023). Circular bio-based building materials: A literature review of case studies and sustainability assessment methods. *Building and Environment, 244*, 110774. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110774.

5. *The European green deal*. (n.d.). European Commission. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en.

6. Korjenic, A., Petránek, V., Zach, J., & Hroudová, J. (2011). Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and Buildings*, 43(9), 2518–2523. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.012.

7. Brzyski, P., Barnat-Hunek, D., Suchorab, Z., & Łagód, G. (2017). Composite materials based on hemp and flax for low-energy buildings. *Materials, 10*(5), 510. https://doi.org/10.3390/ma10050510.

8. Volf, M., Diviš, J., & Havlík, F. (2015). Thermal, moisture and biological behaviour of natural insulating materials. *Energy Procedia, 78*, 1599–1604. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.219.

9. Maalouf, C., Ingrao, C., Scrucca, F., Moussa, T., Bourdot, A., Tricase, C., Presciutti, A., & Asdrubali, F. (2018). An energy and carbon footprint assessment upon the usage of hemp-lime concrete and recycled-PET façades for office facilities in France and Italy. *Journal of Cleaner Production*, *170*, 1640–1653. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.111.

10.Kremensas, A., Kairytė, A., Vaitkus, S., Vėjelis, S., & Balčiūnas, G. (2019). Mechanical performance of biodegradable thermoplastic polymer-based biocomposite boards from hemp shivs and corn starch for the building industry. *Materials*, *12*(6), 845. https://doi.org/10.3390/ma12060845

11.Steyn, K., de Villiers, W. & Babafemi, A.J. (2025). A comprehensive review of hempcrete as a sustainable building material. *Innov. Infrastruct. Solut.* 10, 97. https://doi.org/10.1007/s41062-025-01906-1

12.Tong, W., & Memari, A. M. (2025). State of the art review on hempcrete as a sustainable substitute for traditional construction materials for home building. *Buildings*, *15*(12), 1988. https://doi.org/10.3390/buildings15121988.

13.*Spray-Applied Hempcrete System Gets New U.S. Distributor — HempBuild Magazine*. (n.d.). HempBuild Magazine. https://www.hempbuildmag.com/home/espray-applied-hemp-usa.

14.Ганєєв, Т., Барбаш, М., Болотов, Г., & Болотов, М. (2021). Проєктування систем життєзабезпечення житлового комплексу. *Технічні науки та технології,* (2(24), 244–250. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-2(24)-244-250.

15.Jellen, A. C., & Memari, A. M. (2025). State-of-the-Art review of hempcrete for residential building construction. *Designs*, *9*(2), 44. https://doi.org/10.3390/designs9020044

16.Bolotov, M., & Prybytko, I. (2025). Thermal efficiency assesment of eco-oriented prefabricated modular buildings: case study. *Technical Sciences and Technologies, (3 (41))*, 494–505. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-494-505

17.Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine. (2022). *DBN V.2.6-31:2021: Thermal insulation and energy efficiency of buildings*. Kyiv, Ukraine.

Дата першого надходження статті до видання: 28.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.03.2026

УДК 691.12: 699.86: 694.4.072.33

Максим Геннадійович Болотов[1], Олег Олександрович Новомлинець[2], Ірина Олександрівна Прибитько[3]

[1]кандидат технічних наук, доцент, кафедри технологій зварювання та будівництва, Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail m.bolotov@stu.cn.ua **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-0915-4132
ResearcherID: H-4183-2014 **Scopus Author ID:** 57190377278

[2]доктор технічних наук, професор, кафедри технологій зварювання та будівництва, Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: o.novomlynets@stu.cn.ua **Scopus Author ID:** 56938958300; 6507741249
ResearcherID: F-8166-2014 **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-0774-434X

[3]кандидат технічних наук, доцент, кафедри технологій зварювання та будівництва, Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: iryna.prybytko@stu.cn.ua **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-8550-8318
ResearcherID: F-7325-2014 **Scopus Author ID:**57217181853

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАКТИЧНОГО КЕЙСУ ТЕХНОЛОГІЇ БУДІВНИЦТВА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ З БІОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті розглядається актуальна тема застосування біокомпозитних матеріалів на основі конопляного бетону як екологічно чистої, більш енергоефективної та ресурсозберігаючої альтернативи традиційним. Такі «зелені» будівельні практики дозволяють значно зменшити глобальні викиди CO_2, виснаження ресурсів, створюючи стимулююче середовище для її мешканців протягом усього життєвого циклу будівлі. Впровадження конопляного бетону в українську будівельну практику може бути надзвичайно корисним з погляду післявоєнної відбудови, коли попит на доступне житло різко зросте. Водночас існують деякі проблеми, що обмежують широке застосування конопляного бетону, пов'язані з відсутністю систематичного досвіду впровадження таких об'єктів на місцевому рівні, відсутністю інженерно-орієнтованих описів будівельних технологій, а також високим рівнем скептицизму споживачів щодо якості та довговічності будівель з конопляного бетону. Стаття має на меті систематично представити існуючі технології виробництва конопляного бетону, а також переваги та обмеження його застосування на основі результатів реального дослідження, та визначити перспективи його подальшого впровадження в малоповерховому будівництві в Україні в контексті сучасних європейських екологічних вимог. На основі реального практичного випадку одноквартирного житлового будинку було досліджено технології будівництва з конопляного вапна. Результати теплового розрахунку огороджувальних конструкцій будівлі показали, що технологія формування стін з конопляного бетону з однією стійкою товщиною 150…250 мм не відповідає українським нормативним вимогам. Коефіцієнт теплопередачі таких стін не перевищує 2,5…3,717 $м^2 \cdot К/Вт$. У цьому контексті, для забезпечення достатнього рівня теплової ефективності огороджувальних конструкцій будівлі необхідна технологія внутрішнього каркаса з товщиною стін з конопляного бетону 400 мм і більше. Наші розрахунки показали, що коефіцієнт теплопередачі таких стін сягає 5,601 $м^2 \cdot К/Вт$, що забезпечує високий рівень енергоефективності та доцільно використовувати в Чернігівській кліматичній зоні.

Ключові слова: *сталий розвиток; екобудівництво; зелене будівництво; конопляний бетон; теплова ефективність; будівельні технології.*

Рис.: 10. Бібл.: 17.

Bolotov, M., Novomlynets, O., & Prybytko, I. (2026). A case study on the construction technology and energy efficiency of residential housing made of bio-composite materials. *Technical sciences and technologies*, (2(44)), 499-510. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-499-510.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-511-524
УДК 355.4+528.9+614.8

Тарас Володимирович Гуцул
кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича (Чернівці, Україна)
E-mail: t.gutsul@chnu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-7192-3289
Scopus ID: 57204148923. **ResearcherID:** R-8012-2017

ПОВЕРХНЕВЕ І ВЕРТИКАЛЬНЕ МІННЕ ЗАБРУДНЕННЯ: МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНКИ РИЗИКУ

Мінне забруднення глобальна загроза безпеки населення, відновлення господарської діяльності та екологічної стабільності у постконфліктних регіонах. Нещодавні бої у Сирії, Лівії та Ємені відбувалися переважно в міських середовищах, які значно складніші та включали не лише поверхневе (двовимірне) забруднення, але й вертикальне (тривимірне) мінування територій. Запропоновано підхід до інтегральної оцінки ризику, який враховує просторові та глибинні параметри забруднення, а також можливість застосування геоінформаційних технологій для зонування територій за рівнями небезпеки. Отримані результати можуть сприяти підвищенню ефективності планування заходів з протимінної діяльності.

Ключові слова: *гуманітарне розмінування; мінне забруднення; геопросторові дані; оцінка ризику; карти небезпек; просторовий аналіз.*
Табл.: 4. Бібл.: 25.

Актуальність теми дослідження. Мінне забруднення територій – одна з проблем людства глобального масштабу, а також одна з найгостріших проблем безпеки та післявоєнного відновлення держав, що зазнали збройних конфліктів. Насамперед воно створює безпосередню загрозу життю та здоров'ю людей. Безпека – основна соціальна цінність, яку повинна забезпечувати держава своєму населенню, а земля – основне національне багатство. Вибухи протипіхотних та протитанкових мін призводять до численних травм і смертей серед цивільних, часто дітей та людей похилого віку. Психологічний ефект мінного забруднення не менш значущий: постійний страх за власну безпеку обмежує пересування населення, перешкоджає нормальному життю та роботі. Люди на уражених територіях уникають відкритих просторів, змінюють маршрути пересування, що впливає на соціальну активність життя. Відсутність своєчасних заходів протимінної діяльності (ПМД) на забруднених територіях робить їх ізольованими, а мешканці таких районів починають відчувати себе покинутими державою.

Необхідність координації зусиль держав, міжнародних організацій і гуманітарних місій у сфері розмінування, мінної просвіти та допомоги постраждалим підкреслює її значущість як одного з ключових викликів сучасності. Мінна загроза має тісний і багатовимірний зв'язок із Цілями сталого розвитку ООН (ЦСР), оскільки безпосередньо впливає на здатність держав забезпечувати безпеку, розвиток і добробут населення. Вивільнення земельних ділянок прямо чи опосередковано стосується досягнення 14 (ЦСР: 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17) із поміж 17 ЦСР [1]. Заміновані території підривають реалізацію ЦСР у гуманітарній, соціальній, економічній та екологічній сферах, що робить ПМД важливою складовою глобальної політики сталого розвитку.

Традиційні підходи до оцінювання мінної небезпеки переважно орієнтовані на виявлення та аналіз поверхневого розташування вибухонебезпечних предметів (ВНП) [2]. Проте в реальних умовах значна частина мін і боєприпасів може змінювати своє положення в товщі ґрунту під впливом природних і техногенних факторів, таких як ерозійні процеси, сезонні промерзання та відтавання ґрунтів, зволоження, вібраційні впливи, переміщення ґрунтових мас, а також господарська діяльність людини [3]. За таких обставин, ВНП можуть змінювати глибину залягання, що ускладнює їх виявлення та підвищує рівень ризику для населення і саперів.

© Т. В. Гуцул, 2026

Недостатня врахованість вертикальної складової мінного забруднення у процесах оцінювання небезпеки може призводити до недооцінювання ризиків і зниження ефективності планування заходів з ПМД. Тому виникає необхідність у розробленні науково обґрунтованої методології оцінки ризику, яка б інтегрувала як поверхневі, так і вертикальні параметри розміщення ВНП з урахуванням просторових та природних особливостей досліджуваних територій.

Означене питання, як і сфера гуманітарного розмінування, є міждисциплінарним і актуальним для безпеки життєдіяльності, цивільного захисту, геоінформаційних технологій (просторовий аналіз у визначенні небезпечних ділянок за цифровими моделями, картування мінних полів та зон ризику), екології, військової інженерії та прикладного математичного моделювання. Воно поєднує технічні, екологічні та соціальні аспекти ризику мінного забруднення та має практичне значення для захисту населення й управління сталим розвитком постконфліктних територій.

Постановка проблеми. Оцінювання мінної небезпеки територій є одним із ключових аналітичних етапів ПМД, який передує проведенню робіт із розмінування та забезпечує обґрунтоване планування таких робіт, і безпосередньо пов’язане з картографуванням ризику мінного забруднення. Результати оцінювання використовуються для створення просторових моделей небезпеки, які відображаються у вигляді карт ризику. Традиційно оцінювання мінної небезпеки територій базується переважно на аналізі поверхневого розміщення ВНП або на даних про щільність замінування, що виключає комплексний вплив взаємодії природних, техногенних та просторових факторів, а отже обмежує можливості об’єктивної оцінки ризику та планування заходів ПМД. У реальних природних умовах міни та інші боєприпаси не завжди залишаються у початковому положенні. Під впливом природних процесів – зволоження ґрунтів, ерозії, сезонного промерзання та відтавання, переміщення ґрунтових мас, а також механічних навантажень – можливе поступове переміщення ВНП у вертикальному напрямку. У результаті цього формується складна просторово-глибинна структура мінного забруднення, яка включає як поверхневий, так і підповерхневий (вертикальний) компоненти.

Наявність вертикального переміщення мін суттєво ускладнює прогнозування небезпечних зон та подальше виявлення, оскільки глибина залягання ВНП може змінюватися з часом і залежати від множини факторів та характеру попереднього мінування. У багатьох випадках діючі методики оцінювання мінної небезпеки не повною мірою враховують ці фактори, що може призводити до недостатньо точного визначення рівнів ризику та неефективного планування робіт з обстеження і очищення територій. Масштабне мінне забруднення значних територій України створює серйозні загрози для населення, інфраструктури та економічної діяльності, що зумовлює необхідність розроблення ефективних методів оцінки ризику та просторового планування робіт із гуманітарного розмінування.

Дослідження методологічних підходів до оцінки ризику поверхневого і вертикального мінного забруднення є важливим науковим і практичним завданням. Запропонований підхід пов’язаний із розвитком методів геоінформаційного аналізу та просторового моделювання, що застосовуються для визначення рівня мінної небезпеки територій. Використання геоінформаційних систем (ГІС) дозволяє інтегрувати різні джерела геопросторових даних, виконувати багатокритеріальний аналіз факторів мінного забруднення (просторових та глибинних характеристик розміщення мін/ВНП з урахуванням факторів природного середовища) та формувати карти ризику, які можуть використовуватися для підтримки ухвалення управлінських рішень. Реалізація такого підходу сприятиме підвищенню точності оцінювання мінних ризиків та ефективності планування заходів з гуманітарного розмінування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема мінного забруднення територій, методів його виявлення та оцінки ризику активно досліджується у міжнародній і вітчизняній науковій літературі. Сучасні дослідження охоплюють декілька основних напрямів: просторове картування мінного забруднення, методи дистанційного виявлення мін, моделювання ризику та оптимізацію процесів гуманітарного розмінування. Проте інтегрований підхід до оцінювання мінної небезпеки з урахуванням як поверхневого, так і вертикального забруднення досі залишається мало висвітленим у науковій літературі.

ГІС стали ефективним і надійним інструментом інформаційного забезпечення актуальними просторовими даними на всіх етапах гуманітарного розмінування територій. Подальший їх розвиток пов’язано з активним пошуком просторових методів інтелектуального аналізу геоданих, одержаних на етапі технічного обстеження [4].

Збір даних залишається найдорожчою і найтривалішою частиною більшості ГІС-проєктів. Він може вимагати до 60 %, а іноді навіть до 80 % наявного часу і коштів. Невідповідність між високими витратами на збір даних, з одного боку, і низьким рівнем використання, з іншого боку, викликає потребу в підході, який змінить цю ситуацію [5]. Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у процесах розмінування можна вважати передовим і таким, що по-новому відкриває можливості існуючих і перспективних методів і технологій. Різноманітний спектр моделей та конструктивних особливостей сучасних БПЛА дозволяє адаптувати їх для виконання будь-яких завдань, зокрема пошуку видимих індикаторів наземних мін та ВНП у забруднених зонах. Зростаючий інтерес до БПЛА створює тенденції до постійного вдосконалення: збільшується час перебування в повітрі та вантажопідйомність, оптимізуються процеси навігації та мінімізуються аварії [6]. У дослідженні українських науковців розглянуто можливості використання мультиспектральних зображень з БПЛА для ідентифікації мін, розташованих на поверхні або на невеликій глибині [7]. Наведено алгоритми обробки даних дистанційного зондування (ДЗЗ) у середовищі ГІС для попереднього визначення небезпечних ділянок, однак точність ідентифікації становить ≈ 70 %, що свідчить про потребу подальшого вдосконалення методів оцінки мінного забруднення [8].

У роботах із геостатистичного аналізу застосовуються методи просторової регресії та географічно зваженої регресії для прогнозування зон із підвищеною ймовірністю наявності мін. Такі моделі дозволяють враховувати закономірності розміщення мін, особливості рельєфу, транспортну мережу та інші фактори, що впливають на формування мінних полів. Отримані результати використовуються для створення карт ризику та оптимізації планування робіт із розмінування [9].

Концепція «гарячих точок» (hot spots) забезпечує візуальне представлення впливу локацій з аномально високою концентрацією певних явищ, а отже у випадку гуманітарного розмінування спроможна представити «пріоритетні області для зосередження експертів з планування ПМД». Оцінювач щільності ядра (Kernel Density Estimation) пропонується як непараметричний метод кількісної оцінки масштабу просторового явища, і є основою для формування зон небезпеки на картах, вразливості та елементів під загрозою, пов'язаних з мінами та ВНП, що дозволяє створювати кінцевий результат – карту ризику [10]. Вибір використання KDE ґрунтується на внеску кожної точки у загальну щільність забруднення, показник якої зменшується зі збільшенням відстані від неї. Ця ідея узгоджується з першим законом географії Тоблера: «Все пов’язане з усім іншим, але близькі речі більш пов’язані, ніж віддалені» [11].

Важливим напрямом досліджень є застосування штучного інтелекту (ШІ) та аналізу геопросторових даних для прогнозування потенційно небезпечних територій [12]. Застосування методів ШІ дає змогу ідентифікувати складні нелінійні взаємозв’язки між факторами, які не завжди піддаються виявленню за допомогою класичних кореляційних або

регресійних підходів. Останніми роками кількість таких досліджень зросла, однак більшість з них зосереджена на розпізнавання об'єктів, приділяючи обмежену увагу прогнозуванню ризику на основі просторової інформації, що залишає цей напрям перспективним. У роботі [13] наведено систему геопросторового ШІ для прогнозування зон потенційного мінного забруднення. Модель використовує різні типи геоданих – інформацію про попередні бойові дії, транспортну мережу, інфраструктуру та інші соціально-економічні фактори. Підхід полягає у змішаних стратегіях вибірки даних та збагачення контексту за допомогою історичних конфліктів та ключових багатодоменних об'єктів (наприклад, будівель, доріг, медичних закладів). Наведений підхід не спрямований на точну локалізацію наземних мін, а радше на виявлення потенційної небезпеки в районах.

Окрему групу становлять дослідження, спрямовані на вдосконалення технологій виявлення поверхневих мін. Сучасні тренди демонструють можливість використання систем комп’ютерного зору та глибокого навчання для автоматичного розпізнавання мін на оптичних зображеннях. Такі підходи ґрунтуються на аналізі оптичних, мультиспектральних або інфрачервоних зображень, отриманих з БПЛА, наземних роботів або стаціонарних камер. Їхня основна мета – підвищення швидкості та безпеки процесів гуманітарного розмінування шляхом автоматичного виявлення ВНП. Розвиток глибоких згорткових нейронних мереж кардинально змінив стан речей у галузі оптичного виявлення, зробивши їх де-факто вибором номер один для більшості завдань класифікації, виявлення та сегментації об’єктів. У дослідженні [14] інструменти з відкритим вихідним кодом використовуються для побудови системи виявлення, а їхня ефективність оцінюється на базі обмеженої кількості даних. Тому проблема обмеженої кількості тренувальних даних може бути ефективно подолана нарощуванням даних. Сучасні системи комп’ютерного зору для виявлення мін часто використовують алгоритми детекції об’єктів, такі як YOLO, Faster R-CNN або SSD [2].

Окремий напрям досліджень пов’язаний із використанням мультиспектральних та інфрачервоних зображень. У таких системах аналізується не лише форма об’єкта, а й температурні або спектральні характеристики поверхні. Зокрема, у дослідженні [15] запропоновано модель глибокого навчання для виявлення протипіхотних мін на інфрачервоних зображеннях довгохвильового діапазону методами transfer learning і attention-based multiple instance learning, які дозволяють ефективно працювати навіть із невеликими наборами навчальних даних. Використання мультиспектральних сенсорів, встановлених на БПЛА з одночасним отриманням RGB- та NIR-зображень дозволяє покращити виявлення мін, особливо в умовах часткового маскування рослинністю [16].

Пропонуються математичні моделі планування очищення територій, які враховують просторовий розподіл потенційно небезпечних ділянок, доступність території та безпеку саперів. Одна з таких включає індекс безпечної доступності (Safe Accessibility Index) для оцінки рівня небезпеки під час планування маршруту обстеження і очищення територій. Використання Safe Accessibility Index дозволяє перейти від простого визначення наявності мін до комплексної оцінки ризику використання території [17]. Для досліджень мінного забруднення його може бути поєднано із: просторовим моделюванням ризику, геостатистичним аналізом, даними ДЗЗ, моделями ШІ.

Водночас більшість досліджень зосереджується переважно на виявленні або просторовому прогнозуванні мін, приділяючи обмежену увагу комплексному аналізу факторів формування мінного забруднення. Зокрема, питання інтегрованого врахування поверхневого розподілу мін та їх можливого вертикального переміщення у ґрунтовому середовищі залишається недостатньо дослідженим і потребує подальшого наукового опрацювання.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри значну кількість досліджень у сфері гуманітарного розмінування, більшість із них зосереджена на технічних аспектах виявлення мін або на оптимізації процесів очищення територій. При цьому питання комплексного врахування поверхневого та вертикального мінного забруднення, а також розроблення методології інтегрованої оцінки ризику з урахуванням глибини залягання вибухонебезпечних предметів, фізико-механічних властивостей ґрунтів та природних процесів їх переміщення залишаються недостатньо дослідженими. Це зумовлює необхідність подальших наукових досліджень у цьому напрямі та розроблення комплексних методологічних підходів до оцінки мінної небезпеки територій.

Метою статті є розроблення та обґрунтування методологічного підходу до оцінки ризику, пов'язаного з поверхневим і вертикальним мінним забрудненням територій, з урахуванням просторового розподілу ВНП, глибини їх залягання та впливу природних і техногенних факторів на їх переміщення у ґрунтовому середовищі.

Для досягнення поставленої мети в роботі визначено такі основні завдання дослідження:

– провести аналіз сучасного стану наукових досліджень і підходів до оцінювання мінного забруднення територій та ризиків, пов'язаних із наявністю мін та ВНП;

– визначити основні характеристики та особливості формування поверхневого і вертикального мінного забруднення територій;

– з'ясувати природні та техногенні фактори, що впливають на переміщення мін і ВНП у вертикальному напрямку в товщі ґрунту.

– сформувати систему показників, що характеризують рівень небезпеки територій з урахуванням поверхневого та вертикального розміщення мін;

– розробити методологічний підхід до комплексної оцінки ризику мінного забруднення, який інтегрує просторові та глибинні параметри розміщення мін та ВНП;

– обґрунтувати можливість застосування отриманого підходу для підвищення ефективності планування робіт з обстеження та гуманітарного розмінування територій;

– виявити ГІС-інструменти просторового аналізу для практичної реалізації наведених показників.

Реалізація поставлених завдань дозволить сформувати комплексну систему оцінювання мінних ризиків, що враховує як поверхневу, так і вертикальну структуру мінного забруднення та може бути використана для підвищення ефективності управління безпекою територій.

Результати та обговорення. Міжнародні стандарти гуманітарного розмінування (IMAS) вимагали надзвичайно високої точності (понад 99,6 %) виявлення мін та ВНП, зокрема 100 % на певну встановлену глибину [18]. Згодом, сучасні стандарти почали базуватися на повному очищенні, а не на статистичному відсотку. Термін «очищення/розмінування (clearance)» у контексті ПМД, стосується завдань або заходів забезпечення видалення та/або знищення всіх небезпек, пов'язаних з мінами та ВНП, у визначеному районі на визначену глибину. У випадку виявлення значних об'єктів небезпеки (мін, касетних боєприпасів, конкретних ВНП) організації повинні документувати ці об'єкти (якомога детальніше), глибину залягання, місце знаходження (з географічного погляду і стосовно інших пов'язаних пристроїв), а також стан об'єктів [19].

Поверхневе мінне забруднення формується внаслідок бойових дій, використання інженерних загороджень, а також під впливом природних і антропогенних процесів. Аналіз факторів, що визначають просторове розміщення мін на поверхні (табл. 1), є ключовим для побудови моделей оцінки ризику та ефективного планування заходів гуманітарного розмінування.

Таблиця 1 – Фактори, що впливають на поверхневе мінне забруднення територій

Фактор	Механізм впливу	Наслідки для мінного забруднення
Рівень бойових дій	Масове використання мінно-вибухових загороджень та боєприпасів	Формування зон з високою щільністю мін
Тип мін та ВНП	Різні типи мають різні способи мінування (ручні, дистанційні та ін.)	Нерівномірний просторовий розподіл мін
Спосіб мінування	Ручне встановлення або дистанційне розсіювання (артилерія, РСЗВ, авіація)	Формування хаотичних мінних полів
Рельєф місцевості	Схили, долини, підвищення впливають на розподіл мін	Накопичення мін у локальних пониженнях рельєфу
Тип землекористування	Сільськогосподарські угіддя, ліси, населені пункти	Різна пріоритетність мінування
Транспортна мережа	Дороги, перехрестя, мости часто мінуються для блокування руху	Висока ймовірність мін поблизу шляхів
Рослинність	Густі рослинні покриви ускладнюють візуальне виявлення мін	Маскування мін на поверхні
Ерозійні процеси	Змивання верхнього шару ґрунту	Оголення або переміщення мін
Діяльність людини	Будівельні роботи, обробка землі, видобуток корисних копалин	Можливе переміщення мін
Метеорологічні умови	Вітер, опади, температурні коливання	Часткове зміщення або оголення мін

Джерело: розроблено автором.

Тип мін, а також умови місцевості визначають стандартну глибину очищення. Наприклад, протипіхотні міни зазвичай встановлюють на глибину (5-20 см), щоб тиск людини був достатнім для їх детонації (в чутливих мінах М14 та ПМН-2 зусилля від двох кілограм), тоді як протитанкові міни розраховані на вагу транспортних засобів, і закопуються глибше (20-50 см). Нерозірвані боєприпаси можуть знаходитися як на поверхні, так і під землею і визначаються типом боєприпасів та умовами їх падіння. Пісок, торф, каміння – занурюють міни глибше з часом через природні процеси. Рослинність та гумусний шар частково «прикривають» міну, тому виникає потреба очищення на більшу глибину. Несприятливі фізико-географічні явища та процеси можуть переміщувати міни (табл. 2), тому виникає потреба визначення додаткової глибини очищення.

Таблиця 2 – Фактори вертикального переміщення мін у ґрунті

Фактор	**Механізм впливу**	**Наслідки для положення мін**
Тип ґрунту	Різна щільність і гранулометричний склад ґрунтів визначає їхню здатність до ущільнення або просідання	У пухких піщаних ґрунтах міни можуть поступово заглиблюватися
Вологість ґрунту	Збільшення вологості знижує міцність ґрунтової структури	Міни можуть занурюватися глибше у вологих ґрунтах
Атмосферні опади	Інтенсивні дощі спричиняють ерозійні процеси та переміщення ґрунту	Міни можуть оголюватися або переміщуватися вниз
Промерзання і відтавання	Циклічне розширення і стискання ґрунту при замерзанні води	Можливе підняття мін в напрямку поверхні
Гравітаційні процеси	Схилові та ерозійні процеси	Міни можуть переміщуватися вниз по схилу
Біологічна активність	Діяльність тварин, кореневих систем рослин	Локальне переміщення мін у вертикальному напрямку
Антропогенний	Оранка, культивація, механічна обробка ґрунту, видобуток копалин, копання	Переміщення мін у верхніх шарах ґрунту
Вібраційні впливи	Робота техніки, вибухи, рух транспорту	Поступове заглиблення або зміщення мін
Ерозійні процеси	Водна та вітрова ерозія	Оголення мін на поверхні
Осідання ґрунту	Ущільнення ґрунтів з часом	Збільшення глибини залягання

Джерело: розроблено автором.

Вітчизняні стандарти встановлюють глибину очищення за замовчуванням не менше 15 см від поверхні, однак допускають її збільшення залежно від ризику й умов [20]. Дослідження [21] на вибірці з 1593 мін демонструє, що глибина залягання 87,5 % виявлених об'єктів коливалася в діапазоні 2,5…15,2 см, тоді як решта були або розкидані по поверхні або ще більше заглиблені в неї. Кожній країні притаманна унікальна специфіка концентрації мін, типів мін, ґрунтових умов, що впливає на те, яку глибину очищення встановлює для саперів і операторів національний орган з питань ПМД. Міжнародні доповіді та звіти не публікують даних про глибини очищення (середні показники) по країнах, а обмежуються площею розмінованої землі та кількістю вилучених мін та ВНП. Як правило, у гуманітарному розмінуванні глибина очищення визначається технічним оглядом або надійною інформацією про очікувану глибину міни/ВНП, а не однією «середньою» величиною для всієї країни. Якщо такої інформації немає, стандарт IMAS 09.10 радить приймати глибину не менше 13 см для мінімального рівня (наприклад, мінімальних металевих протипіхотних мін), а далі цей параметр може коригуватися під час операцій. Сучасні протипіхотні міни часто характеризуються мінімальним вмістом (≤3-5 %) металу, а основними пристроями для їх виявлення усе ще залишаються електромагнітні металодетектори, ефективні на глибину до 15 см за певних умов [22].

Інтегруючи поверхневе та вертикальне забруднення разом із просторовими та природними факторами через нормалізацію, вагові комбінації і просторові моделі, можна отримати кількісний індикатор ризику наземних мін, який служить основою для карт ризику та планування розмінування.

Індикатори ризику наземних мін та ВНП – двовимірні об'єктні ознаки, які підвищують ймовірність розміщення наземних мін/ВНП поблизу них, тоді як міни/ВНП – тривимірні об'єкти. Багато з цих індикаторів можна ідентифікувати за допомогою візуального огляду або аналізу зображень ДЗЗ (руїни будівель, кратери та ями, а також знищена військова техніка та ін.).

Для комплексної оцінки безпечності використання територій, забруднених мінами або іншими ВНП, доцільно застосовувати інтегральний показник Safe Accessibility Index (SAI). Запропонована модель враховує не лише просторове розташування мін, але й вертикальні характеристики їх залягання у ґрунті, що є важливим для оцінки ризику під час господарського використання територій. Під час формування інтегрального показника SAI використано систему вагових коефіцієнтів, що відображають відносну значущість окремих груп факторів у формуванні ризику, як зваженої суми нормалізованих компонентів: поверхневого мінного забруднення, вертикального мінного забруднення, вразливості території та її доступності. Його основна ідея – оцінити, наскільки безпечно починати очищення конкретної ділянки з урахуванням стану сусідніх ділянок. Загальну формулу SAI може бути представлено у вигляді:

$$SAI = w_1 S + w_2 V + w_3 E + w_4 A \quad (1),$$

де S – показник поверхневого мінного забруднення; V – показник вертикального мінного забруднення; E – фактор вразливості території; A – показник доступності території; w_1, w_2, w_3, w_4 – вагові коефіцієнти, загальна сума яких повинна становити 1.

Вагові коефіцієнти та їх раціональні співвідношення формуються з урахуванням таких принципів:

1) $w_1 = 0{,}35$ (пріоритет прямої небезпеки підвищує вагу показників наявності мін або ВНП);

2) $w_2 = 0{,}25$ (складність, невизначеність та прихований характер факторів вертикального мінного забруднення потребують врахування експертної оцінки та геологічних умов);

3) $w_3 = 0{,}25$ (вразливість території, інфраструктури, землекористувань з урахуванням імовірностей контакту людей з небезпекою);

4) $w_4 = 0{,}15$ (фізична доступність території для робіт визначає пріоритетність проведення робіт із розмінування та організації подальшої логістики).

Такий розподіл пояснюється тим, що поверхневе мінне забруднення є основним прямим індикатором небезпеки, оскільки воно безпосередньо відображає просторову концентрацію мін або ВНП. Вертикальне забруднення має дещо меншу, але суттєву вагу, оскільки приховане залягання мін може створювати додатковий ризик для населення та саперів.

Наведені раціональні співвідношення ваг випливають із загальних методологічних підходів побудови композитних (інтегральних) індексів у багатокритеріальному аналізі. Їх формування ґрунтується на основі кількох методичних джерел [23], [24], [25].

У [23] вагові коефіцієнти визначаються через попарне порівняння факторів. Якщо застосувати таку логіку до задачі мінного ризику, то фактор прямої небезпеки (наявність мін або ВНП) отримує найбільшу вагу; складність, невизначеність та прихований характер факторів вертикальне мінного забруднення – дещо меншу; вразливість території, інфраструктури та землекористування – приблизно таку ж, а операційні умови фізичної доступності території – найменшу. Вагові коефіцієнти визначено у вигляді раціонального співвідношення, яке відображає ієрархію факторів ризику шляхом співвідношення: 0,35:0,25:0,25:0,15.

У [24] наведено методологію побудови композитних (інтегральних) індексів для ризик-аналізу, де з-поміж варіантів визначення ваг використовується посилення ваг ключових факторів ризику, що також відповідає наведеному співвідношенню.

Для просторових моделей ризику (у тому числі мінного) широко застосовується Weighted Linear Combination (WLC) [25]. В таких моделях найбільшу вагу одержують фактори, що безпосередньо визначають небезпеку, наступний рівень – умови формування ризику, подальші рівні – операційні або допоміжні фактори.

Розглянемо детальніше компоненти моделі:

1. Показник поверхневого мінного забруднення (S) – параметр, що характеризує ймовірність наявності мін на поверхні або у верхньому шарі ґрунту. Поверхневе забруднення неоднорідне. Міни можуть розташовуватись кластерами, коридорами або хаотично. Показник може враховувати: щільність виявлених мін; результати нетехнічного обстеження; інтенсивність бойових дій; відстань до лінії фронту; тип місцевості.

Узагальнено:

$$S = f(D_m, B, T) \quad (2),$$

де D_m – щільність мінного забруднення; B – інтенсивність бойових дій; T – тип місцевості (доступність поверхні для очищення).

2. Показник вертикального (прихованого) мінного забруднення (V) – відображає глибину залягання мін у ґрунті та ймовірність їх вертикального переміщення. Такі міни знаходяться під поверхнею ґрунту і не видимі без спеціальних технічних засобів. Показник може враховувати: глибину залягання мін; тип ґрунту (піски дозволяють мінам швидше «просідати», тоді як глини «фіксують»); процеси ерозії; сезонне промерзання ґрунту; вплив опадів.

Узагальнено:

$$V = f(Z, G, H) \quad (3),$$

де Z – середня глибина залягання мін; G – тип ґрунту; H – гідрологічні умови.

3. Показник вразливості території (E) – характеризує ступінь потенційного впливу мінної небезпеки на ймовірність контакту з мінами або ВНП населення, інфраструктури або транспорту. Його фактори включають: щільність населення (більше населення на території з мінним забрудненням збільшує ризик ймовірності жертв або інцидентів); сільськогосподарське використання (підвищує ризик контакту з прихованими мінами); наявність інфраструктури (високий рівень інфраструктури підвищує потенційний вплив мінної небезпеки, бо пошкодження таких об’єктів зумовлює серйозні наслідки); транспортної мережі (мінна небезпека на транспортних шляхах збільшує ризик порушення пересування та евакуації).

$$E = f(P, L, I) \quad (4),$$

де P – щільність населення; L – використання земель; I – інфраструктура.

4. Показник доступності території (A) визначає ступінь просторового доступу до потенційно небезпечної території. Він включає: відстань до доріг (забезпечення швидкого доступу до території); відстань до населених пунктів (логістичні переваги); перешкоди рельєфу (будь-які природні або штучні елементи місцевості, що ускладнюють фізичний доступ до ділянки або пересування саперів чи технічних засобів на ній).

$$A = f(R, D, M) \quad (5),$$

де R – транспортна мережа; D – відстань до населених пунктів (чим ближче територія до доріг, тим вищий показник доступності); M – морфологія рельєфу.

Інтерпретація значень індексу SAI може бути нормовано в діапазоні 0–1 (табл. 3).

Таблиця 3 – Класифікація рівнів безпечності території за значенням індексу SAI

Значення SAI	Рівень безпечності
0,8 – 1,0	безпечна територія
0,6 – 0,8	відносно безпечна територія
0,4 – 0,6	помірний рівень ризику
0,2 – 0,4	високий рівень ризику
0 – 0,2	дуже небезпечна територія

Джерело: сформованою за загальним принципом нормалізації композитних індексів.

Для побудови моделей оцінки ризику мінного забруднення може використовуватися комплекс інструментів просторового аналізу геоінформаційних систем (ГІС), які дозволяють обробляти, інтегрувати та аналізувати різнорідні просторові дані (табл. 4), що відображають як ймовірність наявності мін, так і потенційний вплив на населення та інфраструктуру. Інтеграція цих показників у ГІС дозволяє формувати карти ризику та визначати пріоритетні території для проведення робіт з гуманітарного розмінування.

Таблиця 4 – Показники оцінки ризику мінного забруднення для ГІС-моделі

Показник	Опис показника	Джерело даних	GIS-інструмент
Щільність мінного забруднення	Кількість виявлених мін або ВНП на одиницю площі	Дані розмінування, польові обстеження	Kernel Density (Ядерна оцінка щільності)
Відстань до зон бойових дій	Просторова близькість до районів активних бойових дій	Військово-аналітичні дані, історичні карти	Euclidean Distance (Евклідова відстань)
Тип землекористування	Категорії використання території (ліси, поля, населені пункти)	Кадастрові та супутникові дані	Land Use Classification (Класифікація землекористування)
Рельєф місцевості	Висота, крутизна схилів, морфологія поверхні	Цифрова модель рельєфу	Slope, Terrain Analysis (Аналіз схилів і рельєфу)
Тип ґрунтів	Фізико-механічні властивості ґрунту	Ґрунтові карти	Reclassification (Перекласифікація)
Вертикальна міграція мін	Ймовірність переміщення мін у товщі ґрунту	Геологічні та гідрологічні дані	Spatial Modelling (Просторове моделювання)
Відстань до доріг	Просторова близькість до транспортної інфраструктури	Транспортні карти	Buffer / Distance Analysis (Буферний аналіз / аналіз відстаней)
Відстань до населених пунктів	Потенційна загроза для населення	Демографічні та картографічні дані	Buffer Analysis (Буферний аналіз)
Щільність населення	Рівень потенційної експозиції людей до ризику	Статистичні дані	Spatial Join (Просторове приєднання)
Результати розмінування	Інформація про очищені або підозрювані території	Оперативні дані розмінування	Overlay Analysis (Оверлейний аналіз)

Джерело: розроблено автором.

Запропонована модель має кілька важливих переваг:

1) дозволяє врахувати вертикальний компонент мінного забруднення;

2) дані легко можуть взаємодіяти з ГІС та системами управління інформацією для ПМД;

3) використання даних ДЗЗ дозволяє накопичувати значну інформацію про поверхневе забруднення;

4) верифіковані дані можна використати для машинного навчання та оптимальної оцінки параметрів у просторовому моделюванні ризиків.

Висновки. Порівняльний аналіз показує, що поверхневе та вертикальне мінне забруднення мають різні механізми формування та просторові характеристики. Якщо поверхневе мінне забруднення переважно визначається військово-тактичними факторами та проявляється у горизонтальному розподілі мін, то вертикальне забруднення формується під впливом природних процесів і характеризується зміною глибини їх залягання. Врахування вертикального компонента мінного забруднення суттєво підвищує точність оцінювання рівнів небезпеки. У традиційних підходах, які базуються переважно на аналізі поверхневого розміщення мін, є ймовірність недооцінювання ризиків у тих випадках, коли ВНП перебувають на значній глибині або змінюють своє положення внаслідок природних процесів. Запропонований підхід дозволяє більш повно відобразити реальний стан мінної небезпеки територій та підвищити ефективність планування заходів з їх обстеження і очищення.

Комплексне врахування обох типів забруднення є необхідною умовою для побудови адекватних моделей оцінки ризику мінної небезпеки та підвищення ефективності планування робіт із гуманітарного розмінування.

У межах дослідження запропоновано підхід до комплексної оцінки ризику мінного забруднення, який враховує як поверхневі, так і вертикальні характеристики розміщення мін. Основні параметри оцінки ґрунтуються на щільності мінного забруднення території, глибині залягання мін та ВНП, типу ґрунту, морфологічних особливостей рельєфу та рівнях антропогенного навантаження. Інтеграція зазначених параметрів дозволяє формувати узагальнений показник ризику, який може бути використано для класифікації територій за рівнями мінної небезпеки.

Отримані результати можуть бути використані для удосконалення системи управління мінними ризиками, зокрема під час визначення пріоритетності проведення робіт з гуманітарного розмінування, планування обстеження територій та розроблення заходів щодо мінімізації загроз для населення. Крім того, запропонований методологічний підхід може бути інтегрований у геоінформаційні системи для створення карт ризику мінного забруднення та підтримки прийняття управлінських рішень у сфері безпеки територій.

Обговорення результатів показує, що подальші дослідження доцільно спрямувати на вдосконалення моделей прогнозування вертикального переміщення мін у різних типах ґрунтів, а також на інтеграцію геопросторових даних, результатів польових обстежень і сучасних технологій дистанційного зондування Землі. Це сприятиме підвищенню точності оцінювання мінної небезпеки та ефективності заходів із розмінування територій.

Перспективи подальших досліджень полягають в оптимізації моделей прогнозування переміщення мін та ВНП у ґрунтовому середовищі, розширенні використання геоінформаційних технологій та інтеграції польових даних із результатами ДЗЗ для підвищення точності оцінки мінних ризиків.

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

Під час написання цього матеріалу автори не використовували генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.

Список використаних джерел

1. Hofmann, U., & Juergensen, O. (2017). Preparing for the future: How the SDGs impact mine action. *The Journal of Conventional Weapons Destruction, 21*(3), Article 12. https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol21/iss3/12.

2. Vivoli, E., Bertini, M., & Capineri, L. (2024). Deep Learning-Based Real-Time detection of surface landmines using optical imaging. *Remote Sensing, 16*(4), 677. https://doi.org/10.3390/rs16040677.

3. Krtalić, A., Divjak, A. K., & Župan, R. (2012). Thematic maps for humanitarian demining. *Kartografija i Geoinformacije (Cartography and Geoinformation), 11*(17), 26–41. https://kig.kartografija.hr/index.php/kig/article/view/41/74.

4. Гуцул, Т. (2025). Геоінформаційні системи в гуманітарному розмінуванні територій: історія, розвиток, сучасність. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки, 3*(63), 85–92. https://doi.org/10.17721/1728-2217.2025.63.85-92.

5. Hutsul, T., Lysko, B., Zhezhera, I., Tkach, V., & Tsvyk, T. (2025). Recommendations for planning UAV flight missions for geodata collection. *Reports on Geodesy and Geoinformatics, 119*(1), 62–70. https://doi.org/10.2478/rgg-2025-0007.

6. Hutsul, T., Khobzei, M., Tkach, V., Krulikovskyi, O., Moisiuk, O., Ivashko, V., & Samila, A. (2024). Review of approaches to the use of unmanned aerial vehicles, remote sensing and geographic information systems in humanitarian demining: Ukrainian case. *Heliyon, 10*(7), e29142. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29142.

7. Зацерковний, В., & Ніколюк, І. (2025). Використання БПЛА для виявлення вибухонебезпечних предметів та побудови карт при гуманітарному розмінуванні. *Технічні науки та технології, 1*(39), 328–345. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1(39)-328-345.

8. Ляшенко, Д., Зобнів, І., & Цвик, О. (2025). Картографування мінної небезпеки за даними великомасштабних багатоспектральних знімань. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія, 1*(108), 103–108. https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.14

9. Schultz, C., Alegría, A. C., Cornelis, J., & Sahli, H. (2015). Comparison of spatial and aspatial logistic regression models for landmine risk mapping. *Applied Geography*, *66*, 52–63. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.11.005.

10. Alegria, A. C., Zimanyi, E., Cornelis, J., & Sahli, H. (2017). Hazard mapping of landmines and ERW using Geo-Spatial techniques. *Journal of Remote Sensing & GIS*, 06(02). https://doi.org/10.4172/2469-4134.1000197.

11. Tobler, W. R. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography, 46*(sup1), 234–240. https://doi.org/10.2307/143141.

12. Гуцул, Т. (2025). Сучасні тенденції штучного інтелекту в гуманітарному розмінуванні територій та його інтеграції в геоінформаційні системи. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки, 4*(64), 67–74. https://doi.org/10.17721/1728-2217.2025.64.67-74.

13. Cirillo, F., Solmaz, G., Peng, Y., Bizer, C., & Jebens, M. (2024, May 15). *Desk-AId: Humanitarian Aid Desk Assessment with Geospatial AI for Predicting Landmine Areas*. arXiv.org. https://arxiv.org/abs/2405.09444.

14. Саприкін, Є. (2024). Оптичне виявлення наземних мін з використанням глибокого навчання на основі обмеженого набору даних аерознімання. *Наукоємні технології, 62*(2), 107–115. https://doi.org/10.18372/2310-5461.62.18708.

15. Kim, J., & Kwon, G. (2025). Image-Level Anti-Personnel landmine detection using Deep Learning in Long-Wave Infrared Images. *Applied Sciences, 15*(15), 8613. https://doi.org/10.3390/app15158613.

16. Qiu, Z., Guo, H., Hu, J., Jiang, H., & Luo, C. (2023). Joint fusion and detection via deep learning in UAV-Borne multispectral sensing of scatterable landmine. *Sensors, 23*(12), 5693. https://doi.org/10.3390/s23125693.

17. Camacho-Sanchez, C., Yie-Pinedo, R., & Galindo, G. (2023). Humanitarian demining for the clearance of landmine-affected areas. *Socio-Economic Planning Sciences, 88*, 101611. https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101611.

18. United Nations Mine Action Service. (2013). *International Mine Action Standards (IMAS) 09.10: Clearance requirements* (Edition 1, Amendment 2). United Nations. www.mineaction-standards.org/fileadmin/uploads/imas/Standards/English/IMAS_09.10_Ed.1_Am.2.pdf.

19. United Nations Mine Action Service. (2019). *International Mine Action Standards (IMAS) 07.11: Land release* (Edition 1, Amendment 5). United Nations. www.mineactionstand-ards.org/fileadmin/uploads/imas/Standards/English/IMAS_07.11_Ed.1_Am.5.pdf.

20. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. (2019). *СОП-09.10/ДСНС. Порядок проведення очищення (розмінування) територій, забруднених ВНП, ручним способом* (Окреме доручення № В-127, від 04.09.2019). https://dsns.gov.ua/up-load/2/6/8/9/6/4/w8U1FRIA8jtuJP1ay8pcIxPRJIwwhOM75TYtsxSJ.pdf.

21. Wilson, J. N., Chen, S., Reid, M., & Xu, L. (2007). A large-scale systematic evaluation of algorithms using ground-penetrating radar for landmine detection and discrimination. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45*(8), 2560–2572. https://doi.org/10.1109/tgrs.2007.900993.

22. Kryvova, O., Zimmer, M., Smethers, P., & Baur, J. (2025). *Field testing and evaluation: Challenges in subsurface detection* (Breakout session paper, GICHD Innovation Conference 2025). Geneva International Centre for Humanitarian Demining. https://www.gichd.org/fileadmin/uploads/gichd/Documents/Innovation_Conference_2025/Day3/Breakout_Field_Test-ing_GICHD_Innovation_Conference_2025.pdf.

23. Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. New York, NY: McGraw-Hill.

24. Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S., Hoffmann, A., & Giovannini, E. (2008). *Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide*. Paris: OECD Publishing.

25. Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria decision analysis in geographic information science*. New York, NY: Springer.

References

1. Hofmann, U., & Juergensen, O. (2017). Preparing for the future: How the SDGs impact mine action. *The Journal of Conventional Weapons Destruction, 21*(3), Article 12. https://com-mons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol21/iss3/12.

2. Vivoli, E., Bertini, M., & Capineri, L. (2024). Deep Learning-Based Real-Time detection of surface landmines using optical imaging. *Remote Sensing, 16*(4), 677. https://doi.org/10.3390/rs16040677.

3. Krtalić, A., Divjak, A. K., & Župan, R. (2012). Thematic maps for humanitarian demining. *Kartografija i Geoinformacije (Cartography and Geoinformation), 11*(17), 26–41. https://kig.kartografija.hr/index.php/kig/article/view/41/74.

4. Hutsul, T. (2025). Heoinformatsiini systemy v humanitarnomu rozminuvanni terytorii: istoriia, rozvytok, suchasnist. [Geographic Information Systems in humanitarian demining: history, development and modernity.] *Bulletin of Taras Shevchenko Kyiv National University. Military special sciences - Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Military-Special Sciences, 3*(63), 85-92. https://doi.org/10.17721/1728-2217.2025.63.85-92.

5. Hutsul, T., Lysko, B., Zhezhera, I., Tkach, V., & Tsvyk, T. (2025). Recommendations for planning UAV flight missions for geodata collection. *Reports on Geodesy and Geoinformatics, 119*(1), 62–70. https://doi.org/10.2478/rgg-2025-0007.

6. Hutsul, T., Khobzei, M., Tkach, V., Krulikovskyi, O., Moisiuk, O., Ivashko, V., & Samila, A. (2024). Review of approaches to the use of unmanned aerial vehicles, remote sensing and geographic information systems in humanitarian demining: Ukrainian case. *Heliyon, 10*(7), e29142. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29142.

7. Zatserkovnyi, V., & Nikoliuk, I. (2025). Vykorystannia BPLA dlia vyiavlennia vybukhonebezpechnykh predmetiv ta pobudovy kart pry humanitarnomu rozminuvanni. [Using UAVs to detect explosives and create maps in humanitarian demining]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical Sciences and Technologies, 1*(39), 328–345. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1(39)-328-345.

8. Liashenko, D., Zobniv, I., & Tsvyk, O. (2025). Kartohrafuvannia minnoi nebezpeky za danymy velykomasshtabnykh bahatospektralnykh zniman. [Mapping mine risk using large-scale multispectral imagery]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Heolohiia – Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 1*(108), 103-108. https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.14.

9. Schultz, C., Alegría, A. C., Cornelis, J., & Sahli, H. (2015). Comparison of spatial and aspatial logistic regression models for landmine risk mapping. *Applied Geography, 66,* 52–63. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.11.005.

10. Alegria, A. C., Zimanyi, E., Cornelis, J., & Sahli, H. (2017). Hazard mapping of landmines and ERW using Geo-Spatial techniques. *Journal of Remote Sensing & GIS,* 06(02). https://doi.org/10.4172/2469-4134.1000197.

11. Tobler, W. R. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography, 46*(sup1), 234–240. https://doi.org/10.2307/143141

12. Hutsul, T. (2025). Suchasni tendentsii shtuchnoho intelektu v humanitarnomu rozminuvanni terytorii ta yoho intehratsii v heoinformatsiini systemy. [Modern trends of artificial intelligence in humanitarian territory demining and it's integration into geoinformation systems.] *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Viiskovo-spetsialni nauky - Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Military-Special Sciences, 4*(64), 67-74. https://doi.org/10.17721/1728-2217.2025.64.67-74 [in Ukrainian]

13. Cirillo, F., Solmaz, G., Peng, Y., Bizer, C., & Jebens, M. (2024, May 15). *Desk-AId: Humanitarian Aid Desk Assessment with Geospatial AI for Predicting Landmine Areas*. arXiv.org. https://arxiv.org/abs/2405.09444

14. Saprykin, I. (2024). Optychne vyiavlennia nazemnykh min z vykorystanniam hlybokoho navchannia na osnovi obmezhenoho naboru danykh aeroznimannia. [Optical deep learning landmine detection based on limited dataset of aerial imagery.] *Naukoiemni tekhnolohii - Science-Based Technologies, 62*(2), 107–115. https://doi.org/10.18372/2310-5461.62.18708.

15. Kim, J., & Kwon, G. (2025). Image-Level Anti-Personnel landmine detection using Deep Learning in Long-Wave Infrared Images. *Applied Sciences, 15*(15), 8613. https://doi.org/10.3390/app15158613.

16. Qiu, Z., Guo, H., Hu, J., Jiang, H., & Luo, C. (2023). Joint fusion and detection via deep learning in UAV-Borne multispectral sensing of scatterable landmine. *Sensors, 23*(12), 5693. https://doi.org/10.3390/s23125693.

17. Camacho-Sanchez, C., Yie-Pinedo, R., & Galindo, G. (2023). Humanitarian demining for the clearance of landmine-affected areas. *Socio-Economic Planning Sciences, 88,* 101611. https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101611.

18. United Nations Mine Action Service. (2013). *International Mine Action Standards (IMAS) 09.10: Clearance requirements* (Edition 1, Amendment 2). United Nations. www.mineactionstandards.org/fileadmin/uploads/imas/Standards/English/IMAS_09.10_Ed.1_Am.2.pdf.

19. United Nations Mine Action Service. (2019). *International Mine Action Standards (IMAS) 07.11: Land release* (Edition 1, Amendment 5). United Nations. www.mineactionstandards.org/fileadmin/uploads/imas/Standards/English/IMAS_07.11_Ed.1_Am.5.pdf.

20. Derzhavna sluzhba Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii. [State Service of Ukraine for Emergency Situations] (2019). *SOP-09.10/DSNS. Poriadok provedennia ochyshchennia (rozminuvannia) terytorii, zabrudnenykh VNP, ruchnym sposobom (Okreme doruchennia № V-127 vid 04.09.2019)* [Procedure for manual clearance (demining) of territories contaminated with explosive ordnance]. https://dsns.gov.ua/upload/2/6/8/9/6/4/w8U1FRIA8jtuJP1ay8pcIxPRJIwwhOM75TYtsxSJ.pdf.

21. Wilson, J. N., Chen, S., Reid, M., & Xu, L. (2007). A large-scale systematic evaluation of algorithms using ground-penetrating radar for landmine detection and discrimination. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45*(8), 2560–2572. https://doi.org/10.1109/tgrs.2007.900993.

22. Kryvova, O., Zimmer, M., Smethers, P., & Baur, J. (2025). *Field testing and evaluation: Challenges in subsurface detection* (Breakout session paper, GICHD Innovation Conference 2025). Geneva International Centre for Humanitarian Demining. https://www.gichd.org/fileadmin/uploads/gichd/Documents/Innovation_Conference_2025/Day3/Breakout_Field_Testing_GICHD_Innovation_Conference_2025.pdf.

23. Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. New York, NY: McGraw-Hill.

24. Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S., Hoffmann, A., & Giovannini, E. (2008). *Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide*. Paris: OECD Publishing.

25. Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria decision analysis in geographic information science*. NY: Springer.

Дата першого надходження статті до видання: 11.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 31.03.2026

UDC 355.4+528.9+614.8

Taras Hutsul
candidate of technical sciences, associate professor, senior research fellow
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University (Chernivtsi, Ukraine)
E-mail: t.gutsul@chnu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-7192-3289
Scopus ID: 57204148923. **ResearcherID:** R-8012-2017

SURFACE AND SUBSURFACE MINE CONTAMINATION: RISK ASSESSMENT METHODOLOGY

Mine contamination of territories is one of the global threats to public safety and post-war recovery, as it creates a long-term hazard for the population, infrastructure, and economic activities. Traditional approaches to assess mine hazards are mainly based on the analysis of the surface distribution of explosive remnants of war or on data regarding mine density, which does not account for the complex processes of mine movement within the soil environment. In this regard, the development of comprehensive methods for assessing the risk of mine contamination that consider both surface and vertical processes is of particular relevance.

The aim of this study is to develop a methodology for assess the risk of mine contamination of territories based on geospatial analysis and the integration of indicators of surface and vertical contamination. The paper analyzes modern approaches to spatial modeling of mine hazards, the use of remote sensing data, geostatistical methods, and artificial intelligence (AI) tools for predicting potentially hazardous areas. A system of indicators for assessing the risk of mine contamination is proposed, including indicators of surface mine concentration, factors of vertical mine displacement in the soil, and spatial parameters of territorial accessibility. Geoinformation models and the integrated the Safe Accessibility Index approach are used to combine these indicators.

An approach to the integrated risk assessment is proposed, which takes into account both spatial and subsurface parameters of contamination, as well as the possibilities of applying geoinformation technologies for zoning territories according to hazard levels. The practical implementation of the proposed approach will contribute to improving the efficiency of planning humanitarian demining activities, optimizing resource allocation, and reducing risks for personnel and the population.

Keywords: *humanitarian demining; mine contamination; geospatial data; risk assessment; hazard maps; spatial analysis*.
Tables: 4. References: 25.

Гуцул Т. В. Поверхневе і вертикальне мінне забруднення: методологія оцінки ризику. *Технічні науки та технології*, 2026. № 2(44). С. 511-524. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-511-524.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-525-535
УДК 691.55:699.88

Володимир Яковлевич Керш[1], Володимир Володимирович Бацуєв[2], Тетяна Василівна Ляшенко[3], Микола Володимирович Хлицов[4]

[1]кандидат технічних наук, професор кафедри міського будівництва та господарства
Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)
E-mail: kersh@odaba.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-6085-5260. **ResearcherID:** LGZ-1769-2024

[2]здобувач ступеня доктора філософії, аспірант кафедри міського будівництва та господарства
Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)
E-mail: 924v.batsuiev@odaba.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0007-7276-2185. **ResearcherID:** PVE-4973-2026

[3]доктор технічних наук, професор кафедри процесів та апаратів в технології будівельних матервалів
Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)
E-mail: lyashenko@odaba.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-6232-4866. **ResearcherID:** PVE-2402-2026

[4]кандидат технічних наук, доцент кафедри процесів та апаратів в технології будівельних матеріалів
Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)
E-mail: khlytsov@odaba.edu.ua. **ResearcherID:** PVE-2229-2026

ГІПСОЦЕМЕНТНО-ЗОЛЬНІ КОМПОЗИЦІЇ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ФАСАДІВ ІСТОРИЧНИХ БУДІВЕЛЬ

У статті представлено результати комплексного дослідження гіпсоцементнозольних складів, призначених для ремонту і реставрації фасадів будівель з вапняку-черепашнику. На першому етапі дослідження встановлено базовий склад суміші, підтверджено достатній рівень водостійкості, паропроникності, адгезії та деформативних властивостей. На другому етапі вивчено вплив пластифікатора, гідрофобізатора та фіброволокна на міцність у трьох станах зволоження матеріалу: сухому, рівноважному та водонасиченому. Побудовано математичні моделі властивостей. Аналіз однофакторних залежностей показав неоднозначний вплив добавок залежно від ступеня зволоження матеріалу. Намічені подальші дослідження, пов'язані з введенням мікрокремнезему та метилцелюлози.

***Ключові слова**: вапняк-черепашник; гіпсоцементнозольна суміш; планований експеримент; водостійкість; міцність; паропроникність; адгезія; вологісні деформації.*
Рис.: 5. Табл.: 3. Бібл.: 19.

Постановка проблеми. Матеріалом, з якого зведена значна кількість будівель півдня України, зокрема міста Одеси, є місцевий природний камінь — вапняк-черепашник. Цей матеріал, що утворився з решток раковин морських організмів (рис. 1), відзначається рядом цінних будівельно-технічних властивостей: відносно низькою теплопровідністю, хорошими шумозахисними характеристиками, доступністю та невисокою вартістю [1]. Натуральний матеріал відповідає вимогам екології на всіх етапах життєвого циклу – від виробництва до деградації та утилізації.



Рис. 1. Структура черепашнику
Джерело: розроблено авторами.

© В. Я. Керш, В. В. Бацуєв, Т. В. Ляшенко, М. В. Хлицов, 2026

Водночас черепашник має суттєвий недолік – значну втрату міцності при зволоженні, що є головною причиною зниження несучої здатності конструкцій аж до їхнього повного руйнування [2], деякі приклади показано на рис. 2.

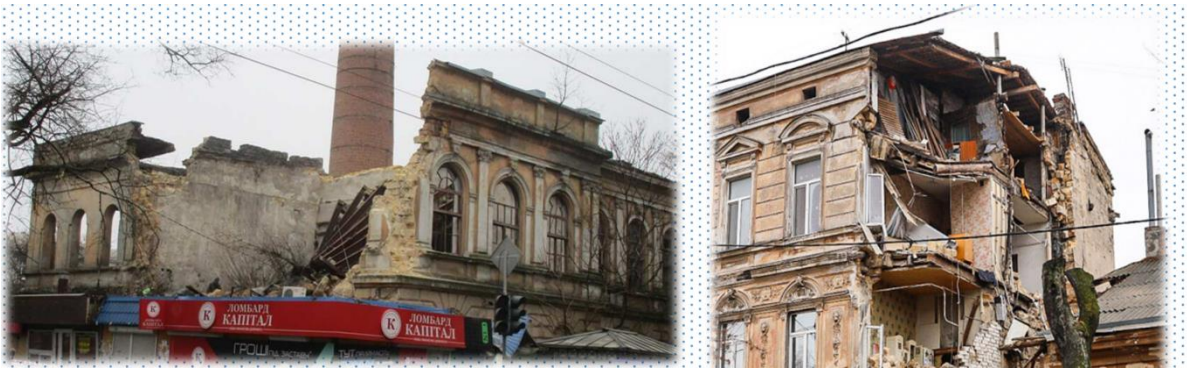


Рис. 2. Приклади обрушення будівель з черепашнику
Джерело: розроблено авторами.

Руйнування будівель з черепашнику в Одесі останніми роками трапляються дедалі частіше [3]. Серед факторів, що спричиняють зволоження зовнішніх стін, слід виділити: відсутність або руйнування вимощення, неякісну гідроізоляцію фундаментів, пошкодження системи відведення дощової води, а також, що найважливіше, — пошкодження або повну відсутність штукатурного шару.

Практика показує, що спроби ремонту стін з черепашника звичайними цементно-піщаними складами нерідко прискорюють руйнування конструкцій. Це зумовлено структурною несумісністю матеріалів: надмірно висока міцність штукатурки, відмінність деформативних властивостей та, головне, менша паропроникність штукатурного шару порівняно з черепашником блокують природний вологообмін стіни [4]. Це призводить до відшарування цементної штукатурки від стін з черепашнику (рис. 3).



Рис. 3. Приклади відшаровування штукатурки від стін з черепашнику
Джерело: розроблено авторами

Актуальність теми дослідження. Включення історичного центру Одеси до Списку всесвітньої спадщини ЮНЕСКО, порушувати питання ремонту і реставрації міської забудови на новий рівень відповідальності [5].

Отримання такого статусу не лише відкриває доступ до міжнародної підтримки, а й вимагає суворого дотримання технологій збереження універсальної цінності об'єктів. Проте аналіз ринку показує, що широко розрекламовані імпортні суміші, які позиціонуються як універсальні, часто ігнорують специфіку місцевого вапняку-черепашнику [6].

На відміну від цегляного мурування, структура черепашнику потребує особливої фізико-хімічної сумісності. Відсутність такої гармонії між основою та штукатуркою призводить до розтріскування, втрати адгезії та прискореної деградації історичних фасадів. Використання неадаптованих штукатурок стає причиною накопичення внутрішніх напружень, що неминуче веде до відшарування оздоблювального шару та руйнування самої стіни [7]. У цьому контексті розробка бюджетних, але технологічно вивірених вітчизняних матеріалів для санації будівель із черепашнику є актуальним завданням для збереження житлової забудови, а також архітектурної автентичності міста.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз вітчизняної та зарубіжної наукової літератури свідчить про відсутність систематичних досліджень щодо застосування гіпсоцементно-пуцоланових в'яжучих у штукатурних сумішах для стін із черепашнику. Серед застосовуваних в'яжучих найбільш сумісними з вапняком-черепашником за фізико-механічними властивостями є вапно та гіпс. Вапняні суміші, наприклад, імпортний склад Histolith® Trass-Kalkputz фірми CAPAROL [8], мають високу паропроникність, проте вимагають нанесення тонкими шарами, тривалого тверднення в контрольованих умовах і захисту від атмосферних впливів під час твердіння, що робить їхнє застосування на фасадах ускладненим.

Гіпсові матеріали є перспективними завдяки швидкому твердінню, регульованому часу схоплювання, низькій теплопровідності, широкій сировинній базі та невисокій вартості [9]. Основний їхній недолік — низька водостійкість, обумовлена суттєвим зниженням міцності при зволоженні. Коефіцієнт розм'якшення будівельного гіпсу становить лише 0,30–0,45, що унеможливлює його використання у чистому вигляді для зовнішніх робіт [10].

Одним з найефективніших підходів до підвищення водостійкості гіпсових матеріалів вважається введення цементу та пуцоланових добавок (зола-винесення) з утворенням гіпсоцементно-зольних ГЦЗ-систем [11–13]. Ці роботи, однак, не стосувалися специфіки застосування таких систем для ремонту фасадів з черепашника. Таким чином, розробка вітчизняних штукатурних матеріалів спеціального призначення на ГЦЗ-в'яжучому для стін з черепашника є актуальним науковим і практичним завданням.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз наявних вітчизняних і зарубіжних джерел дав змогу дійти висновку про відсутність наукової інформації щодо можливого застосування ГЦЗ в'яжучих у штукатурних сумішах для стін із черепашнику, а також щодо досліджень комплексу різноманітних властивостей таких сумішей спеціального призначення, важливих з погляду узгодженості штукатурного шару з основним матеріалом стіни. Невивченою на даний час є поведінка ГЦЗ матеріалу з модифікуючими добавками та армованого волокнами при його зволоженні.

Метою статті є аналіз впливу добавок – пластифікуючої, гідрофобізуючої і фібри – на міцність гіпсоцементнозольної штукатурної суміші в різних станах вологості матеріалу.

Для досягнення цієї мети на даному етапі вирішено такі завдання:

1) на основі планованого експерименту виготовлено дослідні зразки,

2) виміряно міцність зразків при стиску і при вигіні в різних станах вологості,

3) побудовані математичні моделі властивостей,

4) встановлено індивідуальний вплив рецептурних факторів на міцність у різних станах вологості,

5) встановлено раціональний склад суміші,

6) прийнято рішення про подальшу модифікацію складу за рахунок зміцнюючих і водоутримуючих добавок.

Виклад основного матеріалу. Стратегія дослідження включає три послідовні етапи: перший — визначення базового складу ГЦЗ в'яжучого та комплексне вивчення

його властивостей; другий – модифікація складу з підвищенням показників міцності, водостійкості, адгезії та паропроникності за рахунок хімічних і модифікуючих добавок (пластифікатор, гідрофобізатор, фібра); третій — вдосконалення суміші з введенням мікрокремнезему та метилцелюлози з подальшим частковим заміщенням в'яжучого відходами каменепілення черепашника для узгодження властивостей та здешевлення складу.

У цій статті розглянуто результати перших двох етапів. Завдання включали: встановлення базового складу та оцінку основних властивостей (міцність, водостійкість, паропроникність, адгезія, деформативні властивості); вивчення впливу хімічних добавок і фібри на міцність при стиску та вигині у різних станах зволоження матеріалу.

Перший етап: базовий склад ГЦЗ в'яжучого

На першому етапі в'яжуча основа штукатурного складу формувалася з гіпсу Г5 у поєднанні з меленим цементним клінкером та золою ТЕС як пуцоланową добавкою. Для підвищення пластичності та водостійкості додатково вводили гашене вапно. Склад варіювався в трифакторному планованому експерименті B_3 [14] з незалежними змінними: кількість цементу (X1: 40–60 мас. ч. на 100 ч. гіпсу), вапна (X2: 40–60 мас. ч.) та золи (X3: 20–60 мас. ч.). Водотверде відношення, підібране за нормальною густиною суміші, становило 0,6. Зразки виготовлено у вигляді стандартних балочок розміром 40×40×160 мм. Вимірювання міцності проводилося через 7 та 28 діб тверднення.

За результатами першого етапу встановлено базовий склад: Г – 50 %, Ц – 30 %, З – 20 %. Лабораторна перевірка підтвердила прийнятний рівень водостійкості, адгезії, паропроникності та деформативних характеристик для ремонтних робіт на фасадах з черепашнику. Таблиця 1 узагальнює порівняльні характеристики черепашнику та розробленого ГЦЗ складу.

Таблиця 1 – Порівняння основних властивостей черепашнику та ГЦЗ складу

Властивість	Черепашник	ГЦЗ склад	Вимога
Міцність на стиск, МПа	2,0–3,5	4,0–6,0	Узгодженість
Паропроникність, мг/(м·год·Па)	0,07	0,08–0,09	> матеріалу стіни
Коефіцієнт розм'якшення	0,7–0,75	0,70–0,80	> матеріалу стіни
Адгезія до черепашнику, МПа	–	0,25–0,40	> 0,20

Джерело: розроблено авторами.

Водостійкість оцінювалася коефіцієнтом розм'якшення $K_р = R_{вол}/R_{сух}$ та запропонованим індексом водостійкості $I_в = R^2_{вол}/R_{сух}$ [15], який більш коректно відображає реальну несучу здатність матеріалу в умовах зволоження та є більш адекватною і чутливою характеристикою при моделюванні. Для деяких зразків ГЦЗ складу Кр наближається до 0,8 навіть після 48 годин замочування.

Виміряна паропроникність черепашнику становить 0,07 мг/(м·год·Па), тоді як паропроникність розроблених складів — 0,08–0,09 мг/(м·год·Па) [16, 17], що гарантує відсутність перешкод для природного вологообміну конструкцій. Слід зазначити, що даних вимірювання паропроникності черепашнику другими дослідниками знайти не вдалося. За табличними даними ДСТУ 9191 [18] для вапняку порівнянної щільності 1800 кг/м³ наведено значення коефіцієнта паропроникності 0,075 мг/(м·год·Па), що дещо перевищує наші результати. Однак слід розуміти, що ми використовували в експерименті не нові камені, а відібрані з реальних конструкцій, які пропрацювали понад 100 років. У результаті тривалої експлуатації під навантаженням структура матеріалу ущільнилася, пори закольматувалися відкладеннями солей, і проникність для пари погіршилася. Оскі-

льки розроблюваний склад призначений для ремонту існуючих старих будівель, прийняття величини 0,07 мг/(м· год·Па) як орієнтира для узгодження властивостей черепашнику та штукатурної суміші, видається виправданим.

Адгезія бездобавкового складу до поверхні черепашнику становить 0,25 МПа; введення адгезійної добавки Ceresit CC 81 у кількості 3 % підвищує її в 1,3 раза, а 10 % — у 2 рази [19].

Вибір поліпропіленової фібри для другого дослідного плану базувався на результатах попереднього порівняльного випробування базальтової та поліпропіленової фібри (табл. 2). Позначення в таблиці: Rвиг сух – міцність при вигіні у сухому стані, Rст сух – міцність при стиску у сухому стані, Rст вол – міцність при стиску у водонасиченому стані, Ів – індекс водостійкості.

Таблиця 2. Порівняння властивостей складів з різними видами фібри

Вид фібри	Rвиг сух, МПа	Rст сух, МПа	Rст вол, МПа	Ів
Базальтова	2,81-2,84	3,84–4,25	3,20–3,70	2,95
Поліпропіленова	2,99-3,06	4,16–4,80	3,52–3,68	2,92
Відсутня	2,29-2,61	2,88–3,52	2,48–3,04	2,38

Джерело: розроблено авторами.

Обидва види фібри підвищують міцність у сухому та водонасиченому станах у 1,35…1,50 раза та знижують вологісні деформації (з 0,7 % для бездобавочного складу до 0,4…0,5 %). Враховуючи приблизно однаковий ефект та меншу вартість поліпропіленової фібри, обрано саме цей вид.

Другий етап: вплив модифікаторів

На другому етапі як основу використовувався визначений базовий склад ГЦЗ в'яжучого без вапна (що виключено за результатами аналізу першого етапу — вапно знижує водостійкість у ранньому віці та нівелює дію пуцоланової добавки). Досліджувався вплив двох хімічних добавок і фібри. В експерименті за трифакторним планом B_3 варіювалися дозування пластифікатора (фактор X1), гідрофобізатора (X2) та кількість фібри (X3), нормалізовані до $x_i \le |1|$). Рівні варіювання факторів наведено в табл. 3.

Досліджувалися міцність при стиску (Rст) та при вигині (Rвиг) у трьох станах матеріалу: сухому (сух), рівноважному (рів) та водонасиченому (вол). В ході планованого експерименту виготовлені та випробувані зразки, за результатами випробувань побудовано математичні моделі у вигляді поліномів другого ступеня з урахуванням взаємодії факторів. Розглянуті однофакторні залежності властивостей при фіксованих значеннях інших факторів у зонах максимуму та мінімуму цільової функції.

Таблиця 3 – Фактори та рівні їх варіювання у другому етапі експерименту

Номер фактора - i	Фактори	$x_i = -1$	$x_i = 0$	$x_i = +1$
1	Пластифікатор (% від маси в'яжучого)	0	0,3	0,6
2	Гідрофобізатор (% від маси в'яжучого)	0	0,5	1,0
3	Поліпропіленова фібра (г/л суміші)	0	0,5	1,0

Джерело: розроблено авторами.

Міцність при стиску. На рис. 4 наведено однофакторні залежності міцності при стиску (Rст) у трьох станах зволоження (а — сухий, б — рівноважний, в — водонасичений).

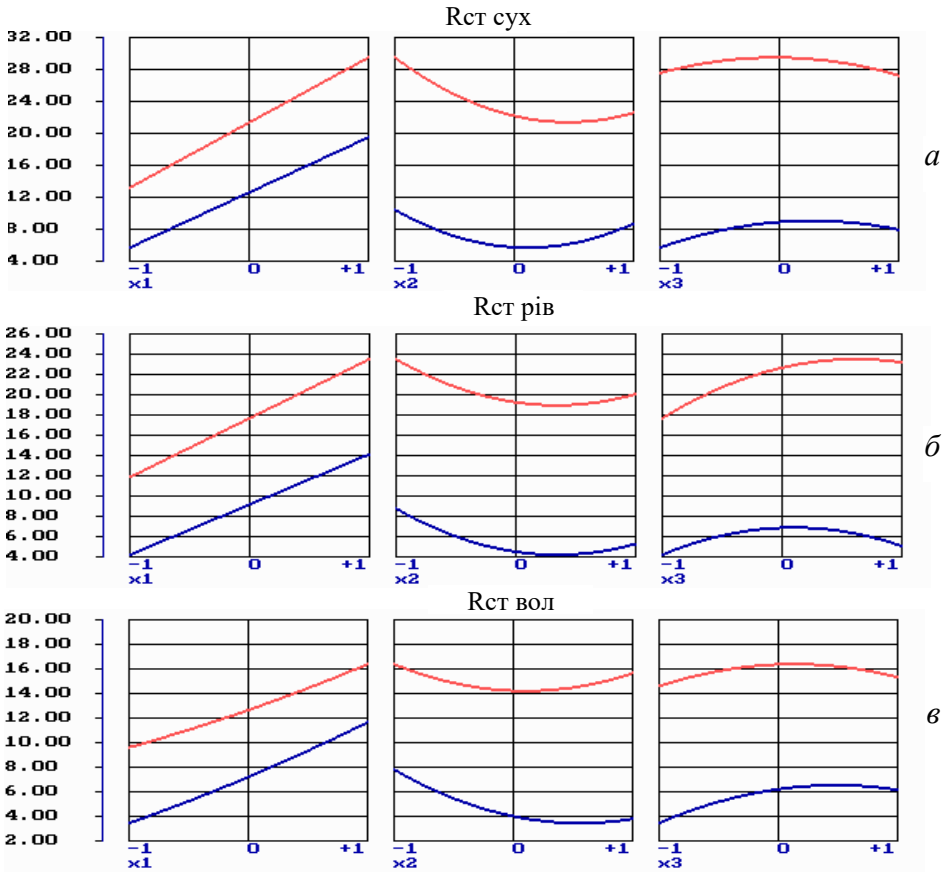


Рис. 4. Індивідуальний вплив факторів на міцність при стиску (зліва направо фактори – X1, X2, X3)

Джерело: розроблено авторами.

Червоні криві відповідають зонам максимуму міцності, сині — зонам мінімуму. Оскільки на даному етапі нашим завданням є підвищення всіх цільових властивостей, розглядатимемо вплив факторів саме у зоні максимуму.

Аналіз цих залежностей дозволяє зробити такі висновки.

Вплив пластифікатора (X1). У всіх трьох станах зволоження пластифікатор є домінуючим чинником зростання міцності: у сухому стані міцність при стиску зростає від ~12–16 МПа при X1 = –1 до ~25–28 МПа при X1 = +1; у рівноважному – від ~14 до ~25 МПа; у водонасиченому — від ~9 до ~17 МПа. Характер залежності близький до лінійного, без виражених ефектів насичення, що свідчить про можливість подальшого підвищення дозування пластифікатора. Зростання міцності пояснюється зниженням водотвердого відношення та покращенням структури твердіючого каменю за рахунок пластифікуючої дії добавки.

Вплив гідрофобізатора (X2). Поведінка гідрофобізатора є неоднозначною залежно від ступеня зволоження. В зоні максимуму міцності (при оптимальному вмісті пластифікатора) зростання X2 від –1 до +1 призводить до зниження міцності від ~25 до ~9–10 МПа у сухому стані та від ~20 до ~5 МПа у рівноважному стані. У водонасиченому стані зниження міцності від гідрофобізатора в зоні максимуму є менш вираженим. Така поведінка свідчить про те, що гідрофобізатор, зменшуючи водопоглинання матеріалу, опосередковано підтримує міцність у вологому стані, однак за рахунок порушення структури гідратних новоутворень знижує міцність у сухому стані при малому вмісті пластифікатора.

Вплив фібри (X3). Поліпропіленова фібра виявляє помітний позитивний вплив на міцність при стиску переважно у водонасиченому стані: в зоні максимуму міцність зростає від ~12 до ~18–19 МПа при X3 від –1 до +1. У сухому та рівноважному станах ефект фібри на міцність при стиску є меншим, але загалом позитивним. Армуюча дія поліпропіленових волокон сприяє стримуванню розкриття мікротріщин при навантаженні насиченого водою матеріалу.

Міцність при вигині. Однофакторні залежності міцності при вигині (рис. 5) демонструють загалом подібні тенденції, але з рядом характерних особливостей.

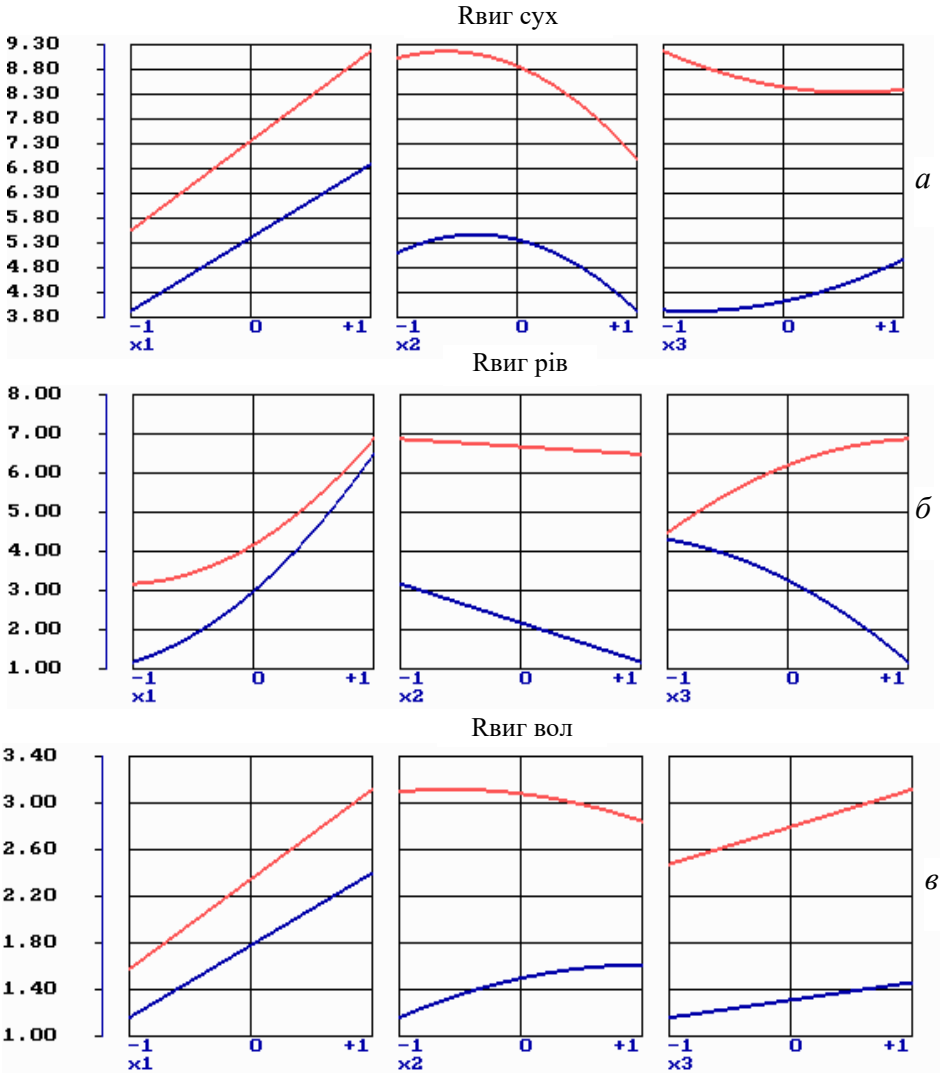


Рис. 5. Індивідуальний вплив факторів на міцність при вигині (зліва направо фактори – X1, X2, X3)

Джерело: розроблено авторами.

У сухому стані (а) міцність при вигині зростає зі збільшенням X1, проте залежність від X2 має виражений куполоподібний характер з максимумом при X2 ≈ 0 у зоні максимуму міцності. Це свідчить про оптимальне дозування гідрофобізатора близько середнього рівня варіювання. При цьому фібра (X3) дає позитивний лінійний ефект – від ~5 до ~8,5–9 МПа.

У рівноважному стані (б) вплив пластифікатора на міцність при вигині є лінійним і монотонним (від ~3 до ~7 МПа). Гідрофобізатор знижує міцність у зоні максимуму. Фібра дає виражений позитивний вплив — від ~4 до ~6,5 МПа в зоні максимуму.

У водонасиченому стані (в) характер залежностей суттєво змінюється. Пластифікатор залишається провідним позитивним чинником, проте ефект гідрофобізатора стає помірно позитивним в зоні максимуму, що принципово відрізняється від поведінки у сухому та рівноважному станах. Це підтверджує гіпотезу про те, що гідрофобізатор, обмежуючи капілярне всмоктування, зберігає міцність матеріалу при зволоженні. Вплив фібри залишається позитивним та зростає відносно попередніх станів.

Висновки. У роботі вперше наведено результати дослідження модифікованої штукатурної суміші на основі зологіпсоцементного в'яжучого для ремонтно- реставраційних робіт на фасадах будівель з вапняку-черепашника.

За результатами трифакторного планованого експерименту встановлено математичні моделі залежності міцності модернізованої штукатурної суміші при стиску та вигині від вмісту пластифікатора, гідрофобізатора та поліпропіленової фібри у трьох станах зволоження. Аналіз однофакторних залежностей показав, що вплив добавок є суттєво неоднозначним при різних ступенях зволоження матеріалу, що є важливим для проектування складу під конкретні умови експлуатації.

Пластифікатор є домінуючим позитивним фактором для міцності при стиску та вигині в усіх трьох станах зволоження; його дозування доцільно тримати на максимальному рівні. Гідрофобізуюча добавка знижує міцність у сухому стані, однак сприяє збереженню міцності у водонасиченому стані, що потребує диференційованого підходу до його дозування; припускаючи, що штукатурну систему буде захищено від зволоження водостійким покриттям (фарбою), доцільно вводити гідрофобізатор у мінімальної кількості. Поліпропіленова фібра переважно позитивно впливає на міцність, особливо в умовах зволоження.

Намічено подальші етапи вдосконалення штукатурного складу: введення мікрокремнезему – для посилення пуцоланової активності та метилцелюлози – для підвищення водоутримуючої здатності, з наступним частковим заміщенням в'яжучого відходами різання черепашнику – для узгодження властивостей та здешевлення матеріалу.

Список використаних джерел

1. Камінь черепашник, властивості і особливості матеріалу. (б. р.). https://pp-budpostach.com.ua/a227390-kamin-cherepashnik-vlastivosti.html.

2. Новский, А. В., Новский, В. А., & Тугаенко, Ю. Ф. (2014). *Известняк-ракушечник. Исследование и использование в качестве основания фундаментов*. Одесса: Астропринт.

3. Обвал 4-поверхівки в Одесі: чому це відбувається і на що чекати людям. (2020). *ТСН*. https://tsn.ua/ukrayina/obval-4-poverhivki-v-odesi-vzhe-p-yatiy-za-4-misyaci-chomu-ce-vidbuvayetsya-i-na-scho-chekati-lyudyam-1563342.html.

4. Kersh, V., Levytskyi, D., & Tykhoniuk, S. (2023). Repair mixture for limestone-shell buildings. In *Proceedings of the V International scientific and technical conference "Actual problems of energy saving and ecology"* (pp. 76–78). Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture.

5. Исторический центр Одессы включен в список всемирного наследия ЮНЕСКО. (б. р.). https://newssky.com.ua/ru/istoricheskij-czentr-odessy-vklyuchyon-v-spisok-vsemirnogo-naslediya-yunesko/.

6. Tombulca, C., Çavuş, M., et al. (2023). Production of environmentally-friendly, high-strength repair mortar for the restoration of historical buildings. *Cement Wapno Beton*, 28(3).

7. ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016. (2016). *Настанова щодо виконання ремонтно-реставраційних робіт на пам'ятках архітектури та містобудування*. Київ: Мінрегіон України.

8. Caparol. (б. р.). *Histolith® Trass-Kalkputz. Гідравлічна вапняна штукатурка*. https://www.caparol.ua/caparol_pim_import/caparol_ua/products/ti/291670/TI_Histolith_Trass-Kalkputz_UA_NEW_UA.pdf.

9. Дворкін, Л. Й., Дворкін, О. Л. (2011). *Будівельне матеріалознавство* : підручник. НУВГП.

10. ДСТУ Б В.2.7-82:2010. (2010). *Матеріали будівельні. В'яжучі гіпсові. Технічні умови*. Київ: Мінрегіонбуд України.

11. Кондращенко, О. В. (2005). *Гіпсові будівельні матеріали підвищеної міцності і водостійкості* (Автореферат дисертації доктора технічних наук, УкрДАЗТ, Харків).

12. Єфіменко, А. С. (2021). *Підвищення водостійкості гіпсових матеріалів поліфракційними мінеральними добавками* (Дисертація кандидата технічних наук, УкрДУЗТ, Харків).

13. Новосад, П. В., Саницький, М. А., & Позняк, О. Р. (2018). Підвищення водостійкості гіпсових в'яжучих. *Вісник НУ «Львівська політехніка». Серія: Теорія і практика будівництва*, 888, 111–116.

14. Montgomery, D. C. (2019). *Design and Analysis of Experiments*, 10th Ed. Wiley.

15. Керш, В. Я., Фощ, А. В., & Колесніков, А. В. (2017). Описание водостойкости гипсосодержащих композиций с помощью комбинированного критерия. *Збірник наукових праць УДУЗТ*, 68, 133–139.

16. ДСТУ EN ISO 12572:202X. (202X). *Гігротермічні характеристики будівельних матеріалів та виробів. Визначення властивостей пропускання водяної пари. Чашковий метод*. ДП «УкрНДНЦ».

17. Керш, В. Я., & Тихонюк, С. А. (2024). Паропроникність як критерій вибору штукатурної суміші для стін із вапняку-черепашника. *Науково-технічний збірник «Просторовий розвиток»*, 326–337.

18. ДСТУ 9191:2022. (2023). *Теплоізоляція будівель. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель*. ДП «УкрНДНЦ».

19. Kersh, V., Levytskyi, D., Tihoniuk, S., & Foshch, A. (2024). Adhesive ability of gypsum-containing plaster compositions. *Сучасне будівництво та архітектура*, 9, 55–61.

References

1. *Kamin cherepashnyk, vlastyvosti i osoblyvosti materialu [Shell rock stone, properties and features of the material]*. https://pp-budpostach.com.ua/a227390-kamin-cherepashnik-vlastivosti.html.

2. Novskyi, A.V., Novskyi, V.A., & Tuhaenko, Yu.F. (2014). *Yzvestniak-rakushechnyk. Yssledovanye y yspolzovanye v kachestve osnovanyia fundamentov [Shell limestone. Research and use as a base for foundations]*. Astroprynt.

3. *Obval 4-poverkhivky v Odesi [Collapse of a 4-storey building in Odesa]*. https://tsn.ua/ukrayina/obval-4-poverhivki-v-odesi-vzhe-p-yatiy-za-4-misyaci-chomu-ce-vid-buvayetsya-i-na-scho-chekati-lyudyam-1563342.html.

4. Kersh, V., Levytskyi, D., & Tykhoniuk, S. (2023). Repair mixture for limestone-shell buildings. *Zbirnyk tez V Mizhn. nauk.-tekhn. konf. "Aktualni problemy enerhoresursozberezhennia ta ekolohii"* ODABA.

5. *Ystorycheskyi tsentr Odessy vkliuchen v spysok vsemyrnoho nasledyia YuNESKO [The historical center of Odessa is included in the UNESCO World Heritage List]*. https://newssky.com.ua/ru/istoricheskij-czentr-odessy-vklyuchyon-v-spisok-vsemirnogo-naslediya-yunesko/

6. Tombulca, C., Çavuş, M. et al. (2023). Production of environmentally-friendly, high-strength repair mortar for the restoration of historical buildings. *Cement Wapno Beton., 28*(3).

7. DSTU-N B V.3.2-4:2016 Nastanova shchodo vykonannia remontno-restavratsiinykh robit na pam`iatkakh arkhitektury ta mistobuduvannia [Guidelines for the execution of repair and restoration works on architectural and urban planning monuments]. (2016).

8. Histolith® Trass-Kalkputz. Hidravlichna vapniana shtukaturka. https://www.caparol.ua/caparol_pim_import/caparol_ua/products/ti/291670/TI_Histolith_Trass-Kalkputz_UA_NEW_UA.pdf.

9. Dvorkin, L. Y., & Dvorkin, O. L. (2011). *Budivelne materialoznavstvo [Construction materials science]*. NUVHP.

10. DSTU B V.2.7-82:2010. Materialy budivelni. Viazhuchi hipsovi. Tekhnichni umovy [Building materials. Gypsum binders. Technical specifications]. (2010).

11. Kondrashchenko, O. V. (2005). *Hipsovi budivelni materialy pidvyshchenoi mitsnosti i vodostiikosti [Gypsum building materials of increased strength and water resistance]* [UkrDAZT].

12. Yefimenko, A. S. (2021). *Pidvyshchennia vodostiikosti hipsovykh materialiv polifraktsiinymy mineralnymy dobavkamy [Increasing the water resistance of gypsum materials with polyfractional mineral additives]* [UkrDUZT].

13. Novosad, P. V., Sanytskyi, M. A., & Pozniak, O. R. (2018). Pidvyshchennia vodostiikosti hipsovykh viazhuchykh [Improving the water resistance of gypsum binders]. *Visnyk NU «Lvivska politekhnika». Seriia: Teoriia i praktyka budivnytstva – Journal of Lviv Polytechnic National University. Series: Theory and Practice of Construction*, (888), 111–116.

14. Montgomery, D. C. (2019). *Design and Analysis of Experiments*, 10th Ed. Wiley.

15. Kersh, V. Ia., Foshch, A. V., & Kolesnikov, A. V. (2017). Opysanye vodostoikosty hypsosoderzhashchykh kompozytsyi s pomoshchiu kombynyrovannoho kryteriia [A description of the water resistance of gypsum-based compositions using a combined criterion]. *Zbirnyk nauk. prats UDUZT. Kharkiv: UDUZT - Collection of Academic Papers of the Ukrainian State University of Railway Transport, 68*, 133–139.

16. DSTU EN ISO 12572:202X. Hihrotermichni kharakterystyky budivelnykh materialiv ta vyrobiv. Vyznachennia vlastyvostei propuskannia vodianoi pary. Chashkovyi metod. DP «UkrNDNTs», 202Kh.

17. Kersh, V. Ia., Tykhoniuk, S. A. (2024). Paropronyknist yak kryterii vyboru shtukaturnoi sumishi dlia stin iz vapniaku-cherepashnyka [Vapor permeability as a criterion for choosing a stucco mixture for walls made of limestone-shell rock]. *Nauk.-tekhn. zbirnyk «Prostorovyi rozvytok» – Scientific and technical collection "Spatial development"* (pp. 326-337).

18. DSTU 9191:2022. *Teploizoliatsiia budivel. Metody vyboru teploizoliatsiinoho materialu dlia uteplennia budivel [Thermal insulation of buildings. Methods for selecting thermal insulation materials for building insulation].* (2023). DP «UkrNDNTs».

19. Kersh V., Levytskyi D., Tihoniuk S., & Foshch A. (2024). Adhesive ability of gypsum-containing plaster compositions. *Suchasne budivnytstvo ta arkhitektura. Nauk.-tekhn. zbirnyk. Odesa Modern construction and architecture – Modern construction and architecture,* 9, 55–61.

Дата першого надходження статті до видання: 02.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.03.2026

UDC 691.55:699.88

Volodymyr Kersh[1], Volodymyr Batsuev[2], Tetiana Lyashenko[3], Mykola Khlytsov[4]

[1]PhD in Technical Sciences, professor of the Department of Urban Construction and Economy,
Odessa State Academy of Construction and Architecture (Odesa, Ukraine)
E-mail: kersh@odaba.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-8737-0933. **ResearcherID:** LGZ-1769-2024

[2]PhD student of the Department of Urban Construction and Economy,
Odessa State Academy of Construction and Architecture (Odesa, Ukraine)
E-mail: 924v.batsuiev@odaba.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/:0009-0007-7276-2185. **ResearcherID:** PVE-4973-2026

[3]Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Processes and Apparatus in Building Materials Technology
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture (Odessa, Ukraine)
E-mail: lyashenko@odaba.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-6232-4866. **ResearcherID:** PVE-2402-2026

[4]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Processes and Apparatus in Building Materials Technology
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture (Odessa, Ukraine)
E-mail: khlytsov@odaba.edu.ua. **ResearcherID:** PVE-2229-2026

GYPSUM-CEMENT-ASH COMPOSITIONS FOR THE RESTORATION OF FACADES ON HISTORIC BUILDINGS

The historical architectural landscape of Southern Ukraine, particularly in the city of Odesa, is primarily defined by the use of local natural limestone, commonly known as shell limestone. The recent inclusion of Odesa's historical center into the UNESCO World Heritage List has significantly elevated the technical requirements and responsibility for the restoration and conservation of these structures. A critical challenge in maintaining these buildings is the degradation of the shell rock's structural integrity due to moisture-related strength loss. Standard repair practices often involve the application of conventional cement-sand mortars, which frequently lead to the accelerated deterioration of the original masonry. This failure is caused by physical incompatibility—specifically, the lower vapor permeability and higher stiffness of cement-based plasters, which obstruct the natural moisture exchange of the limestone walls.

This study presents a comprehensive investigation of gypsum-cement-ash (GCA) compositions specifically engineered for the renovation of shell limestone facades. GCA systems are considered highly promising due to their rapid hardening, low thermal conductivity, and cost-effectiveness compared to imported alternatives. The research followed a three-stage strategy: establishing a base binder composition, enhancing the mixture with chemical modifiers, and further improvement with mineral additives. The established base composition consists of 50% gypsum, 30% cement, and 20% fly ash. To ensure vapor permeability compatibility, GCA mixtures were developed that demonstrate values of 0.08–0.09 mg/(m·h·Pa), which aligns closely with the 0.07 mg/(m·h·Pa) measured in aged historical shell rock samples.

The experimental phase utilized a three-factor Box design to evaluate the impact of a plasticizer (0–0.6%), a hydrophobizer (0–1.0% by mass), and polypropylene fiber (0–1.0 g/l) on the material's strength. Testing was conducted in three moisture states: dry, equilibrium, and water-saturated. Results indicate that the plasticizer is the dominant factor for strength development across all moisture conditions. Polypropylene fibers were found to increase strength by 1.35–1.50 times while significantly reducing moisture-induced deformations from 0.7% to 0.4–0.5%. The hydrophobizing agent showed a dual effect: while it preserved strength during saturation by limiting capillary suction, it tended to decrease compressive strength in dry conditions when used at high dosages without sufficient plasticization. The study concludes with a mathematical model that allows for the adjustment of modifier dosages depending on specific operational environments.

Keywords: *shell limestone; gypsum-cement-ash mixture; experiment design; water resistance; compressive strength; vapor permeability; adhesion; moisture deformation.*

Fig.: 5. Table: 3. References: 19.

Керш В. Я., Бацуєв В. В., Ляшенко Т. В., Хлицов М. В. Гіпсоцементно-зольні композиції для відновлення фасадів історичних будівель. *Технічні науки та технології*, 2026. № 2(44). С. 525-535. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-525-535.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-536-551
УДК 332.3:332.12

Галина Богданівна Нестеренко
кандидат економічних наук, доцент кафедри земельного кадастру
Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Ґжицького (Дубляни, Україна)
E-mail: galianesterenko@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-4411-1242. **ResearcherID:** PJB-2205-2026

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА НАПРЯМИ УДОСКОНАЛЕННЯ ІНВЕНТАРИЗАЦІЇ ЗЕМЕЛЬ КОМУНАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ: МІЖНАРОДНИЙ ДОСВІД

У статті досліджено сучасні тенденції та напрями удосконалення інвентаризації земель комунальної власності в Україні з урахуванням міжнародного досвіду. Визначено ключові проблеми реалізації інвентаризації у Львові: відсутність актуальної кадастрової інформації, самовільне зайняття земель, їх нецільове використання, затримки у фінансуванні та бюрократичні перепони. Запропоновано шляхи модернізації процесу через впровадження геоінформаційних систем, створення відкритих цифрових кадастрових баз, інтеграцію екологічного моніторингу та розроблення фінансових механізмів підтримки. Проаналізовано міжнародні практики (Польща, Чехія, Німеччина, програми ЄС), які підтверджують ефективність цифровізації кадастрових систем, відкритості даних та багатоканального фінансування.

Запропоновано алгоритм удосконалення інвентаризації, матрицю ризиків та аналітичні приклади, що підтверджують економічні втрати громади. Наукова новизна полягає у концепції інтеграції екологічного моніторингу у кадастрові системи та моделі багатоканального фінансування. Практичне значення — можливість використання рекомендацій органами місцевого самоврядування для підвищення прозорості та інвестиційної привабливості територій.

Ключові слова: *інвентаризація земель; комунальна власність; кадастр; GIS; екологічний моніторинг; цифровізація; міжнародний досвід.*

Табл.: 1. Бібл.: 32.

Актуальність теми дослідження. Інвентаризація земель комунальної власності є ключовим інструментом управління територіальними ресурсами міських громад. Вона забезпечує достовірність кадастрової інформації, формує основу для прозорого землекористування та сприяє фінансовій стабільності місцевих бюджетів. Актуальність дослідження визначається низкою чинників:

- стрімкий ріст урбанізації та розвиток міської інфраструктури спонукають до точного обліку земельних ділянок, їхнього правового статусу та цільового використання;
- фінансова стійкість міських громад значною мірою залежить від надходжень земельного податку та орендної плати, що можливе лише за умови повної та актуальної інвентаризації земель;
- запобігання самовільному зайняттю та нецільовому використанню земель є важливим завданням для захисту прав громади та забезпечення законності у сфері землекористування.

Додатковим чинником є виклики воєнного стану та економічної нестабільності**,** які посилюють потребу у прозорому та ефективному управлінні земельними ресурсами. У цих умовах інвентаризація стає не лише технічною процедурою, а й стратегічним інструментом розвитку міста, залучення інвестицій та забезпечення добробуту громади.

Міжнародний досвід показує, що сучасні тенденції у сфері інвентаризації земель спрямовані на цифровізацію кадастрових систем, інтеграцію геоінформаційних технологій та екологічного моніторингу, а також на використання багатоканальних фінансових механізмів. Адаптація цих практик до українських реалій, зокрема на прикладі Львова, дозволить створити сучасну модель управління земельними ресурсами, яка відповідатиме потребам громади та сприятиме сталому розвитку міста.

Постановка проблеми. Інвентаризація земель комунальної власності у містах України, зокрема у Львові, реалізується неповно та фрагментарно, що створює низку системних проблем:

- **відсутність повної та актуальної кадастрової інформації** призводить до того, що земельні ділянки залишаються поза офіційним обліком. Це унеможливлює їх легальне використання як об’єктів цивільних прав та створює ризики незаконного відчуження;

© Г. Б. Нестеренко, 2026

- самовільне зайняття земельних ділянок комунальної власності та їх використання без належних правових підстав завдає значних збитків територіальній громаді. Виявлені випадки розорювання земель під посіви або захоплення ділянок під інфраструктурні об'єкти свідчать про слабкий контроль та відсутність ефективних механізмів запобігання порушенням;
- нецільове використання земель стає підставою для судових спорів та дострокового розірвання договорів. Задокументовані випадки використання ділянок, наданих під житлову забудову, для комерційних павільйонів демонструють низький рівень дотримання умов землекористування;
- затримки у фінансуванні та адміністративні перепони значно ускладнюють процес інвентаризації. Недостатнє фінансування заходів із землеустрою, бюрократизовані процедури погодження проєктів та конфлікти між органами влади створюють корупційні ризики та затягують оформлення земель на роки.

Таким чином, проблема полягає в тому, що інвентаризація земель комунальної власності у Львові здійснюється несистемно, з численними правовими, організаційними та фінансовими бар'єрами. Це призводить до застарілих кадастрових даних, зниження інвестиційної привабливості міста, обмеженої прозорості у сфері управління земельними ресурсами та значних економічних втрат для громади.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика інвентаризації земель комунальної власності та територіальних громад є предметом активних досліджень українських і зарубіжних науковців.

Кондратенко Д. (2019) розглядає інвентаризацію земель як правову форму їх обліку, підкреслюючи її значення для забезпечення законності функціонування ринку землі та прозорості земельних відносин. Автор наголошує, що інвентаризація виступає інструментом державного управління, який забезпечує контроль за правовим режимом земельних ділянок та їх цільовим використанням [1].

Нестеренко Г., Бідун І. (2013) визначають інвентаризацію як ключовий компонент у системі управління земельними ресурсами, що створює основу для ведення державного земельного кадастру та забезпечує інформаційну базу для прийняття управлінських рішень [2].

Брехлійчук В., Лахоцька Е. (2023) акцентують увагу на актуальності інвентаризації земель об'єднаних територіальних громад, підкреслюючи її роль у формуванні інвестиційної привабливості та забезпеченні ефективного контролю за землекористуванням [3].

Butenko, E., Prykhodko, M. (2024) пропонують удосконалення інвентаризації шляхом створення електронних ресурсів для публікації результатів землевпорядних робіт, що підвищує прозорість та інвестиційну привабливість громад [4].

Koshkalda, I., Anopriienko, T., Pilicheva, M., Maslii, L. (2021) розробили методику застосування сучасних технологій у процесі інвентаризації, включаючи використання аерофотознімання, GIS та дистанційного зондування, що дозволяє оптимізувати тривалість робіт і підвищити точність даних [5].

Церклевич А., Білявський М., Миронець О., Гудз В., Щур Б. (2024) досліджують організаційні та технічні виклики інвентаризації земель, акцентуючи на використанні електронних тахеометрів, ГНСС-приймачів та БПЛА для створення ортофотопланів. Автори пропонують удосконалення нормативної бази щодо точності визначення меж і площ земельних ділянок та інтеграцію фотограмметричних методів у стандарти інвентаризації [6].

Udovenko I., Kyselov I., Shemyakin M., Domashenko H., Kononenko S. (2017) розробили методику інвентаризації сільськогосподарських земель на основі GIS-технологій, що дозволяє створювати єдину геоінформаційну базу з інтеграцією даних про ґрунти, екологічний стан та кадастрову інформацію [7].

У зарубіжних дослідженнях підкреслюється роль GIS у модернізації кадастрових систем. Aleuov, A. S., Jaksibaev, R. N., Nurnazarov, S. J. (2025) показують, що інтеграція GIS у земельний кадастр забезпечує точність, прозорість та доступність даних, а також сприяє сталому управлінню територіями [8].

Огляд літератури свідчить, що інвентаризація земель розглядається як багатофункціональний процес:

- правовий інструмент забезпечення законності та прозорості;
- організаційний механізм управління земельними ресурсами;
- технічна процедура з використанням сучасних геодезичних та GIS-технологій;
- стратегічний інструмент розвитку громад та підвищення їх інвестиційної привабливості.

Водночас дослідники наголошують на необхідності вдосконалення нормативної бази, стандартизації процедур, інтеграції екологічного моніторингу та цифровізації кадастрових систем.

Виділення недосліджених частин проблеми. Попри наявність законодавчої бази та окремих практичних кроків щодо інвентаризації земель комунальної власності [9], низка аспектів залишається недостатньо дослідженою та невирішеною.

- стандартизація процедур інвентаризації: в Україні відсутня єдина методологія проведення інвентаризації земель, що призводить до розбіжностей у підходах різних територіальних громад. Недостатньо досліджено питання розроблення уніфікованих алгоритмів та нормативів точності, які б відповідали міжнародним стандартам;
- цифровізація кадастрових систем: хоча GIS-технології активно впроваджуються у країнах ЄС, в Україні їх застосування залишається обмеженим. Недослідженим є питання інтеграції цифрових картографічних технологій із правовими та фінансовими даними, а також створення відкритих електронних кадастрових баз для громадян та інвесторів;
- інтеграція екологічного моніторингу. Кадастрові системи здебільшого зосереджені на правовій та фінансовій інформації, тоді як екологічні фактори (стан ґрунтів, рівень забруднення, охоронні зони) залишаються поза увагою. Недостатньо досліджено можливості поєднання кадастрових даних із системами екологічного моніторингу для забезпечення сталого розвитку територій;
- фінансові механізми підтримки: інвентаризація земель здебільшого фінансується з місцевих бюджетів, які часто мають обмежені ресурси. Недослідженим залишається питання залучення альтернативних джерел фінансування – грантів міжнародних організацій, інвестиційних програм, державно-приватного партнерства;
- адміністративні та бюрократичні перепони: процедури погодження проєктів землеустрою з різними органами влади є надмірно складними та тривалими. Недостатньо вивчено шляхи оптимізації цих процесів, зменшення корупційних ризиків та прискорення прийняття рішень.

Таким чином, недослідженими залишаються питання стандартизації процедур, цифровізації кадастрових систем, інтеграції екологічних даних та розроблення фінансових механізмів підтримки. Їх вирішення є необхідною умовою для модернізації інвентаризації земель комунальної власності та адаптації міжнародного досвіду до українських реалій.

Мета дослідження. Метою статті є визначення сучасних тенденцій та напрямів удосконалення інвентаризації земель комунальної власності в Україні з урахуванням міжнародного досвіду та практик, які можуть бути адаптовані до національних умов.

Для досягнення цієї мети передбачено вирішення таких завдань:

- проаналізувати сучасний стан інвентаризації земель комунальної власності в Україні та виявити ключові проблеми її реалізації на прикладі Львова;

- узагальнити результати наукових досліджень українських і зарубіжних авторів щодо правових, організаційних та технічних аспектів інвентаризації земель;
- визначити недосліджені та проблемні частини процесу інвентаризації, які потребують подальшого вдосконалення;
- окреслити напрями модернізації інвентаризації земель комунальної власності через цифровізацію кадастрових систем, впровадження геоінформаційних технологій, інтеграцію екологічного моніторингу та розроблення фінансових механізмів підтримки;
- проаналізувати міжнародний досвід (ЄС, Польща, Чехія, Німеччина) та визначити можливості його адаптації до українських реалій.

Досягнення поставленої мети дозволить сформувати науково обґрунтовані рекомендації щодо створення сучасної моделі управління земельними ресурсами міських громад, яка забезпечить прозорість, фінансову стабільність та інвестиційну привабливість територій.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження використано комплекс правових, організаційних та технічних матеріалів, що дозволяють оцінити сучасний стан інвентаризації земель комунальної власності та визначити напрями її удосконалення.

Основою дослідження є положення Земельного кодексу України, Закону України «Про землеустрій» [10], Закону України «Про Державний земельний кадастр» [11], а також Постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку проведення інвентаризації земель» [12]. Ці документи визначають правові засади інвентаризації, порядок її проведення та вимоги до точності кадастрових даних.

Методи дослідження:

- *правовий аналіз* – для оцінки чинної нормативної бази та виявлення прогалин у регулюванні;
- *організаційна оцінка* – для аналізу практики інвентаризації земель у Львові та визначення адміністративних бар'єрів;
- *технологічна експертиза* – для дослідження можливостей застосування сучасних геодезичних та GIS-технологій;
- *порівняльний аналіз* – для зіставлення українських практик із міжнародним досвідом (Польща, Чехія, Німеччина, програми ЄС);
- *системний підхід* – для інтеграції правових, організаційних, технічних та екологічних аспектів у єдину модель удосконалення інвентаризації земель.

Таким чином, дослідження ґрунтується на поєднанні нормативно-правових положень, сучасних технічних засобів та методів аналізу, що дозволяє комплексно оцінити стан інвентаризації земель комунальної власності та визначити напрями її модернізації з урахуванням міжнародного досвіду.

Алгоритм удосконалення інвентаризації:

- збір та актуалізація даних Державного земельного кадастру;
- впровадження GIS-технологій;
- інтеграція екологічного моніторингу;
- розроблення багатоканальних фінансових механізмів;
- удосконалення адміністративних процедур.

Матриця ризиків проведення інвентаризації у таблиці 1 узагальнює типи ризиків, наводить їх приклади, вказує наслідки та шляхи їх мінімізації.

Таблиця 1 – Матриця ризиків проведення інвентаризації

Тип ризику	Приклад	Наслідки	Шляхи мінімізації
Правовий	Самовільне зайняття земель	Судові спори, втрати бюджету	Посилення контролю, штрафи
Фінансовий	Недостатнє фінансування	Затримки у проведенні робіт	Гранти, державно-приватне партнерство
Організаційний	Бюрократичні перепони	Затягування процесів	Спрощення процедур, цифровізація
Технічний	Відсутність сучасних технологій	Низька точність даних	Впровадження GIS, БПЛА
Екологічний	Ігнорування стану навколишнього природного середовища	Погіршення екології	Інтеграція моніторингу в кадастр

Джерело: розроблено автором.

Дослідження сучасного стану інвентаризації земель комунальної власності у Львові показало наявність низки системних проблем, що знижують ефективність управління територіальними ресурсами.

Проблеми з якими стикається проведення інвентаризації земель на прикладі Львівської міської ради:

1. Відсутність повної та актуальної кадастрової інформації: земельна ділянка може бути об'єктом цивільних прав лише після присвоєння їй кадастрового номера та внесення даних до Державного земельного кадастру. Фахівці Держаудитслужби встановили, що у 2022 році ЛКП «Зелений Львів» отримало дозвіл лише на виготовлення технічної документації для площі у 37,2625 га геологічної пам'ятки природи місцевого значення – парку «Кортумова гора». Водночас ще у 2014 році Львівська міська рада погодила межі цього парку з орієнтовною площею 62,0707 га [13, 14, 15]. Попри ухвалене рішення, протягом десяти років технічна документація на ці землі так і не була виготовлена, що спричинило їх незаконне відчуження. Після затвердження технічної документації із землеустрою всі актуалізовані дані передаються до Державного земельного кадастру, де кожна земельна ділянка отримує унікальний кадастровий номер, що забезпечує її офіційний облік [16].

2. Самовільне зайняття земельних ділянок: виявлено факт розорювання земель сільськогосподарського призначення комунальної власності орієнтовною площею 27,7500 га під посів сої: на 75 земельних ділянках комунальної власності загальною орієнтовною площею 25,7800 га; на 19 земельних ділянках приватної форми власності загальною орієнтовною площею 1,9700 га [17]; самовільне захоплення землі на майже 50 га. Серед ділянок – земля під будівництво північної об'їзної дороги поблизу Дублян, ділянки під місцевий цвинтар та санітарно-охоронна зона скотомогильника, що працює. Орієнтовний розмір шкоди, заподіяної державі та територіальній громаді через такі дії, – щонайменше 1,7 млн грн [18].

3. Використання земель не за цільовим призначенням: нецільове використання землі може бути підставою для припинення в судовому порядку як права власності, так і користування нею. У Львові задокументовано випадки, коли земельні ділянки, надані під житлову забудову, використовувалися для комерційних павільйонів. Верховний Суд підтвердив, що таке використання є порушенням умов договору та підставою для його дострокового розірвання [19].

4. Затримки у фінансуванні та адміністративні перепони: на заходи із землеустрою у Львівській міській територіальній громаді на 2024 рік передбачено 3,0 млн грн, виконання склало 1,0 млн грн або 33,3 відсотка до уточненого плану на рік [20]; існуюча процедура погодження проектів землеустрою (зокрема з органами охорони навколишнього природного середовища та лісового господарства) є надмірно бюрократизованою,

що створює корупційні ризики та затягує процес оформлення земель на роки. Хоча назви конкретних лісів рідко вписують у тіло закону, у виступах профільних комітетів (зокрема Комітету з питань аграрної та земельної політики) під час обговорення цього закону Брюховицький ліс наводився як приклад «території з конфліктом меж», де інвентаризація неможлива через те, що Міндовкілля та лісгосп не можуть узгодити межі ПЗФ [21].

Для підвищення ефективності інвентаризації земель комунальної власності у Львові пропонуємо:

1. Впровадження геоінформаційних систем (GIS) сприятиме використанню сучасних цифрових картографічних технологій для інтеграції просторових даних із правовою інформацією. Їх реалізація покращить:

- точне відображенню меж земельних ділянок;
- можливості швидкого оновлення даних;
- інтеграцію з містобудівною документацією та планами зонування.

Впровадження геоінформаційних систем (GIS) дозволить зменшити кількість помилок у кадастрі, покращити оперативний контроль за використанням земель, та вдосконалити прозорість для громади.

2. Створення цифрових кадастрових баз, доступних для громадян та інвесторів сприятиме формуванню відкритих електронних реєстрів із даними про власність, користування та обмеження щодо земельних ділянок. Їх доступність та відкритість сприятиме:

- забезпеченню прозорості земельних відносин;
- зменшенню корупційних ризиків;
- полегшенню доступу інвесторів до інформації.

Створення відкритих цифрових кадастрових баз для громадян та інвесторів підвищення інвестиційної привабливості міста, зростання довіри громадян до управління земельними ресурсами.

3. Інтеграція екологічного моніторингу у кадастрові системи дозволить поєднати дані про землі з інформацією про стан довкілля (якість ґрунтів, рівень забруднення, охоронні зони). Інтеграція дасть розвиток:

- врахуванню екологічних факторів при плануванні забудови;
- захисту природоохоронних територій;
- можливістю прогнозування екологічних ризиків.

Впровадження екологічного моніторингу стимулюватиме збереження зелених зон, контроль за забудовою у чутливих екологічних районах, інтеграція екологічної політики у земельне управління.

4. Розроблення фінансових механізмів підтримки інвентаризації дасть поштовх пошуку альтернативних джерел фінансування, окрім міського бюджету. Можливі механізми наступні:

- залучення інвестиційних проєктів у сфері містобудування та екології;
- гранти міжнародних організацій (наприклад, ЄС, Світового банку);
- державно-приватне партнерство.

Для міської громади впровадження фінансових механізмів сприятиме: стабільному фінансуванню інвентаризаційних робіт, зменшенню залежності від бюджетних затримок, можливістю реалізації комплексних програм розвитку територій.

Таким чином, сучасні тенденції спрямовані на цифровізацію, відкритість та екологічну інтеграцію земельних процесів, а також на стійке фінансування через інвестиції та партнерства.

Проаналізуємо міжнародні практики, які можна адаптувати для удосконалення інвентаризації земель комунальної власності у Львові:

1. Впровадження геоінформаційних систем (GIS):

➢ Польща, LPIS (Land Parcel Identification System): використовується для точного кадастрового обліку: кожна ділянка має унікальний ідентифікатор, дані щорічно оновлюються за допомогою аерофотозйомки та супутникових знімків програми *Copernicus*. Система автоматично контролює дотримання екологічних вимог, наприклад, мінімальної частки екологічних угідь у сільському господарстві [22];

➢ Чехія: використовує інтегровані кадастрові системи з відкритим доступом до картографічних даних, що дозволяє громадянам і бізнесу перевіряти межі ділянок онлайн. Це зменшує кількість спорів і підвищує прозорість [23].

2. Створення цифрових кадастрових баз:

➢ Німеччина та Франція: кадастрові системи інтегровані з іншими державними реєстрами, що забезпечує інтероперабельність і доступність даних для громадян та інвесторів [24];

➢ ЄС загалом: використовуються земельно-кадастрові системи, які поєднують правову, картографічну та екологічну інформацію в єдиній базі, доступній онлайн [25].

3. Інтеграція екологічного моніторингу:

➢ Україна (пілотні проєкти): розробляється інтеграція державних кадастрів (земельного, водного, лісового) з екологічними базами даних, що дозволяє враховувати стан ґрунтів, водних ресурсів та лісів при плануванні використання територій [26];

➢ Європейський досвід: використання 3D-кадастрів для відображення результатів моніторингу довкілля (водні об'єкти, ліси, землі). Це дозволяє прогнозувати екологічні ризики та інтегрувати їх у містобудівні рішення [27].

4. Фінансові механізми підтримки:

➢ Ukraine Investment Framework (2024) передбачає залучення міжнародних фінансових організацій та іноземних урядів для фінансування інвестиційних проєктів, у тому числі у сфері земельного управління. Механізм знижує ризики для інвесторів і стимулює розвиток інфраструктури [28];

➢ Київська область (2017-2020): програма інвентаризації земель фінансувалася за рахунок обласного бюджету та субвенцій, що показує можливість комбінованого фінансування на місцевому рівні [26];

➢ ЄС: використовуються гранти та програми підтримки від Європейської комісії для цифровізації кадастрових систем і впровадження екологічних стандартів.

Таким чином, міжнародний досвід показує, що ефективна інвентаризація земель базується на цифровізації, відкритості даних, інтеграції екологічного моніторингу та багатоканальному фінансуванні.

Європейська комісія справді підтримує цифровізацію кадастрових систем та інтеграцію екологічних стандартів через низку грантових і програмних інструментів. Ось найважливіші з них:

➢ *INSPIRE Directive (Infrastructure for Spatial Information in Europe).* Європейська директива, яка зобов'язує країни-члени створювати сумісні геоінформаційні системи. Вона фінансує проєкти з цифровізації кадастрів, інтеграції картографічних та екологічних даних, забезпечуючи відкритий доступ для громадян та інвесторів [25];

➢ *Copernicus Programme.* Програма ЄС із супутникового моніторингу довкілля. Використовується для оновлення кадастрових даних, контролю за станом ґрунтів, водних ресурсів та зелених зон. Гранти надаються для інтеграції супутникових даних у місцеві кадастрові системи [29];

➢ *Horizon Europe*. Найбільша дослідницька та інноваційна програма ЄС (2021–2027). Має окремі напрями фінансування для цифровізації земельного управління, розвитку «розумних міст» та екологічного моніторингу. Львів може подавати заявки на гранти для створення сучасних кадастрових систем [30].

- *European Regional Development Fund (ERDF).* Фонд регіонального розвитку фінансує проєкти цифровізації кадастрових систем на місцевому рівні, включаючи створення відкритих баз даних та інтеграцію екологічних стандартів у земельне управління [31].
- *LIFE Programme*. Програма ЄС для фінансування екологічних проєктів. Часто використовується для інтеграції екологічного моніторингу у кадастрові системи, наприклад, для захисту природоохоронних територій чи контролю за забудовою [32].

Таким чином, любе місто може подавати заявки на гранти Horizon Europe чи LIFE для створення цифрового кадастру з екологічним моніторингом:

- INSPIRE та Copernicus дають можливість інтегрувати супутникові дані у місцеві кадастрові системи.
- ERDF може профінансувати регіональні проєкти цифровізації земельного управління.

Тобто, ЄС пропонує комплексну підтримку: від технологічної бази (INSPIRE, Copernicus) до фінансування інноваційних і екологічних проєктів (Horizon Europe, LIFE, ERDF).

Ось узагальнена таблиця 2 з основними програмами ЄС, їхнім призначенням та можливостями у сфері інвентаризації земель:

Ці програми можна використовувати комплексно: INSPIRE та Copernicus забезпечують технологічну базу, Horizon Europe та ERDF – фінансування цифровізації, а LIFE Programme – екологічну складову.

Ось приклади міжнародних кейсів, які можна адаптувати для Львова, щоб удосконалити інвентаризацію земель комунальної власності:

Польща: LPIS (Land Parcel Identification System) є частиною Інтегрованої адміністративної та контрольної системи (IACS) ЄС. Використовується для точного кадастрового обліку земельних ділянок. Система інтегрована з супутниковими даними програми Copernicus, що дозволяє щорічно оновлювати інформацію про межі та використання земель. Ця програма сприяє зменшенню кількості земельних спорів, автоматичний контроль за дотриманням екологічних вимог (наприклад, мінімальна частка екологічних угідь). Для місцевих громад позитивним буде впровадження аналогічної системи GIS для моніторингу використання земель комунальної власності та інтеграція з екологічними даними.

Чехія: CUZK – Czech Office for Surveying, Mapping and Cadastre. Інтегрована кадастрова система з відкритим онлайн-доступом до кадастрових карт та правових даних про земельні ділянки. Її запровадження дозволило громадянам та інвесторам перевіряти межі ділянок, власність та обмеження безпосередньо онлайн, що зменшило корупційні ризики та прискорило інвестиційні процеси. Фактично, CUZK є споріднена нашій Публічній карті до війни, що була створена як цифрова кадастрова база з відкритим доступом для громадян та бізнесу.

Німеччина: інтеграція кадастру з екологічними базами даних. Кадастрові системи поєднані з інформацією про стан ґрунтів, водних ресурсів та охоронні території. В результаті забудова планується з урахуванням екологічних ризиків, а природоохоронні території захищені від нецільового використання. Позитивним би було інтегрувати екологічний моніторинг у кадастрові системи для контролю за забудовою у зелених зонах.

Європейський Союз (загалом): Horizon Europe та LIFE Programme. Фінансують проєкти цифровізації кадастрових систем у країнах Центральної та Східної Європи для створення відкритих кадастрових баз, інтеграції екологічних стандартів, підвищення прозорості земельних відносин. Місцеві громади можуть подавати заявки на гранти для фінансування інвентаризації земель та впровадження екологічних стандартів.

Таблиця 2 – Програми ЄС для цифровізації кадастрових систем та екологічного моніторингу

Програми ЄС	Призначення	Перспектива
INSPIRE Directive (2007/2/EC)	створення інфраструктури просторової інформації в Європі, сумісність геоінформаційних систем.	впровадження єдиної системи GIS для земель міста, інтеграція картографічних та правових даних.
Copernicus Programme	супутниковий моніторинг довкілля, оновлення кадастрових даних	використання супутникових знімків для контролю за станом ґрунтів, зелених зон та забудови
Horizon Europe (2021–2027)	дослідження та інновації, фінансування цифровізації та екологічних проєктів	залучення грантів для створення цифрового кадастру з екологічним моніторингом, розвиток «розумного міста»
European Regional Development Fund (ERDF)	фінансування регіональних цифрових та інфраструктурних проєктів	отримання коштів на створення відкритих кадастрових баз та цифровізацію земельного управління
LIFE Programme	екологічні проєкти, інтеграція моніторингу довкілля	фінансування захисту природоохоронних територій, інтеграція екологічних даних у кадастрові системи

Джерело: розроблено автором.

Таким чином, міжнародний досвід показує, що успішні практики базуються на цифровізації кадастру, відкритості даних та інтеграції екологічного моніторингу, а фінансування забезпечується через гранти ЄС.

Таким чином, (будь-яке місто, і Львів зокрема) може використати:

- польський досвід для *GIS та супутникового моніторингу* (створення GIS-системи для моніторингу земель комунальної власності з використанням супутникових знімків для актуалізації даних);
- чеський – для *відкритих кадастрових баз* (створення цифрової кадастрової бази з відкритим доступом для громадян та бізнесу, що підвищить інвестиційну привабливість міста);
- німецький – для *екологічної інтеграції* (інтеграція екологічного моніторингу у кадастрові системи для контролю за забудовою у зелених зонах та прогнозування екологічних ризиків);
- програми ЄС – для *фінансування цифровізації та екологічних проєктів* (подання заявок на гранти для фінансування інвентаризації земель, цифровізації кадастру та впровадження екологічних стандартів).

Структурований план дій на основі міжнародних практик виглядатиме так:

Крок 1. Впровадження GIS-системи шляхом створення єдиної геоінформаційної системи для земель комунальної власності використовуючи польський досвід LPIS та супутникові дані *Copernicus* для точного відображення меж ділянок, щорічного оновлення даних, автоматичного контролю за екологічними вимогами.

Крок 2. Створення відкритої кадастрової бази шляхом запровадження цифрової бази даних із відкритим доступом для громадян та інвесторів адаптовуючи чеський досвід CUZK (онлайн-кадастр) для прозорості земельних відносин, зменшення корупційних ризиків, підвищення інвестиційної привабливості Львова.

Крок 3. Інтеграція екологічного моніторингу шляхом поєднання кадастрових даних з інформацією про стан ґрунтів, водних ресурсів та охоронні території використовуючи німецький досвід 3D-кадастру для планування забудови з урахуванням екологічних ризиків, захист зелених зон від нецільового використання.

Крок 4. Залучення фінансування шляхом подачі заявки на гранти та програми ЄС використовуючи Horizon Europe (фінансування цифровізації та «розумних міст»), LIFE Programme (підтримка екологічних проєктів), ERDF (кошти на регіональні цифрові та інфраструктурні проєкти) для стабільного фінансування інвентаризації земель, зменшення залежності від місцевого бюджету.

Крок 5. Комплексна інтеграція шляхом об'єднання GIS, відкритого кадастру та екологічного моніторингу у єдину систему створюючи сучасний, прозору та екологічно орієнтовану модель управління земельними ресурсами Львова.

Таким чином, план дій складається з п'яти взаємопов'язаних кроків, на основі яких можна сформувати власну модель удосконалення управління земельними ресурсами міст, поєднавши:

- технологічні рішення (GIS, 3D-кадастр);
- прозорість (відкриті кадастрові бази);
- екологічну інтеграцію (моніторинг довкілля);
- стійке фінансування (гранти ЄС).

Для підвищення ефективності інвентаризації земель комунальної власності доцільно застосувати комплексний підхід, що поєднує міжнародний досвід та європейські програми підтримки.

Львів може стати прикладом для інших українських міст, якщо поєднає цифрові технології, відкритість даних, екологічну інтеграцію та європейське фінансування. Такий підхід не лише підвищить ефективність управління земельними ресурсами, але й сприятиме розвитку міста як інвестиційно привабливого та екологічно збалансованого центру.

Ось перелік основних ризиків та викликів, які можуть виникнути при реалізації дорожньої карти для удосконалення інвентаризації земель Львова:

1. Фінансові ризики: обмеженість місцевого бюджету для стартових інвестицій; конкуренція за гранти ЄС (Horizon Europe, LIFE, ERDF) – високі вимоги до проєктних заявок; ризик затримок у фінансуванні через бюрократичні процедури.

2. Технічні виклики: необхідність створення сучасної IT-інфраструктури для GIS та відкритих кадастрових баз; інтеграція різних джерел даних (правових, картографічних, екологічних) у єдину систему; потреба у регулярному оновленні даних (супутникові знімки, польові обстеження).

3. Кадрові та організаційні ризики: недостатня кількість фахівців із геоінформаційних систем та кадастрового управління; опір змінам з боку окремих управлінських структур, які звикли працювати за старими схемами; потреба у навчанні персоналу та підвищенні кваліфікації.

4. Правові та нормативні виклики: неузгодженість між місцевими та національними нормативними актами щодо земельного кадастру; ризик затримок у прийнятті рішень через складні юридичні процедури; необхідність гармонізації з європейськими стандартами (INSPIRE Directive).

5. Соціальні та комунікаційні ризики: недовіра громадян до нових систем через попередній досвід корупції у земельних питаннях; можливий спротив забудовників при інтеграції екологічних обмежень у кадастр; потреба у прозорій комунікації та залученні громадськості.

Реалізація дорожньої карти потребує комплексного управління ризиками: фінансового планування, технічної модернізації, навчання кадрів, правової гармонізації та активної комунікації з громадою. Це дозволить Львову не лише впровадити сучасну систему інвентаризації земель, але й забезпечити її стійкість та довіру суспільства:

- найбільш критичними є фінансові та технічні ризики, адже вони безпосередньо впливають на можливість запуску системи;

- кадрові та організаційні ризики мають високу ймовірність, але їхній вплив можна зменшити через навчання та комунікацію;
- правові ризики потребують гармонізації з європейськими стандартами (INSPIRE Directive);
- соціальні ризики можна мінімізувати через прозорість та залучення громадськості.

Таким чином, усі ці проблеми взаємопов'язані: відсутність актуальної кадастрової інформації ускладнює контроль за самовільним зайняттям і використанням земель не за призначенням, а бюрократія та фінансові затримки лише поглиблюють ситуацію.

Висновки. Інвентаризація земель комунальної власності є стратегічним інструментом управління територіальними ресурсами міських громад. Проведене дослідження показало, що цей процес здійснюється неповно та фрагментарно, що призводить до відсутності актуальної кадастрової інформації, самовільного зайняття земель, їх використання не за цільовим призначенням, затримок у фінансуванні та адміністративних перепон.

Інвентаризація земель комунальної власності має стратегічне значення для розвитку міських громад. Запропоновані напрями удосконалення інвентаризації включають:

- впровадження геоінформаційних систем (GIS) для інтеграції просторових та правових даних;
- створення відкритих цифрових кадастрових баз, доступних для громадян та інвесторів;
- інтеграцію екологічного моніторингу у кадастрові системи, що є новим науковим напрямом для України;
- розроблення багатоканальних фінансових механізмів підтримки, включаючи гранти міжнародних організацій та державно-приватне партнерство.

Запропонований структурований план дій на основі міжнародних практик удосконалення інвентаризації дозволяє адаптувати міжнародний досвід до українських реалій та створити сучасну систему управління земельними ресурсами.

Міжнародний досвід (Польща, Чехія, Німеччина, програми ЄС – INSPIRE, Copernicus, Horizon Europe, LIFE, ERDF) підтверджує ефективність цифровізації кадастрових систем, відкритості даних та багатоканального фінансування. Адаптація цих практик до українських реалій дозволить створити сучасну модель управління земельними ресурсами, яка забезпечить прозорість, фінансову стабільність та інвестиційну привабливість міських громад.

Новизна дослідження полягає у комплексному підході до інвентаризації земель комунальної власності, що поєднує правові, організаційні, технічні та екологічні аспекти. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання органами місцевого самоврядування для модернізації системи управління земельними ресурсами та залучення інвестицій.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробленні єдиної методології інвентаризації земель, стандартизації процедур, інтеграції екологічних даних у кадастрові системи та пошуку нових фінансових інструментів для підтримки цього процесу.

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

Під час написання цього матеріалу автор використовував перевірку орфографії написання статті за допомогою ШІ. Після використання цього інструменту автор переглянув та відредагував зміст за потреби і взяв на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Кондратенко, Д. Ю. (2019). Інвентаризація земель як правова форма обліку земель. *Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету. Серія: Юриспруденція*, *42*(1). https://vestnik-pravo.mgu.od.ua/archive/juspradenc42/part_1/29.pdf.

2. Нестеренко Г.Б., & Бідун І.М. (2013) Інвентаризація землі як основний компонент у земельному кадастрі та системі управління земельними ресурсами (на прикладі Ківерцівського району Волинської області). *Вісник Львівського національного аграрного університету. Серія: Економіка АПК. 20(2),* 153-158.

3. Брехлійчук, В., & Лахоцька, Е. (2023). Інвентаризація земель ОТГ: Актуальність даного процесу. *Актуальні проблеми землеустрою та кадастру*, *2*(12), 45–50. https://dspace.uzhnu.edu.ua/items/c0f98ff0-3dd7-49a9-8bec-89cec320d074/full.

4. Butenko, E., & Prykhodko, M. (2020). Scientific and applied principles of inventory of territorial communities lands in Ukraine. *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development, 20(4)*, 93–98.

5. Koshkalda, I., Anopriienko, T., Pilicheva, M., & Maslii, L. (2021). Methodology of application of modern technologies in land inventory of territorial communities. *Baltic Surveying, 14(1),* 36–42. https://llufb.llu.lv/Raksti/Journal_Baltic_Surveying/2021/Journal_Baltic_Surveying_Vol_14_2021-17-24.pdf.

6. Церклевич, А., Білявський, М., Миронець, О., Гудз, В., & Щур, Б. (2024). Інвентаризація земель у територіальних громадах: Організаційні та технічні виклики. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, (48). https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2024/10/16.pdf.

7. Udovenko I., Kyselov I., Shemyakin M., Domashenko H., & Kononenko S. (2017). Land inventory on the basis of methods of GIS technologies use. *International Journal of Engineering and Advanced Technology, 8(6),* 227–232. https://lib.udau.edu.ua/server/api/core/bitstreams/7934f453-8c95-4fcd-925a-14f62842bd0f/content.

8. Aleuov, A. S., Jaksibaev, R. N., & Nurnazarov, S. J. (2025). The role of geographic information systems (GIS) in land cadastre. *Ekonomika i Sotsium*, 5–1(132), 72–76.

9. Львівська міська рада. (1998, 6 лютого). *Про інвентаризацію земель м. Львова* (Рішення № 51). https://www8.city-adm.lviv.ua.

10. Верховна Рада України. (2003, 22 травня). *Про землеустрій* (Закон України № 858-IV). http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/858-15.

11. Верховна Рада України. (2017, 4 червня). *Про державний земельний кадастр* (Закон України № 3613-17). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3613-17#Text.

12. Кабінет Міністрів України. (2019, 5 червня). *Про затвердження Порядку проведення інвентаризації земель та визнання такими, що втратили чинність, деяких постанов Кабінету Міністрів України* (Постанова № 476). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/476-2019-%D0%BF#n9.

13. Варіанти Львів. (2025, 29 липня). *У Львові за десять років майже вдвічі зменшилась площа парку Кортумова гора*. https://varianty.lviv.ua/publikatsiyi/u-lvovi-za-desiat-rokiv-maizhe-vdvichizmenshylasploshchaparku-kortumova-hora.

14. Левків, Я. (2025, 5 травня). Державна аудиторська служба України провела комплексний аудит стану справ у Львівській територіальній громаді, якою вже непристойно довго керує міський голова Андрій Садовий. *Leopolis.news: Новини зі Львова*. https://leopolis.news/hto-vkrav-desyatky-ga-zemli-lvivskyh-parkiv-vysnovky-derzhaudytu/.

15. Львівська міська рада. (2014, 20 березня). *Про погодження меж геологічної пам'ятки природи місцевого значення парку "Кортумова гора" та надання ЛКП "Зелений Львів" дозволу на виготовлення технічної документації із землеустрою щодо встановлення (відновлення) меж земельної ділянки на місцевості парку "Кортумова гора"* (Ухвала № 3176). https://www8.city-adm.lviv.ua.

16. Немає кадастрового номера – виникнуть проблеми: роз'яснення юристів і приклади з практики. (2025, 21 червня). *ФАКТ: інформаційно-аналітичний портал*. https://fact-news.com.ua/nemae-kadastrovogo-nomera-viniknut-problemi-roz-yasnennya-yuristiv-i-prikladi-z-praktiki/.

17. Управління державного контролю за використанням та охороною земель. (2025). *Звіт управління державного контролю за використанням та охороною земель департаменту природних ресурсів та будівництва Львівської міської ради за 2025 рік*. https://city-adm.lviv.ua/portal/public-information/offices/upravlinnia-derzhavnoho-kontroliu-za-vykorystanniam-ta-okhoronoiu-zemel/zvity/.

18. Львів. Містобудування. (n.d.). *Самовільне захоплення землі на майже 50 га* [Facebook post]. Facebook. https://www.facebook.com/photo/?fbid=698917928952294&set=pcb.698919388952148.

19. Нецільове використання землі може бути підставою для припинення в судовому порядку як права власності, так і користування нею. (n.d.). *ЮРЛІГА*. https://jurliga.ligazakon.net/news/218698_netslove-vikoristannya-zeml-mozhe-buti-pdstavoyu-dlya-pripinennya-v-sudovomu-poryadku-yak-prava-vlasnost-tak--koristuvannya-neyu.

20. Львівська міська рада. (2024). *Про виконання бюджету Львівської міської територіальної громади за 2024 рік*. https://city-adm.lviv.ua/portal/public-information/budget/lviv/biudzhet-lvivskoi-miskoi-terytorialnoi-hromady-na-2024-rik/.

21. Пояснювальна записка до Законопроєкту № 2194 від 01.10.2019 «Проект Закону про внесення змін до Земельного кодексу України та інших законодавчих актів щодо удосконалення системи управління та дерегуляції у сфері земельних відносин». (2019). https://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=66970.

22. European data portal. (б. д.). The European Data Portal. https://data.europa.eu/data/datasets/91fa7ef1-21c6-4c98-92f4-535634250c26?locale=en.

23. ČÚZK - czech office for surveying, mapping and cadastre. (б. д.). ČÚZK - Úvod. https://cuzk.gov.cz/English/Offices/COSMC/COSMC.aspx.

24. FIG commission 3 - term 2019-2022 - working group joint commission 3 and 7 - 3D cadastres. (б. д.). FIG - International Federation of Surveyors. https://www.fig.net/organisation/comm/wg/2022_joint3_7.asp.

25. INSPIRE directive. (б. д.). INSPIRE Knowledge Base. https://knowledge-base.inspire.ec.europa.eu/legislation/inspire-directive_en.

26. Київська обласна рада. (2022, 16 лютого). *Програма проведення інвентаризації та нормативної грошової оцінки земель у Київській області на 2017–2020 роки* (Рішення № 212-09-VIII). https://kor.gov.ua/wp-content/uploads/2024/09/Prohrama-inventaryzatsiia.pdf.

27. Ступень Н., &Мельник М. (2025). 3D-кадастр як інструмент відображення результатів моніторингу об'єктів навколишнього середовища. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва, випуск I (49),* 234-241. https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2025/04/250129-%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%D1%96%D0%BD%D0%BA%D0%B8-27.pdf

28. Міністерство економіки України. (n.d.). *Три напрями роботи Уряду для стимулювання інвестицій та економічного зростання*. https://www.ukrainefacility.me.gov.ua/wp-content/uploads/2024/06/ukraine-investment-framework.pdf.

29. Copernicus Programme. (n.d.). Copernicus – European Commission. https://www.copernicus.eu/en.

30. Horizon Europe. (n.d.). European Commission – Horizon Europe. https://www.reportlinker.com/market-report/Research-And-Development/508853/Research-And-Development?term=research.

31. European Regional Development Fund. (n.d.). European Commission – European Regional Development Fund (ERDF). https://commission.europa.eu/funding-tenders/find-funding/eu-funding-programmes/european-regional-development-fund-erdf_en.

32. LIFE Programme. (n.d.). European Commission – LIFE Programme. https://environment.ec.europa.eu/index_en.

References

1. Kondratenko, D. Yu. (2019). Inventaryzatsiia zemel yak pravova forma obliku zemel [Land inventory as a legal form of land accounting]. *Naukovyi visnyk Mizhnarodnoho humanitarnoho universytetu. Seriia: Yurysprudentsiia – Scientific Bulletin of the International Humanitarian University. Series: Jurisprudence*, 42(1). https://vestnik-pravo.mgu.od.ua/archive/juspradenc42/part_1/29.pdf.

2. Nesterenko, H. B., Bidun, I. M. (2013). Inventaryzatsiia zemli yak osnovnyi komponent u zemelnomu kadastri ta systemi upravlinnia zemelnymy resursamy (na prykladi Kivertsivskoho raionu Volynskoi oblasti) [Land inventory as a key component in land cadastre and land resource management system (case study of Kivertsi district, Volyn region)]. *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Seriia: Ekonomika APK – Bulletin of Lviv National Agrarian University. Series: Economics of Agro-Industrial Complex, 20(2),* 153–158.

3. Brekhliichuk, V., & Lakhotska, E. (2023). Inventaryzatsiia zemel OTH: aktualnist danoho protsesu [Land inventory of territorial communities: Relevance of the process]. *Aktualni problemy zemleustroiu ta kadastru – Current Issues of Land Management and Cadastre*, 2(12), 45–50. https://dspace.uzhnu.edu.ua/items/c0f98ff0-3dd7-49a9-8bec-89cec320d074/full.

4. Butenko, E., & Prykhodko, M. (2020). Scientific and applied principles of inventory of territorial communities lands in Ukraine. *Scientific Papers Series: Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*, 20(4), 93–98.

5. Koshkalda, I., Anopriienko, T., Pilicheva, M., & Maslii, L. (2021). Methodology of application of modern technologies in land inventory of territorial communities. Baltic Surveying, 14(1), 36–42. https://llufb.llu.lv/Raksti/Journal_Baltic_Surveying/2021/Journal_Baltic_Surveying_Vol_14_2021-17-24.pdf.

6. Tserklevych, A., Biliavskyi, M., Myronets, O., Hudz, V., & Shchur, B. (2024). Inventaryzatsiia zemel u terytorialnykh hromadakh: orhanizatsiini ta tekhnichni vyklyky [Land inventory in territorial communities: Organizational and technical challenges]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Modern Achievements of Geodetic Science and Production*, 2(48). https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2024/10/16.pdf.

7. Udovenko, I., Kyselov, I., Shemyakin, M., Domashenko, H., & Kononenko, S. (2017). Land inventory on the basis of methods of GIS technologies use. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 8(6), 227–232. https://lib.udau.edu.ua/server/api/core/bitstreams/7934f453-8c95-4fcd-925a-14f62842bd0f/content.

8. Aleuov, A. S., Jaksibaev, R. N., & Nurnazarov, S. J. (2025). The role of geographic information systems (GIS) in land cadastre. *Ekonomika i Sotsium – Economy and Society*, 5-1(132), 72–76.

9. Lvivska miska rada. (1998, February 6). Pro inventaryzatsiiu zemel m. Lvova [On land inventory of the city of Lviv] (Decision No. 51). https://www8.city-adm.lviv.ua.

10. Verkhovna Rada Ukrainy. (2003, May 22). Pro zemleustrii [On land management] (Law No. 858-IV). http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/858-15.

11. Verkhovna Rada Ukrainy. (2017, June 4). Pro derzhavnyi zemelnyi kadastr [On the State Land Cadastre] (Law No. 3613-17). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3613-17#Text.

12. Kabinet Ministriv Ukrainy. (2019, June 5). Pro zatverdzhennia Poriadku provedennia inventaryzatsii zemel [On approval of the procedure for land inventory] (Resolution No. 476). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/476-2019-%D0%BF#n9.

13. Varianty Lviv. (2025, July 29). U Lvovi za desiat rokiv maizhe vdvichi zmenshylas ploshcha parku Kortumova hora [The area of Kortumova Hora park in Lviv has almost halved over ten years]. https://varianty.lviv.ua/publikatsiyi/u-lvovi-za-desiat-rokiv-maizhe-vdvichizmenshylasploshchaparku-kortumova-hora.

14. Levkiv, Ya. (2025, May 5). Derzhavna audytorska sluzhba Ukrainy provela kompleksnyi audyt stanu sprav u Lvivskii terytorialnii hromadi [State Audit Service of Ukraine conducted a comprehensive audit of Lviv territorial community]. *Leopolis.news.* https://leopolis.news/hto-vkrav-desyatky-ga-zemli-lvivskyh-parkiv-vysnovky-derzhaudytu/.

15. Pro pohodzhennia mezh heolohichnoi pamiatky pryrody mistsevoho znachennia parku "Kortumova hora" [On approval of boundaries of Kortumova Hora park] (Resolution No. 3176). (2014, March 20). https://www8.city-adm.lviv.ua.

16. Informatsiino-analitychnyi portal "FAKT". (2025, June 21). Nemaie kadastrovoho nomera – vynyknut problemy: roziasnennia yurystiv i pryklady z praktyky [No cadastral number – problems will arise: Legal explanations and case studies]. https://fact-news.com.ua/nemae-kadastrovogo-nomera-vin-iknut-problemi-roz-yasnennya-yuristiv-i-prikladi-z-praktiki.

17. Upravlinnia derzhavnoho kontroliu za vykorystanniam ta okhoronoiu zemel. (2025). Zvit upravlinnia derzhavnoho kontroliu za vykorystanniam ta okhoronoiu zemel departamentu pryrodnykh resursiv ta budivnytstva Lvivskoi miskoi rady za 2025 rik [Report of the Department of State Control over Land Use and Protection of the Lviv City Council for 2025].

18. Lviv. Mistobuduvannia. (n.d.). Samovilne zakhoplennia zemli na maizhe 50 ha [Unauthorized land occupation of nearly 50 hectares]. https://www.facebook.com/photo/?fbid=698917928952294&set=pcb.698919388952148.

19. YURLIHA. Netsiliove vykorystannia zemli mozhe buty pidstavoiu dlia prypynennia prava vlasnosti [Misuse of land as grounds for termination of ownership or use rights]. https://jurliga.ligazakon.net/news/218698_netslove-vikoristannya-zeml-mozhe-buti-pdstavoyu-dlya-pripinennya-v-sudovomu-poryadku-yak-prava-vlasnost-tak--koristuvannya-neyu.

20. Lvivska miska rada. (2024). Pro vykonannia biudzhetu Lvivskoi miskoi terytorialnoi hromady za 2024 rik [On the execution of the budget of Lviv territorial community for 2024]. https://city-adm.lviv.ua/portal/public-information/budget/lviv/biudzhet-lvivskoi-miskoi-terytorialnoi-hromady-na-2024-rik.

21. Verkhovna Rada Ukrainy. (2019, October 1). Poiasniuvalna zapyska do zakonoproiektu No. 2194 [Explanatory note to Draft Law No. 2194]. https://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=66970.

22. Official website "European Unian". Land Parcel Identification System https://data.europa.eu/data/datasets/91fa7ef1-21c6-4c98-92f4-535634250c26?locale=en.

23. Official website "CUZK – Czech Office for Surveying, Mapping and CadastrePortál katastru a zeměměřictví". https://cuzk.gov.cz/English/Offices/COSMC/COSMC.aspx.

24. Official website "Fédération Internationale des Géomètres, FIG". FIG – Germany on the Way to 3D-Cadastre. https://www.fig.net/organisation/comm/wg/2022_joint3_7.asp.

25. Official website "European Commission – INSPIRE". INSPIRE Directive. https://knowledge-base.inspire.ec.europa.eu/legislation/inspire-directive_en.

26. Kyivska oblasna rada. (2022, February 16). Prohrama provedennia inventaryzatsii ta normatyvnoi hroshovoi otsinky zemel u Kyivskii oblasti na 2017–2020 roky [Program of land inventory and normative monetary valuation of land in Kyiv region for 2017–2020] (Decision No. 212-09-VIII). Kyiv. https://kor.gov.ua/wp-content/uploads/2024/09/Prohrama-inventaryzatsiia.pdf.

27. Stupen, N., & Melnyk, M. (2025). 3D-kadastr yak instrument vidobrazhennia rezultativ monitorynhu obiektiv navkolyshnшoho seredovyshcha [3D cadastre as a tool for environmental monitoring visualization]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Modern Achievements of Geodetic Science and Production*, 1(49), 234–241. https://zgt.com.ua/3d-%D0%BA%D0%B0%D0%B4%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%80-%D1%8F%D0%BA-%D1%96%D0%BD%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82-%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F-%D1%80/.

28. Ministerstvo ekonomiky Ukrainy. Try napriamy roboty Uriadu dlia stymuliuvannia investytsii ta ekonomichnoho zrostannia [Three directions of government activity for stimulating investment and economic growth]. Kyiv. https://www.ukrainefacility.me.gov.ua/wp-content/uploads/2024/06/ukraine-investment-framework.pdf.

29. Official website "Copernicus – European Commission". https://www.copernicus.eu/en.

30. Official website "European Commission – Horizon Europe". Horizon Europe. https://www.reportlinker.com/market-report/Research-And-Development/508853/Research-And-Development?term=research.

31. Official website "European Commission – ERDF". European Regional Development Fund (ERDF). https://commission.europa.eu/funding-tenders/find-funding/eu-funding-programmes/european-regional-development-fund-erdf_en.

32. Official website "European Commission – LIFE Programme". LIFE Programme. https://environment.ec.europa.eu/index_en.

Дата першого надходження статті до видання: 25.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.03.2026

UDC 332.3:332.12

Galyna Nesterenko

Candidate of Economic Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Land Cadastre, Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies Lviv (Dubliany, Ukraine),
E-mail: galianesterenko@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-4411-1242
ResearcherID: PJB-2205-2026

MODERN TRENDS AND DIRECTIONS FOR IMPROVING THE INVENTORY OF MUNICIPAL LANDS: INTERNATIONAL EXPERIENCE

The urgency of this research stems from the fact that land inventory for municipal properties is a vital tool for the effective management of urban community resources. It ensures the reliability of cadastral information, lays the groundwork for transparent land use, and contributes to the financial stability of local budgets. Rapid urbanization, infrastructure expansion, financial instability, and the challenges posed by martial law have increased the need for transparent and efficient land management. In this context, land inventory transcends a mere technical procedure; it becomes a strategic instrument for urban development, attracting investment, and ensuring community welfare.

The problem is linked to the incomplete and fragmented implementation of land inventory in Ukrainian cities, particularly in Lviv. The primary issues include a lack of updated cadastral information, unauthorized occupation of municipal lands, non-targeted land use, delays in financing, and bureaucratic obstacles. These factors result in outdated cadastral data, diminished investment attractiveness, limited transparency in land management, and significant economic losses for communities.

The research objective is to identify contemporary trends and directions for improving the inventory of municipal lands in Ukraine, using Lviv as a case study, and to adapt international best practices to national realities.

The analysis of recent studies highlights the multifaceted nature of land inventory. The legal aspects underscore its role as a form of land accounting and a guarantee of legality in land relations. Organizational approaches emphasize its significance for cadastral management and decision-making processes. Technical aspects focus on employing electronic tacheometers, GNSS receivers, UAVs, orthophoto maps, and GIS technologies. International experience showcases the effectiveness of digital cadastral systems, integration of ecological monitoring, and multi-channel financing. Notable examples include Poland's LPIS system, the Czech integrated cadastral system, Germany's 3D cadastre, and various EU programs such as INSPIRE, Copernicus, Horizon Europe, LIFE, and ERDF.

In conclusion, modernizing land inventory through digitalization, GIS integration, ecological monitoring, and financial diversification will enhance transparency, financial stability, and investment attractiveness in Ukrainian cities. International examples confirm the success of open cadastral systems and multi-channel financing. The proposed measures can serve as a foundation for creating a modern model of municipal land management in Ukraine that integrates legal, organizational, technical, and ecological components.

***Keywords**: land inventory; municipal property; cadastre; GIS technologies; ecological monitoring; digitalization; international experience.*

Fig.: 1. References: 32.

Нестеренко Г. Б. Сучасні тенденції та напрями удосконалення інвентаризації земель комунальної власності: міжнародний досвід. *Технічні науки та технології*, 2026. № 2(44). С. 536-551. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-536-551.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-552-560
УДК 528.8+332.2

Марина Олегівна Пілічева

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри проектування доріг, геодезії та землеустрою
Харківський національний автомобільно-дорожній університет (Харків, Україна)
E-mail: maryna.pilicheva@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1733-7534
Scopus Author ID: 57215290310. **Researcher ID:** ABG-5067-2020

ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ФОРМУВАННЯ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ ЛІНІЙНИХ ЛІСОВИХ НАСАДЖЕНЬ

У статті розглянуто питання формування геопросторових даних лісових насаджень лінійного типу як важливої складової лісового фонду України. Обґрунтовано актуальність дослідження у зв'язку з фрагментарністю наявної інформації та відсутністю системного обліку таких об'єктів. Визначено мету створення інтегрованої бази геоданих для забезпечення моніторингу, аналізу та управління. Дослідження базується на аналізі нормативно-правових актів і сучасних підходів ГІС та дистанційного зондування Землі. Запропоновано структуру бази геоданих, що включає просторові, атрибутивні та метадані. Розроблена інфологічна модель забезпечує систематизацію інформації та підтримку прийняття управлінських рішень. Отримані результати сприяють підвищенню ефективності екологічного моніторингу та охорони лісових насаджень.

Ключові слова: *лісові насадження лінійного типу, геопросторові дані, база геоданих, геоінформаційна система, інфологічна модель.*

Рис.: 3. Табл.: 1. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Лісові насадження лінійного типу становлять важливий елемент лісового фонду України та відіграють суттєву роль у забезпеченні екологічної стійкості територій. До таких насаджень належать полезахисні лісові смуги, придорожні та прибережні насадження, а також захисні смуги вздовж інженерних комунікацій. Вони виконують широкий спектр функцій: запобігають вітровій і водній ерозії ґрунтів, сприяють збереженню біорізноманіття, регулюють мікроклімат, зменшують негативний вплив антропогенних факторів та змін клімату. Особливої ваги ці насадження набувають в умовах інтенсивного сільськогосподарського використання земель і зростання екологічних ризиків.

У сучасних умовах цифрової трансформації управління природними ресурсами ключового значення набуває наявність якісних геопросторових даних. Геоінформаційні системи забезпечують можливість комплексного аналізу просторової структури, породного складу, вікових характеристик і санітарного стану лінійних насаджень. Водночас важливу роль відіграють метадані, які гарантують достовірність, актуальність і можливість багаторазового використання інформації. Інтеграція таких даних у Національну інфраструктуру геопросторових даних створює передумови для міжвідомчої взаємодії, стандартизації інформаційних ресурсів та підвищення ефективності управлінських рішень. У зв'язку з цим дослідження особливостей формування геопросторових даних лісових насаджень лінійного типу є вкрай актуальним як з наукового, так і з практичного погляду.

Постановка проблеми. Попри значну екологічну та господарську цінність, лісові насадження лінійного типу тривалий час залишалися поза належною увагою з боку державної системи обліку та моніторингу. Існуюча інформація про такі об'єкти є розрізненою, неповною та часто застарілою, що суттєво ускладнює проведення їх інвентаризації, оцінювання якісного стану та визначення динаміки змін. Відсутність єдиних підходів до збору, структурування та зберігання геопросторових даних призводить до неузгодженості інформаційних ресурсів і обмежує можливості їх практичного використання.

Додатковою проблемою є невідповідність наявних даних сучасним вимогам цифрового середовища, зокрема щодо стандартизації, сумісності та інтеграції в Національну інфраструктуру геопросторових даних. Це унеможливлює ефективний обмін інформацією між органами влади, науковими установами та іншими зацікавленими сторонами. У результаті знижується якість управлінських рішень у сфері охорони, відновлення та раціонального використання лісових насаджень.

© М. О. Пілічева, 2026

Таким чином, існує об’єктивна потреба в розробленні науково обґрунтованих підходів до формування цілісної, структурованої та стандартизованої системи геопросторових даних лісових насаджень лінійного типу, яка забезпечить їх ефективний моніторинг, аналіз і управління в умовах сучасних викликів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд сучасних наукових джерел засвідчує стрімке зростання ролі геоінформаційних систем у лісовому господарстві. Поєднання ГІС, технологій дистанційного зондування Землі, LiDAR та методів машинного навчання сформувало нову парадигму управління лісовими ресурсами, у якій ключовим є не лише картографування, а й комплексний аналіз просторово-часових змін [1]. Для України особливої актуальності ці підходи набули після 2022 року, коли воєнні дії спричинили значні трансформації лісових екосистем, зокрема появу пошкоджених, замінованих і недоступних територій. У таких умовах ГІС-технології стали фактично єдиним інструментом оперативної оцінки стану лісів та завданих збитків [2].

У міжнародних дослідженнях чітко простежується тенденція до інтеграції різнорідних джерел даних. Сучасні наукові підходи передбачають комбінування супутникових знімків (Sentinel, Landsat), ортофотоматеріалів високої роздільної здатності, LiDAR-даних і результатів польових вимірювань, що дозволяє отримувати детальну інформацію про висоту дерев, біомасу, структуру крон та інші характеристики насаджень [3–4].

У європейських країнах активно розвиваються національні геоінформаційні платформи, інтегровані в інфраструктури геопросторових даних. Важливу роль у цьому процесі відіграють підходи MRV (вимірювання, звітність, верифікація) та стандартизація метаданих, що забезпечують достовірність і узгодженість інформації [5]. Показовим прикладом є платформа Global Forest Watch, яка надає відкритий доступ до даних про стан лісового покриву, його зміни та потенційні загрози, забезпечуючи можливості для просторового аналізу й моніторингу [6].

В Україні подібні підходи реалізуються в межах Національної інвентаризації лісів, яка базується на поєднанні дистанційного зондування та наземних вимірювань. Отримані результати дозволили сформувати репрезентативну характеристику лісових ресурсів, виявити розбіжності з офіційними даними та оцінити вплив антропогенних і воєнних факторів [7]. Дослідження підкреслюють необхідність створення інтегрованих систем моніторингу, що забезпечують комплексний аналіз і ефективне управління лісовими ресурсами.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на суттєвий розвиток геоінформаційних технологій у сфері лісового господарства, питання формування геопросторових даних для лісових насаджень лінійного типу залишається недостатньо дослідженим. Переважна більшість наукових досліджень орієнтована на великі лісові масиви, тоді як лінійні насадження, що характеризуються специфічною просторовою структурою та функціональним призначенням, не отримали належного наукового опрацювання.

Недостатньо розробленими залишаються підходи до стандартизації складу геопросторових даних для таких об’єктів, визначення їх атрибутивних характеристик та забезпечення сумісності з вимогами сучасних геоінформаційних систем. Водночас відсутні комплексні моделі інтеграції різнорідних джерел інформації в єдині бази геоданих, що ускладнює здійснення повноцінного моніторингу та просторового аналізу.

Таким чином, наявна наукова прогалина зумовлює необхідність розроблення методичних підходів до формування, стандартизації та інтеграції геопросторових даних лісових насаджень лінійного типу відповідно до сучасних вимог цифровізації. Саме тому подальші наукові дослідження у цій сфері, зокрема щодо формування, стандартизації й актуалізації геопросторових даних, є необхідною передумовою створення ефективної сучасної моніторингової геоінформаційної системи та підвищення якості управління лісовими ресурсами.

Мета дослідження (статті). Метою дослідження є обґрунтування методичних підходів до формування геопросторових даних лінійних лісових насаджень та створення інтегрованої бази геоданих, що забезпечує систематизацію, аналіз і візуалізацію просторової та атрибутивної інформації для підвищення ефективності моніторингу, управління і планування заходів у сфері лісового господарства та екологічної безпеки.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких завдань:

− здійснити класифікацію лінійних лісових насаджень захисного призначення;

− визначити їх основні якісні та просторові характеристики;

− обґрунтувати склад і структуру набору геопросторових даних з урахуванням вимог до формування Національної інфраструктури геопросторових даних;

− розробити концептуальну модель та структуру бази геоданих лінійних лісових насаджень.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до нормативних положень [8], ліси поділяються на категорії залежно від їх функціонального призначення, екологічного значення та рівня охорони. Особливою увагою у цьому контексті користуються захисні лісові ділянки, які виконують критично важливі екологічні та ґрунтозахисні функції, зокрема: стримування ерозії, стабілізація ґрунтових вод, захист від вітрової ерозії, збереження біорізноманіття та підтримка мікроклімату.

У науковій та практичній діяльності класифікація лісових насаджень є необхідною передумовою їх обліку, моніторингу та ефективного управління. З урахуванням цілей дослідження доцільно застосовувати багатокритеріальний підхід, що поєднує функціональні, просторові, екологічні та господарські ознаки. У таблиці 1 відображено класифікацію лісових насаджень, що поєднує функціональні, просторові, екологічні та господарські критерії.

Таблиця 1 – Класифікація лісових насаджень лінійного типу

Критерій	Категорії	Характеристика	Значення для ГІС та моніторингу
Функціональне призначення	Захисні	Полезахисні, протиерозійні, водоохоронні	Визначає екологічні функції та пріоритети охорони
	Рекреаційні	Зони відпочинку, зелені насадження	Планування рекреаційної діяльності та зонування
	Природоохоронні	Заповідні, прибережно-захисні смуги	Контроль за охороною та моніторинг змін
	Експлуатаційні	Деревостан для заготівлі деревини	Планування лісогосподарських заходів
Просторова структура	Лінійні	Лісосмуги, придорожні, прибережні	Ключові для геопросторового представлення у ГІС
	Суцільні	Масиви	Для порівняльного аналізу з лінійними насадженнями
	Фрагментовані	Окремі ділянки	Оцінка ступеня ізоляції та екологічної стійкості
Походження	Природні	Сформовані природним шляхом	Визначення природної динаміки та відновлення
	Штучні	Створені людиною	Планування посадок та управління насадженнями
	Змішані	Поєднання природного і штучного	Моніторинг змішаних систем для адаптивного управління
Породний склад	Чисті	Одна домінуюча порода	Оцінка біорізноманіття та стійкості
	Змішані	Кілька порід	Визначення продуктивності та екологічної стійкості
Вікова структура	Молодняки, середньовікові, стиглі, перестійні	Вік насаджень	Планування заходів з відновлення та охорони
Просторово-планувальні характеристики	Ширина, протяжність, щільність, орієнтація	Одно- або багаторядні, вузькі/середні/широкі	Ключові для моделювання в ГІС і відображення лінійних об’єктів

Джерело: розроблено автором.

Якісні характеристики захисних лісосмуг визначають рівень їх екологічної та господарської результативності й охоплюють комплекс структурних, санітарних і функціональних показників. До основних із них належать видовий і віковий склад насаджень, ступінь зімкненості крон, вертикальна диференціація та рівень біорізноманіття, які безпосередньо впливають на стійкість насаджень до зовнішніх впливів і їх здатність виконувати ґрунтозахисні, кліматорегулювальні та водоохоронні функції. Важливе значення мають також показники санітарного стану деревостану, наявність пошкоджень або ознак деградації, а також просторово-планувальні параметри, зокрема ширина, протяжність, конфігурація та орієнтація відносно панівних вітрів. Сукупність зазначених характеристик визначає ефективність лісосмуг у зменшенні швидкості вітру, запобіганні ерозійним процесам, регулюванні мікроклімату агроландшафтів та забезпеченні екологічної стійкості територій.

Під час розроблення моделі геопросторових даних захисних лісових смуг доцільним є використання різноманітних вихідних даних, що формуються державними органами та установами, відповідальними за створення, ведення й актуалізацію геопросторових ресурсів і відповідних метаданих.

Відповідно до Порядку функціонування національної інфраструктури геопросторових даних [9], склад базових геопросторових даних визначає перелік ключових геоінформаційних ресурсів, необхідних для формування та використання тематичних наборів даних. У контексті створення бази геоданих лінійних лісових насаджень доцільно використовувати відповідні базові набори геопросторових даних, наведені на рисунку 1, що забезпечує формування структурованої, інтегрованої та зручної для подальшого використання інформаційної системи.

На рис. 1 представлено структуру базових геопросторових даних, необхідних для створення та оновлення наборів у межах національної інфраструктури геопросторових даних. Схема має ієрархічну будову та відображає ключові джерела і типи даних, що формують основу для побудови тематичних геоінформаційних ресурсів, зокрема для лісових насаджень лінійного типу. Комплексний підхід до формування геопросторових даних, де поєднуються картографічні, кадастрові, геодезичні та дистанційні джерела інформації. Така інтеграція забезпечує багаторівневу узгодженість даних – від загальнодержавного до локального рівня.



Рис. 1. Базові набори для формування геопросторових даних лісових насаджень лінійного типу

Джерело: розроблено автором.

У контексті дослідження лінійних лісових насаджень дана структура має принципове значення, оскільки дозволяє:

- забезпечити точну просторову прив'язку лісосмуг;
- інтегрувати їх у систему адміністративно-територіального устрою;
- використовувати кадастрові дані для аналізу землекористування;
- застосовувати ортофотоплани для виявлення, дешифрування та моніторингу стану насаджень.

У процесі проєктування та подальшого використання бази геоданих було розроблено інфологічну модель (рис. 2), яка відображає концептуальний рівень організації даних і є основою для подальшої реалізації бази даних [10]. Зазначена модель включає ключові структурні елементи – сутності, зв'язки та атрибути. Сутності репрезентують основні об'єкти предметної області (зокрема лісові насадження, земельні ділянки, адміністративні одиниці), зв'язки відображають логічні та просторові взаємозв'язки між ними, а атрибути деталізують їх властивості, забезпечуючи повноту опису об'єктів. Такий підхід дозволяє формалізувати структуру даних і забезпечити її узгодженість із реальними процесами та об'єктами.

Інфологічна модель виконує важливу роль у забезпеченні логічної цілісності, внутрішньої узгодженості та ієрархічної впорядкованості даних. Вона створює основу для побудови ефективної бази геоданих, у якій враховуються як просторові, так і атрибутивні характеристики об'єктів. Крім того, така модель сприяє уніфікації підходів до структурування інформації, що є особливо важливим у контексті інтеграції даних у геоінформаційні системи та Національну інфраструктуру геопросторових даних.

Застосування системного та структурованого підходу до моделювання суттєво підвищує зрозумілість бази даних для користувачів різного рівня підготовки, спрощує процеси її наповнення та супроводу, а також мінімізує ризики виникнення логічних помилок і дублювання інформації. Водночас така організація даних забезпечує можливість їх подальшого масштабування, оновлення та ефективного використання для аналізу, моніторингу та прийняття управлінських рішень у сфері лісового господарства.

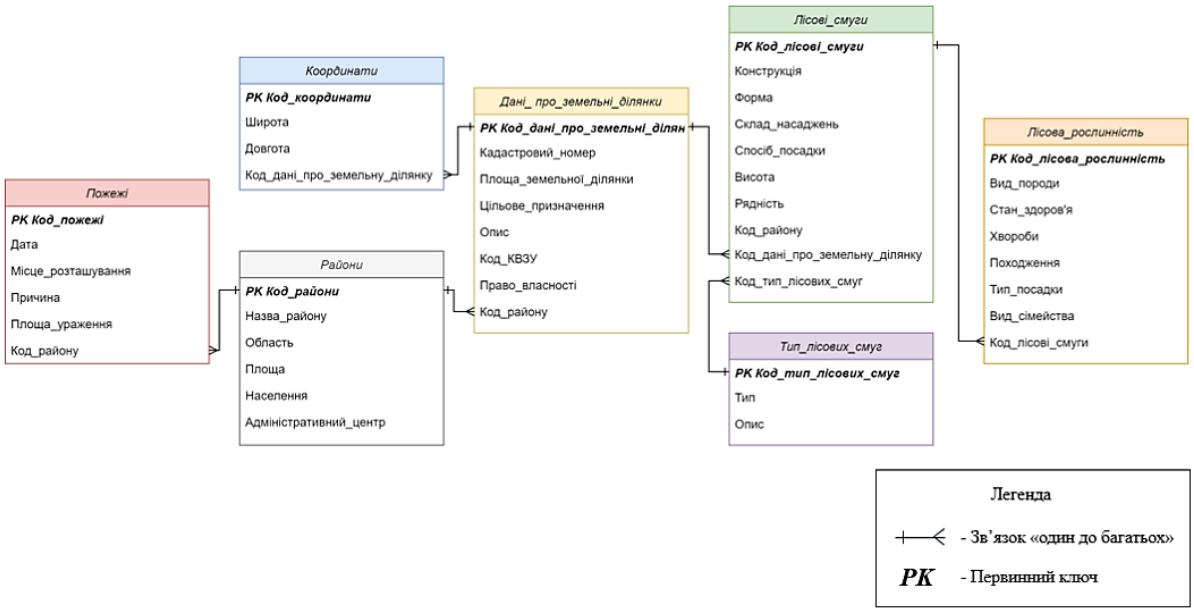


Рис. 2. ER-діаграма бази геоданих лісових насаджень лінійного типу

Джерело: розроблено автором.

База геоданих (БГД) є комплексною інтегрованою інформаційною системою, призначеною для збирання, зберігання, обробки, аналізу та візуалізації різнорідних географічних даних, що становлять основу функціонування геоінформаційних систем. Вона забезпечує відображення просторових об'єктів у вигляді їх геометрії, просторового положення, взаємозв'язків та змін у часі, що дозволяє формувати цілісне уявлення про стан і динаміку територій у локальному та регіональному контекстах.

Для ефективного управління лісовими ресурсами структура БГД включає низку взаємопов'язаних компонентів. Передусім це просторові дані, які визначають точне географічне положення об'єктів, їх координати, висотні характеристики та геометрію, забезпечуючи однозначну ідентифікацію лісових насаджень. Важливе значення мають таксаційні (атрибутивні) дані, що містять детальну інформацію про якісні та кількісні характеристики лісових ресурсів, зокрема породний склад, вік, діаметр, густоту та інші показники. Топологічні дані відображають просторові відношення між об'єктами, дозволяючи аналізувати їх взаємне розташування та взаємодію, наприклад, у системі «лісові насадження – рельєф – гідрографічна мережа».

Окрему групу становлять динамічні дані, які характеризують часові зміни лісового покриву, включаючи процеси росту, деградації, відновлення та вплив антропогенних чинників. Не менш важливими є метадані, що містять інформацію про джерела, методи отримання, точність, формати та системи координат даних, забезпечуючи їхню достовірність, сумісність і можливість багаторазового використання.

Розроблена база геоданих виступає ефективним інструментом для вирішення широкого кола прикладних завдань у сфері лісового господарства. Її використання дозволяє оптимізувати управління лісовими ресурсами, зокрема шляхом обґрунтування заходів із лісовідновлення, планування рубок, визначення перспективних ділянок для створення нових насаджень, а також оцінки рекреаційного потенціалу територій.

Інтеграція БГД у геопортали значно розширює можливості доступу до інформації та забезпечує прозорість управлінських процесів. Це створює передумови для ефективної взаємодії органів державної влади та місцевого самоврядування, дозволяючи здійснювати комплексний аналіз територій, розробляти стратегії сталого розвитку та приймати науково обґрунтовані управлінські рішення щодо використання лісових ресурсів.

Крім того, БГД відіграє ключову роль у системі екологічного моніторингу, забезпечуючи можливість оперативного виявлення та аналізу негативних процесів, таких як ерозія ґрунтів, незаконні рубки чи лісові пожежі. Завдяки цьому стає можливим своєчасне визначення проблемних ділянок і розроблення ефективних заходів для збереження екологічної рівноваги та сталого розвитку природних екосистем.

У межах проведеного дослідження на основі сформованої бази геоданих було створено тематичну карту лісових насаджень лінійного типу (рис. 3). Карта відображає просторове розміщення об'єктів, їхні основні характеристики та взаємозв'язки з іншими елементами території.

Розроблена тематична карта забезпечує наочну візуалізацію структури лісових смуг, дозволяє аналізувати їхня протяжність, конфігурацію, розташування відносно адміністративних меж, земельних ділянок і природних об'єктів. Вона також є ефективним інструментом для виявлення змін у стані насаджень, оцінки їхньої функціональної ролі та підтримки процесу прийняття управлінських рішень.

Створення тематичної карти є важливим етапом практичної реалізації геоінформаційного підходу, оскільки сприяє узагальненню результатів дослідження, підвищує доступність і зрозумілість геопросторових даних та забезпечує їх ефективне використання в системах моніторингу й управління лісовими ресурсами.

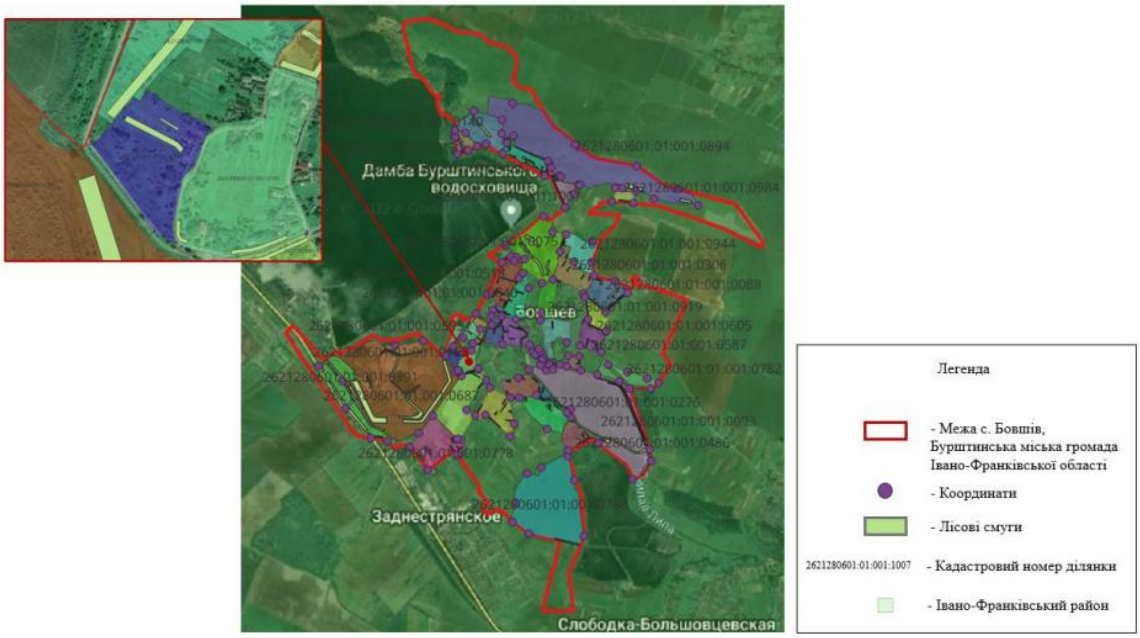


Рис. 3. Тематична карта лісових насаджень лінійного типу

Джерело: розроблено автором.

Висновок. Проведене дослідження підтверджує стратегічне значення лісових насаджень лінійного типу та нагальну потребу їх інтеграції до сучасної системи геопросторового обліку в Україні. З метою подолання фрагментарності їх відображення запропоновано концептуальні підходи та розроблено інфологічну модель бази геоданих лінійних лісових насаджень, зокрема:

1. Визначено ключові якісні та просторово-планувальні характеристики (видовий склад, ступінь зімкненості крон, санітарний стан, орієнтація), які виступають основою для оцінювання екологічної та господарської ефективності лісосмуг.

2. Сформовано інфологічну модель бази геоданих, що об’єднує просторові, таксаційні, топологічні, динамічні дані та метадані, забезпечуючи цілісність, структурованість інформації та її відповідність вимогам Національної інфраструктури геопросторових даних.

Розроблена база геоданих виступає важливим інструментом у системі сучасного лісового господарства та екологічного управління:

1. Вона формує аналітичну основу для оптимізації використання лісових насаджень, зокрема для планування господарських заходів, визначення доцільних ділянок для створення нових насаджень і оцінювання їх рекреаційного потенціалу.

2. Її інтеграція у геопортали забезпечує органи державної влади та місцевого самоврядування достовірною та відкритою інформацією, необхідною для комплексного аналізу територій, розроблення стратегій сталого розвитку та прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

3. База геоданих також слугує ефективним інструментом екологічного моніторингу, дозволяючи своєчасно виявляти загрози, такі як ерозійні процеси, незаконні рубки чи лісові пожежі, і розробляти заходи для запобігання їх негативним наслідкам та збереження природної рівноваги.

Список використаних джерел

1. Chen, J., Li, X., Huang, Z., Xuan, J., Chen, C., Hu, M., Tan, C., Zhou, Y., Zhao, Y., Yu, J., Huang, L., Song, M., & Du, H. (2024). Forest age estimation using UAV-LiDAR and Sentinel-2 data with machine learning algorithms- a case study of Masson pine (*Pinus massoniana*). *Geo-Spatial Information Science*, 1–21. https://doi.org/10.1080/10095020.2024.2362752.

2. Myroniuk, V., Weinreich, A., von Dosky, V., Melnychenko, V., Shamrai, A., Matsala, M., Gregory, M. J., Bell, D. M., & Davis, R. (2024). Nationwide remote sensing framework for forest resource assessment in war-affected Ukraine. *Forest Ecology and Management*, *569*, 122156. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122156.

3. Mihai, M. C., Miguel, S., Borlaf-Mena, I., Tijerín-Triviño, J., & Tanase, M. (2025) Assessing Forest Structure and Biomass with Multi-Sensor Remote Sensing: Insights from Mediterranean and Temperate Forests. *Forests*, 16(7), 1164. https://doi.org/10.3390/f16071164.

4. Wang, J., & Jiang, Yo. (2024) A Hybrid convolution neural network for theclassification of tree species usinghyperspectral imagery. *PLoSONE*, 19(5), e0304469. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0304469.

5. Forest Europe. (2021). *State of Europe's forests 2021.* Forest Europe Liaison Unit Bratislava. https://foresteurope.org/publications/.

6. Global Forest Watch. (n.d.). *Global Forest Watch map.* https://www.globalforestwatch.org/map/.

7. Myroniuk, V. (2023). *Remote sensing based forest inventory of Ukraine (RS-inventory): Methodology, output maps, and estimates.* Sustainable Forestry Implementation (SFI) Project. https://nfi.lisproekt.gov.ua/wp-content/uploads/2024/02/sfi-report-ua-myroniuk-v.1.2.2.pdf.

8. Кабінет Міністрів України. (2007). *Про затвердження Порядку поділу лісів на категорії та виділення особливо захисних лісових ділянок (Постанова № 733 від 16 травня 2007 р.).* https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/733-2007-%D0%BF#Text.

9. Кабінету Міністрів України (2021) *Про затвердження Порядку функціонування національної інфраструктури геопросторових даних* (*Постанова Кабінету Міністрів України від 26 травня 2021 р. № 532*). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/532-2021-%D0%BF#Text.

10. Пілічева, М. О., Кінь, Д. О., & Поморцева, О. Є. (2018). Інтеграція топографічної і кадастрової інформації базового набору геопросторових даних земельної ділянки. *Містобудування та територіальне планування, 66*, 523–531. https://surl.li/nibwqy.

References

1. Chena, J., Li, X., Huang, Z., Xuana, J., Chena, Ch., Hua, M., Tana, Ch., Zhoua, Yo., Zhaoa, Yi., Yua, J., Huanga, L., Songa, M., & Du, H. (2025) Forest age estimation using UAV-LiDAR and Sentinel-2 data with machinelearning algorithms – a case study of Masson pine (Pinus massoniana). *Geo-spatial information science*, 28(3), 1051–1071. https://doi.org/10.1080/10095020.2024.2362752.

2. Myroniuk, V., Weinreich, A., Dosky, V., Melnychenko, V., Shamrai, A., Matsala, M., Gregory, M. J., Bell, D. M., & Davis, R. (2024) Nationwide remote sensing framework for forest resource assessment in war-affected Ukraine. *Forest Ecology and Management*, 569, 122156. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122156.

3. Mihai, M. C., Miguel, S., Borlaf-Mena, I., Tijerín-Triviño, J., & Tanase, M. (2025) Assessing Forest Structure and Biomass with Multi-Sensor Remote Sensing: Insights from Mediterranean and Temperate Forests. *Forests*, 16(7), 1164. https://doi.org/10.3390/f16071164.

4. Wang, J., & Jiang, Yo. (2024) A Hybrid convolution neural network for theclassification of tree species usinghyperspectral imagery. *PLoSONE*, 19(5), e0304469. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0304469.

5. Forest Europe. (2021). *State of Europe's forests 2021.* Forest Europe Liaison Unit Bratislava. https://foresteurope.org/publications/.

6. Global Forest Watch Map. https://www.globalforestwatch.org/map/.

7. Remote Sensing Based Forest Inventory of Ukraine (RS-Inventory): Methodology, output maps, and estimates. https://nfi.lisproekt.gov.ua/wp-content/uploads/2024/02/sfi-report-ua-myroniuk-v.1.2.2.pdf.

8. Pro zatverdzhennya Poryadku podilu lisiv na kategoriyi ta vidilennya osoblivo zahisnih lisovih dilyanok [On approval of the procedure for dividing forests into categories and allocating particularly protective forest areas] : Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated May 16, 2007 No. 733. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/733-2007-%D0%BF#Text.

9. Pro zatverdzhennya Poryadku funkcionuvannya nacionalnoyi infrastrukturi geoprostorovih danih [On approval of the procedure for the functioning of the national geospatial data infrastructure]: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated May 26, 2021 No. 532. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/532-2021-%D0%BF#Text.

10. Pilicheva M.O., Kin D.O., & Pomorceva O.Ye. (2018) Integraciya topografichnoyi i kadastrovoyi informaciyi bazovogo naboru geoprostorovih danih zemelnoyi dilyanki [Integration of topographic and cadastral information of the basic geospatial data set of a land plot]. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia - Urban planning and spatial planning*, 66, 523-531. https://surl.li/nibwqy.

Дата першого надходження статті до видання: 27.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.03.2026

UDC 528.8+332.2

Maryna Pilicheva

PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Highway Design, Geodesy and Land Management
Kharkov National Automobile and Highway University (Kharkiv, Ukraine)
E-mail: maryna.pilicheva@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1733-7534
Scopus Author ID: 57215290310 **Researcher ID:** ABG-5067-2020

PRACTICAL ASPECTS OF GEOSPATIAL DATA FORMATION OF LINEAR FOREST PLANTINGS

The article focuses on the development of geospatial data formation for linear-type forest stands. These stands are a strategically important, yet one of the least researched and systematized components of Ukraine's forest fund, performing critical ecological, climatic, and soil-protective functions.

The relevance of the study is determined by the fact that, despite their key importance, these linear forest stands have long remained outside systematic state accounting. Information about them is extremely fragmented, complicating the monitoring of their condition, inventory procedures, and the development of effective measures for restoration and protection. Their effective management is impossible without current and standardized geospatial data integrated into the National Geospatial Data Infrastructure (NGDI).

The goal of the study is to create an integrated geospatial database (GDB) for linear-type forest stands to systematize, analyze, and visualize spatial and attribute information for effective monitoring, management, and planning of activities in the fields of forestry and environmental protection.

The research is based on the analysis of regulatory legal acts of Ukraine and contemporary scientific publications in the field of Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing. The methodology included determining the qualitative and spatial-planning characteristics of forest belts, defining the composition of the geospatial data set for linear forest stands considering NGDI requirements, and developing an infological model (ER-Diagram) of the GDB.

The developed GDB model for linear-type forest stands, which includes spatial, taxation, topological, dynamic data, and metadata, ensures logical integrity, structuredness, and compliance with NGDI requirements. Structurally, the GDB includes geospatial object classes such as: district, land plot, and forest belt.

The proposed GDB provides an analytical foundation for optimizing the use of forest belts, supporting justified management decisions (through integration into geoportal platforms), and effective ecological monitoring of threats (erosion, illegal logging, fires).

Keywords: *linear forest stands, geospatial data, geodatabase, geographic information system, infological model.*

Fig.: 3. Table: 1. References: 10.

Пілічева М. О. Практичні аспекти формування геопросторових даних лінійних лісових насаджень. *Технічні науки та технології*, 2026. № 2(44). С. 552-560. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-552-560.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-561-567
UDC 528.4:627.8

Maksym Kukhar[1], Tymur Horoshanskyi[2]

[1]PhD 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: ppoosshhttaa@ukr.net. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0001-8305-6269. **ResearcherID**: ISR-8853-2023

[2]Student of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)
E-mail: Tymur.Goroshanskyi@kname.edu.ua. **ORCID**: https://orcid.org/0009-0009-0012-8059

SPECIFIC FEATURES OF GEODETIC WORKS DURING THE CONSTRUCTION OF HYDROELECTRIC POWER PLANTS

The aim of this study is to determine the features of geodetic support during the construction of hydroelectric power stations (HPPs) using modern equipment. The study evaluates geodetic tasks across the design, construction, and exploitation stages of HPPs in Ukraine. It demonstrates that devices such as electronic total stations and terrestrial laser scanners reduce the time required to collect spatial data. Key characteristics of HPP geodetic support are established, including high-precision measurements, continuous monitoring, and specialized networks. These solutions form a theoretical basis for practical geodetic works at water management facilities.

Keywords*: hydraulic structures; geodesy; geodetic support of construction; electronic total station; terrestrial laser scanner.*

Fig.: 3. References: 11.

Relevance of the research. Modern infrastructure development relies on automated geodetic systems that generate unprecedented volumes of high-precision spatial data. This shift requires adapting classical error theory and statistics to process massive metrological datasets and ensure structural safety through continuous instrument verification. This study examines modern criteria for evaluating measurement accuracy and mathematical algorithms designed to minimize random and systematic errors.

Problem statement. Geodetic methodology evolves alongside data technologies. Robotic surveying has redefined accuracy and the human role, highlighting the gap between error-prone raw data and reliable processed models. Bridging this gap requires a robust algorithmic framework for evaluating accuracy (using mean square and relative errors) and a strict classification of instruments based on precision and calibration standards.

Analysis of recent research and publications. To form a comprehensive understanding of the regulatory framework and methodological foundations for performing geodetic works during the construction of hydraulic structures, sources [1, 2, 6] were analyzed. Modern trends regarding spatial data collection, processing, and their integration with geographic information systems (GIS) and artificial intelligence (AI) are discussed in the works of [3, 4].

The issues concerning the overall reliability and operational safety of large-scale hydraulic facilities in Ukraine are highlighted in the study [5]. Practical aspects of implementing advanced methods, specifically terrestrial laser scanning (TLS) for creating digital 3D models of hydropower plants (HPP), as well as the specificities of designing mini-hydropower plants, are described in papers [7, 10].

Special attention is given to high-precision methods for monitoring deformations and vertical displacements of dams using satellite technologies (GNSS), satellite radar, and InSAR, which are investigated in detail in scientific researches [8, 9, 11].

Isolation of previously unexplored parts of the general problem. Analysis of previous studies has shown that geodetic research on hydraulic structures has been conducted extensively, but primarily focusing on the monitoring of deformations and settlements during the exploitation phase. This remains a critical component for ensuring the safety of existing facilities. In general, various theoretical models for high-precision measurements and satellite-based monitoring (GNSS) of existing dams have been proposed.

© M. Kukhar, T. Horoshanskyi, 2026

However, a key limitation is that the specific features of geodetic support during the active construction stage of hydropower plants (HPP), especially with the application of contemporary high-precision instruments, have not been fully disclosed in the context of Ukraine. While traditional methods are well-documented, the methodological integration of robotic total stations and terrestrial laser scanning for the installation of hydro-units and geometry control of complex structures remains insufficiently explored. Moreover, there is a lack of comprehensive comparative analysis regarding the efficiency of these modern tools specifically for hydraulic engineering tasks under the challenging environmental conditions of Ukrainian water management systems.

Research objectives. The purpose of this study is to determine the specific features of geodetic support during the construction of hydroelectric power plants (HPP) and the application of modern geodetic equipment in these activities.

Object of the research: The object of the study is geodetic works during construction.

Subject of the research: The subject of the study is geodetic support at specific stages of hydroelectric power plant construction.

Assumptions and Limitations: The concept of "hydroelectric power plants" (HPP) encompasses both tidal power plants (TPP) and pumped-storage hydropower plants (PSHP). This scope determines the following assumptions and limitations:

Special attention should be given to the issues of developing the geodetic control network (geodetic basis) within the construction site territory.

A hydroelectric power plant (HPP) is accepted as the primary object of construction.

The statement of basic materials. To develop a design for a structure, initial data regarding the region and construction conditions are required, while economic indicators are also taken into account. For this purpose, comprehensive engineering surveys are conducted; regarding HPP construction, surveys are carried out to justify its placement scheme. Engineering-geodetic surveys play an equally important role, involving the collection and analysis of materials from previously performed geodetic and topographic works at the construction site, creating new or densifying existing geodetic networks, and providing topographic materials to design organizations and teams performing other types of surveys. When developing an HPP layout scheme, engineering-geodetic surveys are performed to determine the volumes of planned reservoirs and flooding patterns.

Based on the feasibility study, a structural design is developed, which considers the designs of hydraulic and energy structures, includes scientific research to verify design proposals, and finally establishes the parameters of the hydroelectric node. Like all complex objects, HPP design is carried out in two stages:

In the first stage, a technical design is prepared, which serves as a guide for the organization and execution of construction works;

In the second stage, working documentation is developed for the detailed design of all elements of the hydraulic node structures with specified dimensions and levels; also, construction execution plans (CEP) and geodetic execution plans (GEP) are created.

As a rule, the construction of hydroelectric power plants is carried out in several stages. The essence is that the primary structures (the HPP building, water intakes) are fully constructed first, and then the installation of the main equipment is performed sequentially.

For example, one can consider the construction process of the Dniester HPP (Fig. 1, a), which began in 1973. The article notes that the first two units were commissioned in 1981, and the final unit was commissioned in 1983. While historical projects like the Dniester HPP primarily relied on traditional geodetic methods, contemporary reconstruction and new construction projects necessitate the integration of advanced high-precision tools.

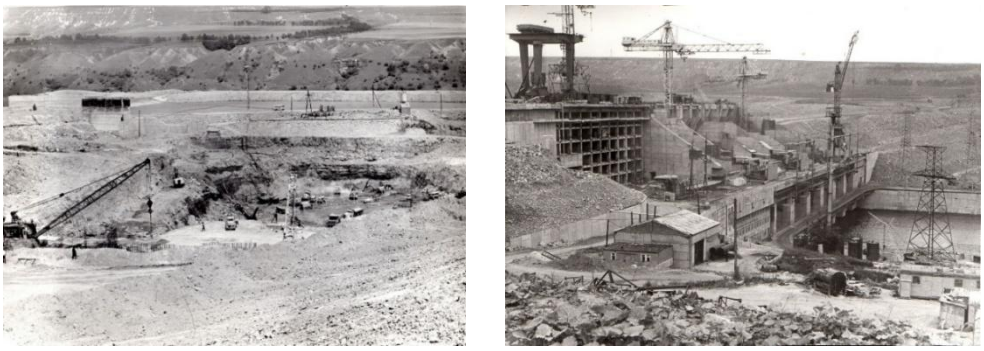


Fig. 1. Example of HPP construction:
a – start of construction of the Dniester complex hydroelectric node;
b – completion of construction of the main hydraulic structures of the Dniester HPP

HPP construction is traditionally divided into three periods:

- Preparatory: Infrastructure, resource routes, and flow diversion structures.
- Main: Construction of primary hydraulic structures and unit commissioning.
- Final: Completion and handover for operation.

Post-construction geodetic works track geometric changes using satellite technologies. In Ukraine, this is governed by DBN V.1.3-2:2010, requiring Geodetic Execution Plans (GEP) and scientific support for complex structures.

The geodetic framework comprises the State Geodetic Network (SGN) and densification networks. For hydroelectric power plants (HPPs), triangulation using electronic total stations or GNSS receivers is employed, depending on the circumstances, to determine the planimetric position with high accuracy.

Typically, one of the sides of the triangulation coincides with the main axis of the hydroelectric complex, which can be taken as the abscissa axis. Network points are marked with special geodetic markers equipped with devices for rapid forced centering of instruments and sighting targets (Fig. 2).



Fig. 2. Appearance of a geodetic pillar for forced centering of instruments

Density networks under conditions of limited visibility are established using the method of theodolite traverses. The elevation control system, which establishes the elevation of the river channel and supports topographic surveys, involves the creation of first- and second-class leveling networks along stable, non-flooded sections of river valleys. The choice of methodology depends on the conditions: Class II leveling is used for slopes less than 0.00003, and for wide rivers, it is necessary to lay out traverses on both banks. Densification networks (Classes III–IV) use depth or rock benchmarks, positioned to allow for the transmission of elevations over distances of 2–3 stations.

Monitoring of HPP structures is carried out in two stages:

1. Establishing deep benchmarks on both riverbanks.

2. Embedding deformation marks in foundations referenced to the first stage. Such networks are critical for the safety of high-responsibility facilities like HPPs.

A more appropriate approach to using contemporary geodetic instruments at construction sites can be characterized as follows: the instrument used must ensure high precision while significantly saving human labor and time. Potential representatives of such geodetic instruments include, for example, the electronic total station and the terrestrial laser scanner (Fig. 3).



а *б*

Fig. 3. Geodetic instruments relevant to the subject of the study:
a – Faro Focus 3D 120 terrestrial laser scanner; b – Leica Nova MS60 total station

The Leica Nova MS60 ensures highly efficient geodetic support for HPP construction, particularly in:

– Earthworks and monitoring: Surveying stockpiles, analyzing design surfaces, and real-time monitoring of dams, ice, and snow.

– Complex structures: Dimensional control of the hydroelectric node, as-built surveys, and structural health analysis.

– Hydro-unit installation: High instrument precision combined with GNSS integration significantly accelerates the development of detailed setting-out networks.

However, for rapid spatial data acquisition, Terrestrial Laser Scanning (TLS) is preferred. This method generates digital 3D models via point clouds. Practical experience with the Faro Focus 3D 120 at the Onokivska HPP confirmed the following advantages:

– Rapid large-scale topographic surveying and 3D modeling.

– Detection of geometric deviations and measurement of heavy machinery (lock gates, overhead cranes).

– Damage Assessment: TLS is indispensable for surveying destroyed infrastructure and calculating reconstruction volumes, which is critically relevant for Ukraine's current recovery efforts.

Conclusions. The characteristic features of geodetic works during the construction of hydroelectric power plants (HPP) have been established as follows:

1. Specific topographic requirements: Topographic materials must adhere to particular standards regarding scale and contour intervals (relief cross-sections).

2. High-precision measurements: The necessity for extreme accuracy, particularly during the installation and alignment of hydro-units.

3. Systematic geodetic control: Ongoing monitoring of the geometric parameters of hydraulic structures (HS).

4. Adverse environmental conditions: Execution of geodetic works in challenging settings, such as flooded areas, unstable or subsiding soils, and operations on ice during winter.

5. Durable geodetic monumentation: The installation of specialized, long-lasting geodetic markers and benchmarks designed to withstand harsh environmental factors.

6. GNSS integration: Equipping geodetic markers within the HPP territory with GNSS hardware for real-time monitoring of hydroelectric node displacements.

7. Scientific and technical support: The mandatory organization of specialized support for geodetic monitoring, given the complexity of the facility and its natural surroundings.

The scientific significance of this work lies in the formation of a theoretical framework for the practical implementation of geodetic operations during the construction of water management facilities.

In the course of the research, the following scientific results were achieved:

– An analysis of geodetic network development during both the construction and operational phases of an HPP was presented.

– Specific solutions were proposed for the utilization of modern geodetic equipment at various stages of HPP construction and maintenance.

Given the diversity of water management infrastructure, the object of this research has enabled a comprehensive representation of geodetic work technologies applicable to hydraulic structures of any purpose.

Statement on the Use of Generative AI and AI-Based Technologies in the Writing of This Article

While writing this article, the authors used the gemini.google.com service to translate the article's content into English. After using this service, the authors reviewed and edited the content as necessary and assume full responsibility for the content of this publication.

References

1. DBN V.2.4-3:2010. (2010). Hidrotekhnichni, enerhetychni ta melioratyvni systemy i sporudy, pidzemni hirnychi vyrobky. Hidrotekhnichni sporudy. Osnovni polozhennia [Hydraulic, energy and land reclamation systems and structures, underground mining. Hydraulic structures. Basic provisions]. Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine. https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/24_3_2010.pdf.

2. DBN V.1.3-2:2010. (2010). Heodezychni roboty u budivnytstvi [Geodetic works in construction]. Edition dated 25.09.2023. Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine. https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3199637436816688486?doc_type=2.

3. Kukhar, M. A., & Horoshanskyi, T. S. (2025). Suchasnyi pidkhid do vyrishennia zadach zboru ta analizu prostorovoi informatsii [Modern approach to solving problems of spatial information collection and analysis]. *Komunalne hospodarstvo mist. Seriia: Tekhnichni nauky ta arkhitektura, 3*(191), 401–407. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-401-407.

4. Kukhar, M. A. (2025). Suchasni tendentsii intehratsii heodezii, HIS ta shtuchnoho intelektu dlia roboty z prostorovymy danymy [Modern trends in the integration of geodesy, GIS and artificial intelligence for working with spatial data]. *Komunalne hospodarstvo mist. Seriia: Tekhnichni nauky ta arkhitektura, 4*(192), 285–291. https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-4-192-285-291.

5. Fareniuk, H. H., Vainberh, O. I., & Shuminskyi, V. D. (2020). Nadiinist ta bezpeka hidrotekhnichnykh sporud Dniprovskoho ta Dnistrovskoho kaskadiv HES [Reliability and safety of hydraulic structures of the Dnipro and Dniester HPP cascades]. *Nauka ta budivnytstvo, 25*(3), 3–12. DOI: https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v25i3.1.

6. Baran, P. I. (2012). *Inzhenerna heodeziia [Engineering geodesy]*. PAT «VIPOL». http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/5041.

7. Bilak, O. O., Tretyak, K. R., Malitskyi, A. Yu., & Shylo, Ye. O. (2017). Stvorennia kompleksnoi informatsiinoi 3D modeli Onokivskoi HES [Creation of a complex informational 3D model of the Onokivska HPP]. *Hidroenerhetyka Ukrainy*, 3-4, 1–6. http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Image_file_name=PDF/gidenu_2017_3-4_2.pdf.

8. Tretyak, K., & Palianytsia, B. (2021). Research of seasonal deformations of the Dnipro HPP dam according to GNSS measurements. *Journal of Geodesy and Geodynamics, 1*(30), 5–16. https://doi.org/10.23939/jgd2021.01.005.

9. Nesterenko, S., & Kliepko, A. (2022). Geodetic Monitoring of the Kaniv HPP Dam Using Satellite Radar. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2022»*, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022590018.

10.Romaniuk, V. (2025). Complex of geodetic works for the design and implementation of mini hydropower plants. The Importance of Innovation for the Modern World '2025: abstracts, gec39-00. https://doi.org/10.30890/2709-1783.2025-39-00-001.

11.Tretyak, K., & Kukhtar, D. (2025). Time series analysis of GNSS, InSAR and total station measurements for monitoring vertical displacements of the Dnister HPP dam. *Geomatics, 5*(4). https://doi.org/10.3390/geomatics5040073.

Список використаних джерел

1. Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. (2010). *Гідротехнічні, енергетичні та меліоративні системи і споруди, підземні гірничі виробки. Гідротехнічні споруди. Основні положення (ДБН В.2.4-3:2010).* https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/24_3_2010.pdf.

2. Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. (2023). *Геодезичні роботи у будівництві (ДБН В.1.3-2:2010, ред. від 25.09.2023).* https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3199637436816688486?doc_type=2.

3. Кухар М. А., Горошанський Т. С. (2025) Сучасний підхід до вирішення задач збору та аналізу просторової інформації. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура. 3(191),* 401–407. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-401-407.

4. Кухар М. А. (2025) Сучасні тенденції інтеграції геодезії, ГІС та штучного інтелекту для роботи з просторовими даними. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура. 4(192),* 285–291. https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-4-192-285-291.

5. Фаренюк Г. Г., Вайнберг О. І., Шумінський В. Д. (2020) Надійність та безпека гідротехнічних споруд Дніпровського та Дністровського каскадів ГЕС. *Наука та будівництво. 25(3),* 3–12. https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v25i3.1.

6. Баран, П. І. (2012). *Інженерна геодезія.* ПАТ «ВІПОЛ». http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/5041.

7. Білак, О. О., Третяк, К. Р., Маліцький, А. Ю., & Шило, Є. О. (2017). Створення комплексної інформаційної 3D моделі Оноківської ГЕС. *Гідроенергетика України, 3–4*, 1–6. http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/gidenu_2017_3-4_2.pdf.

8. Tretyak K., Palianytsia B. (2021) Research of seasonal deformations of the Dnipro HPP dam according to GNSS measurements. *Journal of Geodesy and Geodynamics. 1(30),* 5–16. https://doi.org/10.23939/jgd2021.01.005.

9. Nesterenko, S., & Kliepko, A. (2022). Geodetic monitoring of the Kaniv HPP dam using satellite radar. In Proceedings of the International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2022». https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022590018.

10. Romaniuk, V. (2025). Complex of geodetic works for the design and implementation of mini hydropower plants. In *The importance of innovation for the modern world ’2025: Abstracts* (gec39-00). https://doi.org/10.30890/2709-1783.2025-39-00-001.

11. Tretyak, K., & Kukhtar, D. (2025). Time series analysis of GNSS, InSAR and total station measurements for monitoring vertical displacements of the Dnister HPP dam. *Geomatics, 5*(4). https://doi.org/10.3390/geomatics5040073.

Дата першого надходження статті до видання: 10.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.03.2026

УДК 528.4:627.8

Кухар Максим Анатолійович[1], Горошанський Тимур Сергійович[2]

[1]кандидат технічних наук, доцент кафедри Земельного адміністрування та геоінформаційних систем
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)
E-mail: ppoosshhttaa@ukr.net. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0001-8305-6269
ResearcherID: ISR-8853-2023. **SCOPUSAuthorID**: 57214221308.

[2]студент кафедри Земельного адміністрування та геоінформаційних систем
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова (Харків, Україна).
E-mail: Tymur.Goroshanskyi@kname.edu.ua. **ORCID**: https://orcid.org/0009-0009-0012-8059

ОСОБЛИВОСТІ ГЕОДЕЗИЧНИХ РОБІТ ПІД ЧАС БУДІВНИЦТВА ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Метою дослідження є визначення та наукове обґрунтування особливостей геодезичного забезпечення на різних етапах будівництва та експлуатації гідроелектростанцій (ГЕС) в Україні із застосуванням сучасних технологій.

Методологічна основа роботи базується на комплексному аналізі класичних геодезичних вишукувань при будівництві ГЕС, нормативно-правової бази та аналізі геодезичного обладнання.

У роботі деталізовано структуру будівництва ГЕС та визначено специфічні вимоги до геодезичної основи, щодо чого було розглянуто методи тріангуляції та нівелювання як основу для створення високоточних планово-висотних мереж, також обґрунтовано застосування пунктів із примусовим центруванням приладів.

Для верифікації ефективності сучасного інструментарію проведено аналіз застосування електронного тахеометра Leica Nova MS60 та наземного лазерного сканера Faro Focus 3D 120, до того ж було аргументовано, що інтеграція GNSS-технологій у тахеометричні вимірювання дозволяє спростити процес польових робіт за рахунок оптимізації прив'язки приладу. Також, аналіз показав, що використання наземного лазерного сканування забезпечує створення 3D-моделей об'єктів, що є критично важливим для контролю геометрії складних вузлів та оцінки ступеня руйнувань інфраструктури в сучасних умовах за рахунок збору надлишкових даних.

На основі отриманих результатів сформовано теоретичну базу, яка дозволить розпочати виконання практичних геодезичних робіт на ГЕС, а також продемонстровано переваги автоматизованого збору даних для забезпечення моніторингу гідротехнічних споруд та для відновлення зруйнованих об'єктів енергетики.

Загалом, практична значущість дослідження полягає в удосконаленні методик геодезичного супроводу складних інженерних споруд, що дозволяє підвищити точність вимірювань, мінімізувати вплив помилок через людський фактор та забезпечити моніторинг деформаційних процесів у режимі реального часу.

Ключові слова: *гідротехнічні споруди, геодезичне забезпечення, гідроелектростанція, електронний тахеометр, наземне лазерне сканування, моніторинг.*

Рис.: 3. Бібл.: 11.

Kukhar, M., & Horoshanskyi, T. (2026) Specific features of geodetic works during the construction of hydroelectric power plants. *Technical sciences and technologies*, (2(44)), 561-567. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-561-567.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-568-583
УДК 697.94:621.577

Микола Сергійович Бандуркин[1], Володимир Олегович Макаров[2], Петро Геннадійович Сіняєв[3]

[1]аспірант ІІІ курсу групи ДФБ-3 за спеціальністю: 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)
E-mail: bandurkinn@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0000-3354-2445

[2]кандидат технічних наук, доцент
Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)
E-mail: volmak.03@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-9265-4663

[3]аспірант ІІІ курсу групи ДФБ-3 за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія»
Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)
E-mail: petersinyaev@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0007-9127-2456

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОМИСЛОВИХ ОСУШУВАЧІВ З ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ ТА РЕКУПЕРАТОРОМ: ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТА ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ

Розглянуто методи підвищення енергетичної ефективності осушувачів повітря з вбудованим тепловим насосом та рекуператором. Проведено аналіз процесів конденсаційного осушення повітря та тепломасообміну між повітряним потоком і холодоагентом. Обґрунтовано доцільність використання рекуперації теплоти для повторного використання енергії відпрацьованих повітряних потоків. Запропоновано схему осушувача з інтеграцією теплового насоса та рекуператора. Сформульовано підхід до оцінювання енергетичної ефективності системи та виконано порівняльний аналіз традиційної та енергоефективної конфігурацій.

***Ключові слова**: промисловий осушувач; тепловий насос; рекуперація теплоти; енергоефективність; осушення повітря; тепломасообмін; коефіцієнт перетворення.*
Рис.: 2 Бібл.: 20.

Актуальність теми дослідження. Зростання вимог до енергоефективності промислових систем вентиляції, кондиціювання та технологічної підготовки повітря в умовах підвищення вартості енергоресурсів і посилення екологічних обмежень зумовлює підвищену увагу до процесів осушення повітря як одного з найбільш енергоємних етапів повітрообробки [1-3]. У промислових умовах осушувачі повітря широко застосовуються для забезпечення стабільних параметрів мікроклімату, підтримання якості технологічних процесів і захисту обладнання, при цьому їх енергоспоживання істотно впливає на загальні експлуатаційні витрати підприємств [4-6]. Ефективність сучасних осушувальних установок значною мірою визначається раціональністю використання теплової енергії, що супроводжує процеси конденсації вологи, а також здатністю системи мінімізувати втрати теплоти з відпрацьованими повітряними потоками. Одним із найбільш перспективних напрямів підвищення енергоефективності таких систем є інтеграція теплових насосів і рекуператорів теплоти, які забезпечують повторне використання низькопотенційної теплової енергії та оптимізацію теплового балансу осушувальної установки.

Постановка проблеми. У цьому контексті дослідження принципів побудови, режимів роботи та енергетичних характеристик промислових осушувачів повітря з вбудованим тепловим насосом і рекуператором є актуальною науково-технічною задачею, розв’язання якої має важливе значення для зниження енергоспоживання та підвищення ефективності сучасних кліматичних і вентиляційних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, присвячених підвищенню енергоефективності систем осушення повітря в промислових і комерційних установках, свідчить про стійкий інтерес до застосування теплових насосів як основного інструменту зниження питомих витрат енергії на процеси кондиціювання та осушення повітря [2-6]. Значна частина робіт зосереджена на дослідженні термодинамічних циклів теплових насосів, оптимізації параметрів холодоагенту та підвищенні коефіцієнта перетворення за рахунок удосконалення компресійного контуру [7-9]. Окремий напрям наукових досліджень

© М. С. Бандуркин, В. О. Макаров, П. Г. Сіняєв, 2026

становлять роботи, присвячені впровадженню систем рекуперації теплоти у вентиляційних та осушувальних установках, де розглядаються різні типи рекуператорів і аналізується їх вплив на загальний тепловий баланс системи [10-12]. У цих дослідженнях показано, що утилізація теплоти відпрацьованого повітря дозволяє істотно зменшити теплові втрати, однак у багатьох випадках рекуперація розглядається ізольовано від роботи теплового насоса. Водночас низка публікацій присвячена комплексному аналізу систем осушення з інтегрованими тепловими насосами, проте такі роботи переважно обмежуються аналізом окремих режимів або експериментальними дослідженнями конкретних установок без узагальнення структурних і методичних підходів [13-15]. Попри наявні результати, у сучасних дослідженнях недостатньо систематизовані питання спільної оптимізації теплового насоса та рекуператора в межах єдиної осушувальної установки, а також ***бракує узагальнених підходів*** до оцінювання енергетичної ефективності таких систем у змінних умовах експлуатації, що зумовлює актуальність подальших досліджень у цьому напрямі.

Таким чином, ***метою роботи*** стало обґрунтування та формування узагальненого підходу до підвищення енергоефективності промислових осушувачів повітря з вбудованим тепловим насосом та рекуператором, що базується на системному аналізі тепломасообмінних процесів і оптимізації теплового балансу осушувальної установки. У межах поставленої мети передбачається розгляд принципів інтеграції теплового насоса та рекуператора теплоти в єдину структурно-функціональну схему осушувача, а також розроблення методичного підходу до оцінювання енергетичних показників такої системи з урахуванням змінних режимів експлуатації, параметрів вхідного повітря та умов промислового застосування. Реалізація запропонованого підходу спрямована на зниження питомих витрат електричної енергії, підвищення коефіцієнта енергетичної ефективності та забезпечення стабільності процесів осушення повітря у складі сучасних систем вентиляції, кондиціювання й технологічної підготовки повітря.

1. Особливості процесів осушення повітря в промислових умовах

Процеси осушення повітря займають ключове місце у складі промислових систем опалення, вентиляції та кондиціювання повітря (Heating, Ventilation, and Air Conditioning; HVAC), а також у технологічних установках підготовки повітря, де підтримання заданих параметрів вологості є необхідною умовою стабільності виробничих процесів і надійної роботи обладнання. У промислових умовах осушення повітря реалізується за різними фізичними принципами та конструктивними схемами, що зумовлює необхідність класифікації осушувальних установок за способом видалення вологи, режимами роботи та рівнем енергоспоживання. Водночас ефективність традиційних схем осушення суттєво обмежується значними енергетичними втратами, пов’язаними з відведенням теплоти у процесі конденсації вологи та нагрівання повітря, яке не використовується повторно в межах системи.

Особливу роль у цьому контексті відіграють теплові потоки, що формуються між повітряним середовищем, теплообмінними поверхнями та холодоагентом, оскільки саме вони визначають як інтенсивність процесу осушення, так і рівень питомих витрат енергії. За відсутності утилізації та рекуперації теплоти значна частина підведеної енергії втрачається з відпрацьованими повітряними потоками, що призводить до зниження загальної енергетичної ефективності осушувальних установок і зумовлює актуальність подальшого аналізу класифікації промислових осушувачів, механізмів формування енергетичних втрат та ролі теплових процесів у забезпеченні ефективного осушення повітря.

Промислові осушувачі повітря, що застосовуються у системах HVAC та технологічних процесах підготовки повітря, характеризуються значною різноманітністю конструктивних рішень і фізичних принципів видалення вологи. Залежно від способу осушення,

енергетичних характеристик і сфери застосування, такі установки можуть бути систематизовані за низкою класифікаційних ознак, що дозволяє виконувати порівняльний аналіз їх ефективності та доцільності використання в конкретних умовах експлуатації. Основні типи промислових осушувачів повітря (рис. 1) у рамках дослідження пропонується класифікувати таким чином [16-20]:

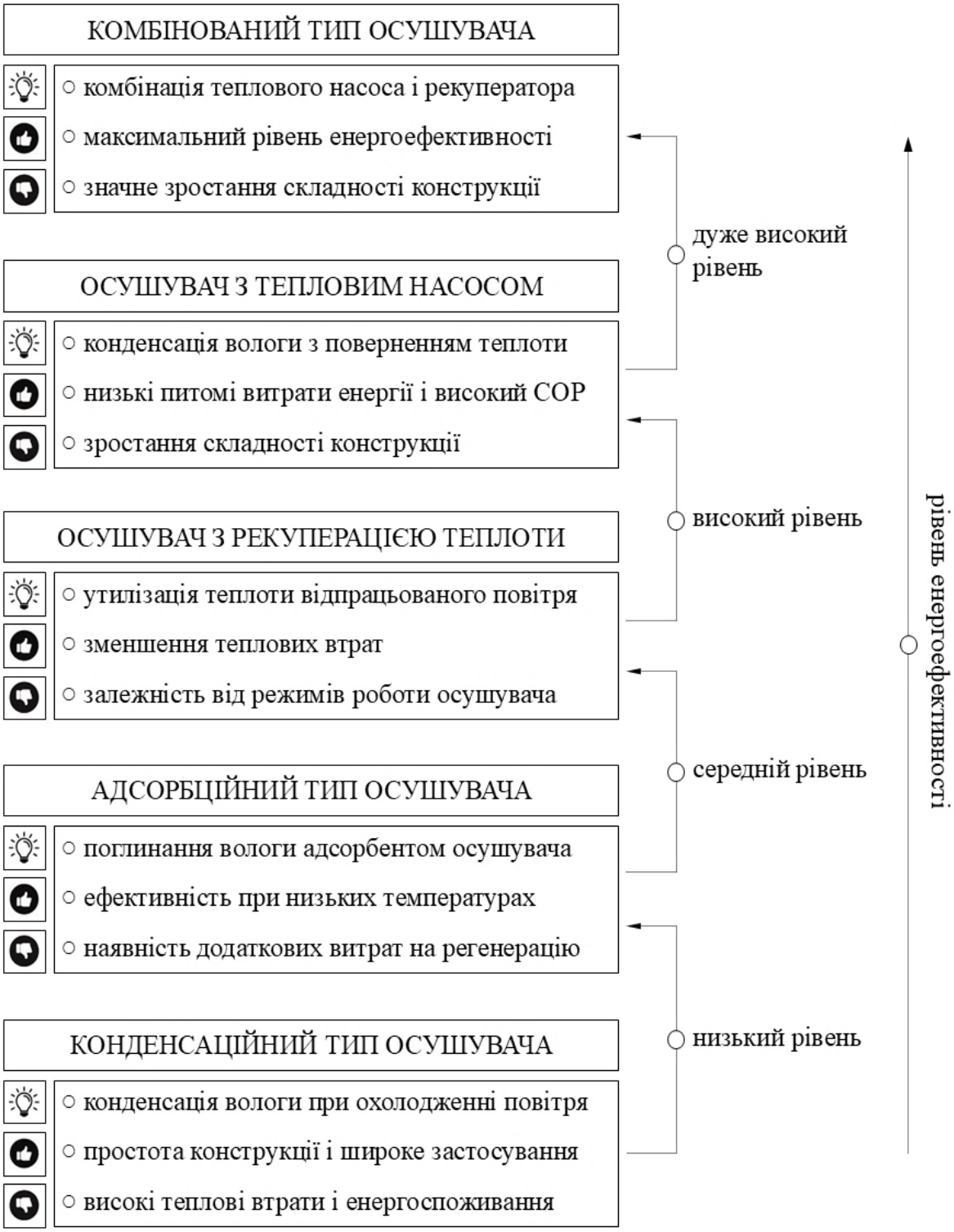


Рис. 1. Класифікація промислових осушувачів повітря за принципом дії та рівнем енергоефективності [16-20]

1. **Конденсаційні осушувачі**, в яких видалення вологи здійснюється шляхом охолодження повітря нижче температури точки роси з подальшою конденсацією водяної пари на поверхні теплообмінника. Такі осушувачі є найбільш поширеними в промисловій практиці, проте характеризуються підвищеними енергетичними витратами за відсутності утилізації теплоти.

2. **Адсорбційні осушувачі**, що базуються на поглинанні вологи гігроскопічними матеріалами (силікагель, цеоліти тощо). Вони ефективні при низьких температурах і вологості, однак потребують додаткових витрат енергії на регенерацію адсорбенту.

3. **Осушувачі з тепловим насосом**, у яких процес конденсації вологи поєднується з поверненням теплоти в осушуваний повітряний потік за рахунок роботи теплового насоса. Такі системи характеризуються підвищеним коефіцієнтом енергетичної ефективності та зниженими питомими витратами електроенергії.

4. **Осушувачі з рекуперацією теплоти**, в яких реалізується часткове або повне повернення теплоти відпрацьованого повітря шляхом використання теплообмінних рекуператорів. Ефективність таких систем значною мірою залежить від типу рекуператора та режимів роботи установки.

5. **Комбіновані осушувальні системи**, що поєднують тепловий насос і рекуператор теплоти в межах єдиної конструктивної схеми, забезпечуючи комплексну утилізацію теплової енергії та мінімізацію енергетичних втрат.

У традиційних промислових схемах осушення повітря, що базуються на конденсаційному принципі, енергетичні втрати формуються внаслідок особливостей тепломасообмінних процесів, пов’язаних з охолодженням повітря нижче температури точки роси та подальшим процесом конденсаціїї водяної пари. Загальні витрати енергії в таких системах визначаються необхідністю відведення прихованої теплоти фазового переходу вологи, а також явної теплоти охолодження повітряного потоку до заданих параметрів.

У спрощеному вигляді тепловий баланс процесу осушення може бути поданий як сума основних теплових потоків $Q_{\text{tot}} = Q_{\text{sens}} + Q_{\text{lat}}$, де Q_{tot} — загальна кількість теплової енергії, задіяної при осушенні (Total Heat Flow; THF), Q_{sens} — тепло, що було витрачене для зниження температури повітря (Sensible Heat; SH), у той час, як Q_{lat} — теплова енергія фазового переходу водяної пари у рідкий стан (Latent Heat; LH). У традиційних осушувачах зазначені теплові потоки, як правило, відводяться за межі системи без подальшого використання, що призводить до втрати значної частини підведеної енергії. Додатковим чинником зростання енергоспоживання є необхідність повторного нагрівання осушеного повітря до технологічно прийнятних параметрів, що супроводжується залученням зовнішніх джерел тепла або додаткових електронагрівальних елементів. Питомі витрати електричної енергії на одиницю видаленої вологи у рамках математичної моделі можуть бути подані у вигляді:

$$E_{\text{spec}} = (E_{\text{cool}} + E_{\text{reheat}})/m_{\text{w}}, \quad (1)$$

де E_{spec} – питомі витрати електроенергії (Specific Energy Consumption; SEC), E_{cool} – енерговитрати на охолодження повітря (Cooling Energy; CE), E_{reheat} – енерговитрати на повторний нагрів осушеного повітря (Reheating Energy; RHE), а m_{w} – маса сконденсованої вологи (Mass of Removed Water; MRW). Аналіз таких схем свідчить, що ключова частка енергетичних втрат пов’язана не з самим процесом видалення вологи, а з нераціональним використанням теплових потоків, які супроводжують фазовий перехід. За відсутності механізмів утилізації теплоти прихована теплота конденсації та теплота охолодженого повітря безповоротно розсіюються у навколишньому середовищі, формуючи структурну неефективність системи осушення. У цьому контексті доцільним є розгляд енергетичних втрат не лише як величини спожитої електроенергії, але і як дисбалансу

теплових потоків у межах осушувальної установки. Такий підхід створює передумови для переходу від локальної оптимізації окремих компонентів до системного аналізу теплового балансу, що, своєю чергою, слугує основою для впровадження теплових насосів і рекуператорів теплоти з метою зниження енергетичних втрат та підвищення загальної енергоефективності процесу осушення повітря.

Процес конденсації вологи в осушувальних установках є безпосередньо пов'язаним із перерозподілом теплових потоків між повітряним середовищем, теплообмінними поверхнями та холодоагентом, що визначає як інтенсивність видалення вологи, так і енергетичні показники системи загалом. За умови охолодження вологого повітря до температури нижче точки роси відбувається фазовий перехід водяної пари у рідкий стан, який супроводжується виділенням прихованої теплоти конденсації. Кількісно тепловий потік, що відповідає цьому процесу, може бути представлений у вигляді $Q_{\text{cond}} = \dot{m}_{\text{w}} \cdot h_{\text{v}}$, де Q_{cond} – тепловий потік, що виділяється при конденсації вологи (Condensation Heat Flow; CHF), $\dot{m}_{\text{w}}$ – масова витрата сконденсованої вологи (Water Mass Flow Rate; WMF), а h_{v} – питома прихована теплота фазового переходу (Latent Heat of Vaporization; LHV).

Поряд із прихованою теплотою суттєву роль відіграє тепловий потік, пов'язаний зі зниженням температури повітряного потоку до та після досягнення точки роси. Відповідний явний тепловий потік може бути описаний співвідношенням:

$$Q_{\text{air}} = \dot{m}_{\text{air}} \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad (2)$$

де Q_{air} — тепловий потік, зумовлений охолодженням повітря (Air Sensible Heat Flow; ASHF), $\dot{m}_{\text{air}}$— масова витрата повітря (Air Mass Flow Rate; AMFR), c_p – питома теплоємність повітря, а ΔT – зниження температури повітряного потоку. Сумарний тепловий потік у зоні конденсації формується як результат взаємодії зазначених складових і може бути поданий у вигляді $Q_{\text{tot}} = Q_{\text{air}} + Q_{\text{cond}}$, що підкреслює двокомпонентну природу теплових процесів при осушенні повітря. У традиційних схемах осушення цей сумарний тепловий потік відводиться за межі системи без подальшого використання, тоді як з точки зору енергетичного балансу він є потенційним джерелом корисної теплової енергії. Наукова новизна підходу, що пропонується у межах даного дослідження, полягає в розгляді теплових потоків, які супроводжують процес конденсації вологи, не як неминучих втрат, а як керованої енергетичної складової осушувальної системи. Така інтерпретація дозволяє перейти від пасивного відведення теплоти до її активної утилізації шляхом цілеспрямованого перерозподілу теплових потоків у межах установки. З позицій системного аналізу саме структура та напрям теплових потоків у зоні конденсації визначають граничні можливості підвищення енергоефективності осушувача, що створює теоретичне підґрунтя для інтеграції теплових насосів і рекуператорів теплоти з метою мінімізації енергетичних втрат та оптимізації процесів осушення повітря в промислових умовах.

Аналіз традиційних схем осушення повітря свідчить, що низька енергетична ефективність таких систем зумовлена не лише величиною споживаної електричної енергії, але насамперед відсутністю механізмів цілеспрямованої утилізації теплових потоків, які формуються у процесі конденсації вологи. Як показано вище, сумарний тепловий потік у зоні конденсації Q_{tot}, що включає як явну складову Q_{air}, так і приховану складову Q_{cond}, у більшості промислових осушувальних установок розсіюється в навколишнє середовище без подальшого використання. З енергетичної точки зору така схема призводить до втрати потенційно корисної теплової енергії, еквівалентної значній частині витрат на роботу компресійного або холодильного контуру. Відсутність утилізації теплоти зумовлює необхідність додаткового підведення енергії для повторного нагрівання осушеного повітря до технологічно допустимих параметрів, що формує замкнене коло енергетичних втрат: те-

плота спочатку відводиться з повітряного потоку, а згодом компенсується за рахунок зовнішніх джерел енергії. У такому випадку питомі витрати електроенергії E_{spec} зростають непропорційно до кількості видаленої вологи, що особливо критично для промислових режимів із великими витратами повітря та високою початковою вологістю. Це свідчить про структурну неузгодженість теплового балансу осушувальної установки, за якої енергетичні потоки не інтегровані в єдину замкнену систему.

З позицій системного аналізу відсутність утилізації теплоти означає, що осушувач функціонує як відкритий тепловий контур з одностороннім відведенням енергії, що принципово обмежує можливості підвищення коефіцієнта енергетичної ефективності. У таких умовах навіть оптимізація окремих компонентів установки, зокрема теплообмінників або компресійного обладнання, не дозволяє досягти суттєвого зниження загальних енерговитрат, оскільки основна частка втрат має системний характер. Запропонований у межах даного дослідження аналітичний підхід дозволяє інтерпретувати низьку ефективність традиційних схем осушення як наслідок відсутності керованого перерозподілу теплових потоків, що, своєю чергою, обґрунтовує необхідність інтеграції теплових насосів і рекуператорів теплоти як ключових елементів енергоефективної осушувальної системи.

Проведений аналіз особливостей процесів осушення повітря в промислових умовах показав, що ключовим чинником низької енергетичної ефективності традиційних осушувальних установок є не окремі технічні обмеження їх елементів, а структурна неузгодженість теплового балансу системи, зумовлена відсутністю утилізації теплових потоків, які супроводжують процес конденсації вологи. Розглянуті класифікації промислових осушувачів, аналіз енергетичних втрат, а також дослідження ролі явної та прихованої теплоти підтверджують, що сумарний тепловий потік Q_{tot} у традиційних схемах розсіюється без можливості повторного використання, що принципово обмежує потенціал підвищення енергоефективності. У цьому контексті теплові потоки доцільно розглядати як керований ресурс осушувальної системи, інтеграція якого в єдиний замкнений контур створює передумови для суттєвого зниження питомих енерговитрат. Отримані висновки формують теоретичне підґрунтя для подальшого розгляду принципів побудови промислових осушувачів з вбудованим тепловим насосом та рекуператором теплоти, що дозволяє перейти від аналітичного опису проблем до розроблення енергоефективних схем осушення повітря.

2. Принцип роботи осушувача з вбудованим тепловим насосом

Перехід від традиційних схем осушення повітря до енергоефективних рішень зумовлює необхідність використання теплового насоса як ключового елемента замкненого теплотехнічного контуру, що забезпечує утилізацію теплових потоків, які формуються в процесі конденсації вологи. У промислових осушувачах з вбудованим тепловим насосом процес видалення вологи поєднується з цілеспрямованим перерозподілом теплової енергії між елементами системи, що дозволяє мінімізувати втрати теплоти та знизити питомі витрати електричної енергії. На відміну від традиційних схем, у яких теплота конденсації та охолодженого повітря розсіюється у навколишньому середовищі, тепловий насос забезпечує повернення цієї енергії у повітряний потік або використання її для підтримання заданих температурних режимів осушення. Принцип роботи такого осушувача базується на використанні компресійного холодильного циклу, в межах якого випарник і конденсатор виконують функції теплообміну між повітряним середовищем і холодоагентом, формуючи замкнений контур перенесення теплоти. У результаті відбувається не лише інтенсифікація процесу осушення, але й оптимізація загального енергетичного балансу установки. Подальший розгляд структурної схеми осушувача, функцій його основних елементів, механізмів перерозподілу теплових потоків та впливу теплового насоса на енергетичні показники

системи дозволяє сформувати цілісне уявлення про принципи побудови енергоефективних промислових осушувальних установок. Структурна схема промислового осушувача з вбудованим тепловим насосом відображає інтеграцію процесів осушення повітря та утилізації теплової енергії в межах єдиного замкненого теплотехнічного контуру (рис. 2).

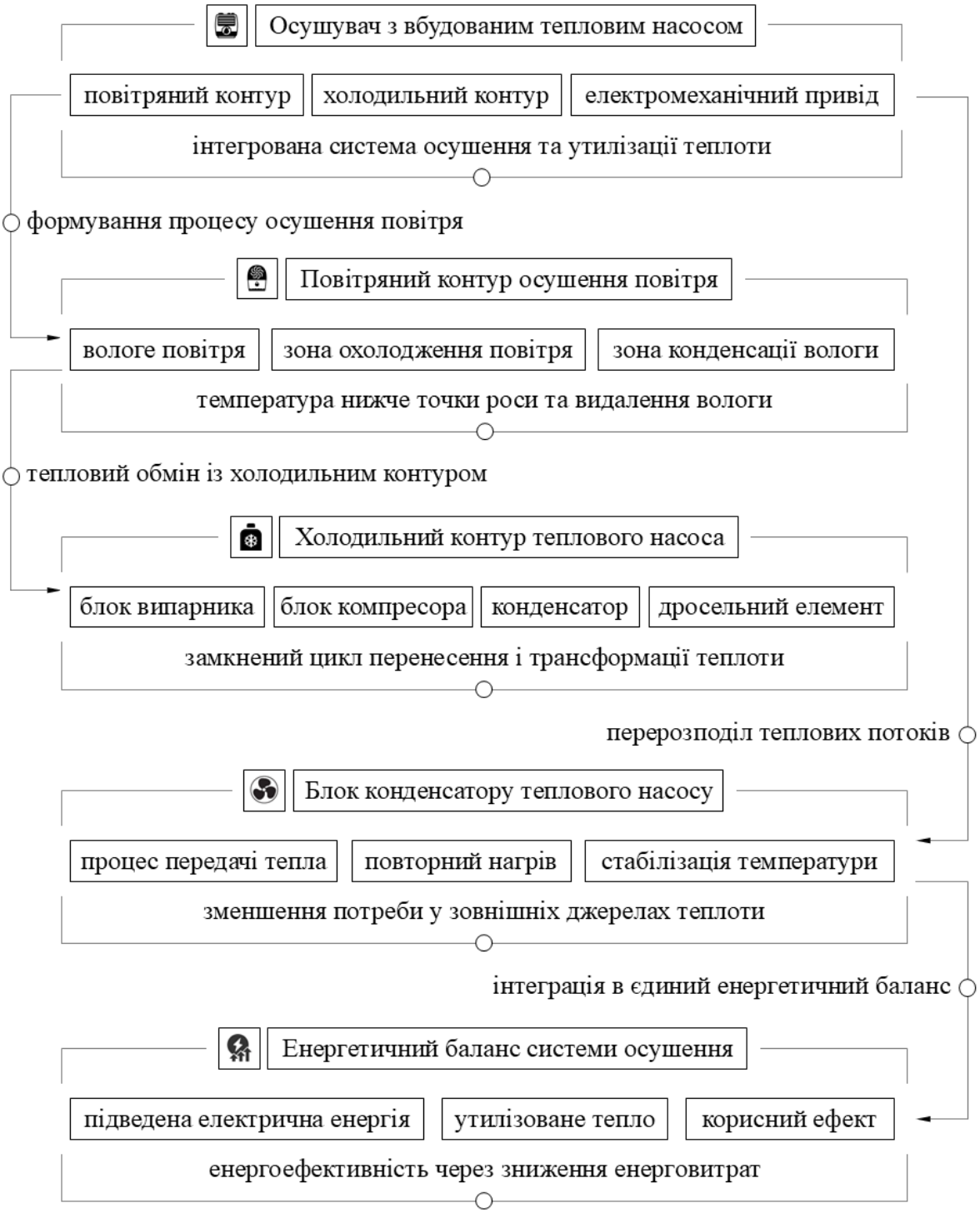


Рис. 2. Узагальнена структурна схема промислового осушувача з вбудованим тепловим насосом

На відміну від традиційних осушувальних установок, у яких контури охолодження та нагрівання повітря функціонують незалежно, у запропонованій схемі тепловий насос виконує роль системоутворювального елемента, що забезпечує керований перерозподіл теплових потоків між основними функціональними вузлами. Така структура дозволяє використовувати теплоту, що виділяється при конденсації вологи, для повторного нагрівання осушеного повітря або підтримання необхідних температурних режимів, що безпосередньо впливає на зниження питомих енерговитрат. Узагальнена структурна схема осушувача з тепловим насосом формує основу для подальшого аналізу функцій окремих елементів і оцінювання їх внеску в загальний енергетичний баланс системи. Випарник і конденсатор є ключовими теплообмінними елементами осушувача з вбудованим тепловим насосом, які забезпечують реалізацію процесів охолодження, конденсації вологи та повторного нагрівання повітря в межах замкненого холодильного циклу. Випарник виконує функцію відбору теплоти від вологого повітряного потоку, внаслідок чого температура повітря знижується нижче точки роси, що ініціює процес конденсації водяної пари. Тепловий потік, який передається у випарнику від повітря до холодоагенту, може бути поданий як:

$$Q_{\text{ev}} = \dot{m}_{\text{air}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{in}} - T_{\text{out}}) + \dot{m}_{\text{w}} \cdot h_{\text{v}}, \quad (3)$$

де Q_{ev} — теплота, відібрана у випарнику (Evaporator Heat Flow; EHF), а T_{in} і T_{out} — температури повітря до та після випарника (Inlet and Outlet Air Temperature; IOAT), відповідно.

Конденсатор виконує зворотну функцію — передачу теплоти від холодоагенту до осушеного повітряного потоку, забезпечуючи його повторний нагрів без залучення зовнішніх джерел енергії. Тепловий потік у конденсаторі визначається сумою теплоти, відібраної у випарнику, та електричної роботи компресора і може бути описаний як $Q_{\text{cond}} = Q_{\text{ev}} + W_{\text{el}}$, де W_{el} — електрична робота компресора (Compressor Electric Work; CEW). Таким чином, випарник і конденсатор формують функціонально взаємопов’язану пару елементів, які забезпечують керований перерозподіл теплових потоків у системі осушення повітря. Саме ця взаємодія створює передумови для підвищення коефіцієнта енергетичної ефективності теплового насоса та зниження питомих витрат енергії у промислових осушувальних установках.

Перерозподіл теплових потоків у замкненому контурі осушувача з вбудованим тепловим насосом є ключовим механізмом підвищення енергоефективності системи, оскільки забезпечує цілеспрямоване повернення теплоти, відібраної від повітряного потоку на етапі осушення, до процесу повторного нагрівання. У межах холодильного циклу теплові потоки формуються та трансформуються між випарником, компресором і конденсатором, утворюючи замкнену енергетичну структуру, в якій теплота не втрачається, а перерозподіляється відповідно до функціонального призначення елементів системи. Перерозподіл теплових потоків у контурі може бути інтерпретований як трансформація прихованої та явної теплоти, що супроводжує процес конденсації вологи, у керований тепловий ресурс. Зокрема, теплота конденсації, яка формується при фазовому переході водяної пари, разом із явною теплотою охолодженого повітря включається до сумарного потоку Q_{ev}, що надалі передається через холодильний контур до конденсатора. Такий підхід дозволяє зменшити або повністю усунути потребу у зовнішньому нагріванні осушеного повітря, що істотно впливає на зниження питомих енерговитрат системи. З позицій системного аналізу перерозподіл теплових потоків у замкненому контурі осушувача означає перехід від відкритої схеми з одностороннім відведенням енергії до інтегрованої теплотехнічної системи, в якій теплота розглядається як внутрішній ресурс. Саме така організація теплових потоків створює передумови для зростання коефіцієнта енергетичної ефективності та формує основу для подальшого аналізу впливу теплового насоса на загальний енергетичний баланс осушувальної установки.

Інтеграція теплового насоса в структуру промислового осушувача принципово змінює загальний енергетичний баланс системи, переводячи її з режиму відкритого теплового контуру з односторонніми втратами енергії у режим замкненої теплотехнічної системи з керованим перерозподілом теплових потоків. На відміну від традиційних схем осушення, у яких сумарна теплота Q_{tot}, що формується в процесі охолодження повітря та конденсації вологи, розсіюється у навколишньому середовищі, тепловий насос забезпечує повернення цієї енергії у повітряний контур у вигляді корисного теплового ефекту. У загальному вигляді енергетичний баланс осушувальної установки з тепловим насосом може бути поданий співвідношенням $Q_{\text{use}} = Q_{\text{ev}} + W_{\text{el}}$, де Q_{use} — корисна теплота, передана осушеному повітрю у конденсаторі (Useful Heat Output; UHO). З цього випливає, що сумарний тепловий ефект, реалізований у системі, перевищує безпосередні витрати електричної енергії, що є принциповою відмінністю теплового насоса від традиційних нагрівальних елементів.

Кількісна оцінка впливу теплового насоса на енергетичну ефективність осушувальної установки здійснюється за допомогою коефіцієнта перетворення$COP = Q_{\text{use}}/W_{\text{el}}$, який у випадку інтеграції теплового насоса в осушувальний контур залежить не лише від параметрів холодильного циклу, але й від характеристик повітряного потоку, початкової вологості та температурних режимів осушення. З урахуванням того, що теплота Q_{ev}формується за рахунок процесів, які у традиційних схемах вважаються втратами, зростання значення COPможе бути інтерпретоване як результат утилізації внутрішніх теплових ресурсів системи. З позицій узагальненого енергетичного аналізу вплив теплового насоса доцільно розглядати також через зміну питомих витрат електричної енергії на одиницю видаленої вологи. У цьому випадку величина $E_{\text{spec}} = W_{\text{el}}/m_{\text{w}}$. Інтеграція теплового насоса призводить до зменшення E_{spec} за рахунок виключення або істотного скорочення зовнішнього нагріву осушеного повітря та ефективнішого використання теплоти конденсації. Таким чином, тепловий насос виконує функцію ключового елемента оптимізації енергетичного балансу осушувальної установки, забезпечуючи перетворення внутрішніх теплових потоків у корисний тепловий ефект. Запропонований аналітичний підхід дозволяє розглядати енергоефективність осушення не лише як результат зниження електроспоживання, але як наслідок структурної перебудови теплового балансу системи, що створює науково-методичне підґрунтя для подальшого впровадження рекуперації теплоти та оптимізації режимів роботи промислових осушувачів повітря.

Таким чином, аналіз принципу роботи промислового осушувача з вбудованим тепловим насосом показав, що інтеграція випарника, компресора та конденсатора в межах замкненого холодильного контуру забезпечує керований перерозподіл теплових потоків, які формуються в процесі осушення повітря. На відміну від традиційних схем, де теплота конденсації та охолодженого повітря розсіюється у навколишньому середовищі, тепловий насос дозволяє трансформувати ці теплові потоки у корисний тепловий ефект, що безпосередньо використовується для повторного нагрівання осушеного повітря. Розглянуті функції випарника та конденсатора, а також аналітичний опис перерозподілу теплових потоків і впливу теплового насоса на загальний енергетичний баланс підтверджують, що основним чинником підвищення енергоефективності є структурна перебудова теплового контуру системи. Отримані висновки створюють теоретичне підґрунтя для подальшого аналізу ролі рекуператора теплоти та комплексної оцінки ефективності комбінованих осушувальних систем, що поєднують тепловий насос і рекуперацію в межах єдиної енергоефективної схеми.

3. Рекуперація теплоти як засіб підвищення енергоефективності

Подальше підвищення енергоефективності промислових осушувальних установок пов'язане з розширенням можливостей утилізації теплової енергії, що формується не лише в холодильному контурі теплового насоса, але й у повітряних потоках системи. Навіть за наявності теплового насоса частина теплоти може втрачатися разом із відпрацьованим повітрям, особливо в установках із великими витратами повітря та без рециркуляції. У цьому контексті рекуперація теплоти повітряних потоків виступає ефективним засобом додаткового зниження енергетичних втрат і оптимізації теплового балансу осушувальної системи. Рекуператори теплоти дозволяють передавати енергію від відпрацьованого повітряного потоку до припливного без безпосереднього змішування середовищ, що є принципово важливим для промислових систем осушення з жорсткими вимогами до чистоти та стабільності параметрів повітря. Інтеграція рекуператора в структуру осушувача з тепловим насосом створює багаторівневу систему утилізації теплоти, у якій теплові потоки перерозподіляються як у межах холодильного контуру, так і між повітряними потоками. Такий підхід дозволяє зменшити навантаження на компресійний контур теплового насоса, знизити споживання електричної енергії та забезпечити додаткове скорочення питомих енерговитрат на процес осушення повітря.

У системах осушення повітря рекуператори теплоти застосовуються для зменшення теплових втрат, пов'язаних із відведенням відпрацьованих повітряних потоків, та для попереднього підігріву припливного повітря без залучення додаткових джерел енергії. Залежно від конструктивного виконання, принципу теплопередачі та умов експлуатації, рекуператори, що використовуються у промислових осушувальних установках, можуть бути класифіковані таким чином:

1. **Пластинчасті рекуператори**, в яких теплота передається через нерухомі теплообмінні поверхні між припливним і витяжним повітряними потоками. Такі рекуператори характеризуються простотою конструкції, відсутністю рухомих частин та високою надійністю, що робить їх доцільними для систем осушення з жорсткими вимогами до герметичності потоків. Водночас їх ефективність істотно залежить від температурного напору та не забезпечує перенесення вологи між потоками.

2. **Роторні рекуператори**, в яких теплообмін здійснюється за рахунок обертання теплоакумулюючого ротора, що поперемінно контактує з припливним і витяжним повітрям. Основною перевагою таких рекуператорів є висока ефективність теплопередачі та можливість часткового перенесення вологи, що може бути корисним у певних режимах осушення. Недоліками є наявність рухомих елементів, підвищені вимоги до обслуговування та потенційний ризик перетікання повітря між потоками.

3. **Трубчасті рекуператори**, в яких передача теплоти здійснюється через систему труб або каналів, що розділяють повітряні потоки. Такі рекуператори забезпечують добру механічну міцність і можуть працювати в умовах підвищених температур або агресивного середовища, однак зазвичай мають більші габарити та меншу питому ефективність порівняно з пластинчастими та роторними конструкціями.

4. **Рекуператори з проміжним теплоносієм**, у яких теплота від витяжного повітря передається припливному через додатковий теплообмінний контур із рідким або газоподібним теплоносієм. Такий підхід дозволяє гнучко інтегрувати рекуперацію теплоти в складні системи осушення, зокрема за значних просторових відстаней між повітряними каналами, однак супроводжується додатковими енергетичними втратами на циркуляцію теплоносія.

5. **Комбіновані рекупераційні системи**, що поєднують різні принципи теплопередачі або інтегруються безпосередньо з тепловим насосом. Такі рішення дозволяють максимально використовувати тепловий потенціал відпрацьованих повітряних потоків і забезпечують підвищену гнучкість у виборі режимів роботи осушувальної установки.

Принцип повернення теплоти повітряних потоків у системах осушення полягає у передачі теплової енергії від відпрацьованого (витяжного) повітря до припливного без їх безпосереднього змішування, що дозволяє зменшити теплові втрати та попередньо підігріти повітря, яке надходить у зону осушення. У промислових осушувальних установках рекуперація теплоти реалізується за рахунок теплообміну між двома повітряними потоками з різними термодинамічними параметрами, при цьому ключову роль відіграє різниця температур і масових витрат повітря. У загальному вигляді тепловий потік, що повертається рекуператором, може бути описаний співвідношенням:

$$Q_{\text{rec}} = \varepsilon_{\text{rec}} \cdot \dot{m}_{\text{air}} \cdot c_p \cdot \left(T_{\text{exh}} - T_{\text{sup}}\right), \quad (4)$$

де Q_{rec} – кількість рекуперованої теплоти (Recovered Heat Flow; RHF), ε_{rec} – коефіцієнт ефективності рекуператора (Heat Recovery Effectiveness; HRE), , T_{exh} і T_{sup} – температури витяжного та припливного повітря відповідно (Exhaust and Supply Air Temperatures; ESAT). Повернення теплоти призводить до підвищення температури припливного повітря на вході в осушувальну установку, що зменшує необхідний тепловий напір у подальших теплообмінних процесах. З енергетичної точки зору це означає зниження теплового навантаження на випарник і конденсатор теплового насоса, а також скорочення електричної роботи компресора. У цьому контексті рекуперована теплота Q_{rec}може розглядатися як додатковий внутрішній тепловий ресурс системи, який доповнює теплові потоки холодильного контуру.

Аналітично вплив рекуперації на загальний тепловий баланс осушувальної установки може бути врахований шляхом модифікації балансового співвідношення:

$$Q_{\text{use}} = Q_{\text{ev}} + Q_{\text{rec}} + W_{\text{el}}. \quad (5)$$

Таке представлення підкреслює, що рекуператор не створює теплоти, а перерозподіляє вже наявні теплові потоки, зменшуючи потребу в електричній енергії для досягнення заданих параметрів осушення. Таким чином, принцип повернення теплоти повітряних потоків полягає у включенні витяжного повітря до енергетичного контуру системи осушення як джерела низькопотенційної теплоти. Поєднання рекуперації з тепловим насосом дозволяє перейти від локальної утилізації теплоти до комплексної оптимізації теплового балансу, що створює передумови для суттєвого зменшення питомих витрат електричної енергії в промислових осушувальних установках.

Інтеграція рекуператора теплоти з тепловим насосом у структурі промислового осушувача дозволяє сформувати багаторівневу систему утилізації теплової енергії, у якій перерозподіл теплових потоків здійснюється як між повітряними потоками, так і в межах холодильного контуру. На відміну від ізольованого застосування рекуператора або теплового насоса, їх поєднання забезпечує комплексне використання теплового потенціалу відпрацьованого повітря та теплоти конденсації вологи, що принципово змінює енергетичний баланс осушувальної установки. У такій конфігурації рекуператор виконує функцію попереднього підігріву припливного повітря за рахунок теплоти витяжного потоку, зменшуючи температурний напір, необхідний для досягнення заданих параметрів осушення. Це, своєю чергою, знижує теплове навантаження на випарник і конденсатор теплового насоса та приводить до зменшення електричної роботи компресора. Аналітично сумарний корисний тепловий ефект у системі з інтегрованою рекуперацією може бути поданий у вигляді $Q_{\text{use}} = Q_{\text{ev}} + Q_{\text{rec}} + W_{\text{el}}$. З позицій системного аналізу інтеграція рекуператора з тепловим насосом приводить до перерозподілу ролей між елементами системи: рекуператор забезпечує пасивну утилізацію теплоти повітряних потоків, тоді як

тепловий насос здійснює активну трансформацію низькопотенційної теплоти у корисний тепловий ефект із залученням електричної енергії. Така взаємодія дозволяє змістити робочі режими теплового насоса у зону підвищених значень коефіцієнта перетворення COP, оскільки зменшується необхідна різниця температур між випарником і конденсатором. Інтегрована схема також забезпечує більшу стабільність роботи осушувальної установки за змінних умов експлуатації, зокрема при коливаннях температури та вологості припливного повітря. Рекуператор частково компенсує ці коливання, знижуючи динамічне навантаження на тепловий насос і підвищуючи загальну енергетичну ефективність системи. У результаті інтеграція рекуператора з тепловим насосом формує синергетичний ефект, за якого сумарне скорочення енерговитрат перевищує ефект від застосування кожного з елементів окремо, що підтверджує доцільність комбінованого підходу до побудови енергоефективних промислових осушувальних установок.

Зменшення питомих витрат електроенергії є одним із ключових критеріїв оцінювання ефективності промислових осушувальних установок, оскільки безпосередньо характеризує енерговитрати на видалення одиниці вологи з повітряного середовища. У традиційних схемах осушення питомі витрати електричної енергії визначаються необхідністю одночасного охолодження повітря до температури нижче точки роси та його подальшого нагрівання із залученням зовнішніх джерел енергії, що призводить до значних втрат і низької загальної енергоефективності. Для традиційних осушувачів величина W_{el}включає енерговитрати на охолодження, повторний нагрів повітря та допоміжні системи, що обумовлює високі значення E_{spec}. Використання теплового насоса приводить до скорочення питомих витрат електроенергії за рахунок повернення теплоти конденсації та теплоти охолодженого повітря у повітряний контур. Додаткове впровадження рекуператора теплоти забезпечує подальше зменшення W_{el}шляхом попереднього підігріву припливного повітря та зниження теплового навантаження на компресійний контур. З урахуванням рекуперованої теплоти питомі витрати електроенергії можуть бути представлені у вигляді:

$$E^{*}_{\mathrm{spec}} = (W_{\mathrm{el}} - W_{\mathrm{rec}})/m_{\mathrm{w}}. \quad (6)$$

Така форма запису дозволяє кількісно оцінити внесок рекуператора у зниження загальних енерговитрат. Аналіз показує, що максимальний ефект зменшення питомих витрат електроенергії досягається при комплексній інтеграції теплового насоса і рекуператора, за якої рекуперація знижує базове теплове навантаження системи, а тепловий насос забезпечує ефективну трансформацію залишкових теплових потоків у корисний тепловий ефект. У результаті значення E^{*}_{spec}може бути істотно зменшено порівняно з традиційними схемами осушення, що підтверджує доцільність застосування комбінованих енергоефективних рішень у промислових осушувальних установках.

Таким чином, проведений аналіз рекуперації теплоти як складової енергоефективних осушувальних систем показав, що повернення теплової енергії повітряних потоків дозволяє суттєво зменшити теплові та енергетичні втрати, притаманні традиційним схемам осушення. Розглянуті типи рекуператорів і принципи їх роботи підтверджують доцільність використання рекуперації як пасивного засобу утилізації низькопотенційної теплоти, особливо у системах із великими витратами повітря та обмеженими можливостями рециркуляції. Інтеграція рекуператора з тепловим насосом формує синергетичний ефект, за якого теплота, що повертається з витяжного повітря, знижує навантаження на компресійний контур, а тепловий насос забезпечує ефективну трансформацію залишкових теплових потоків у корисний тепловий ефект. Отримані аналітичні співвідношення для питомих витрат електроенергії свідчать, що комплексне застосування теплового насоса та рекуперації теплоти дозволяє істотно зменшити енергоспоживання осушуваль-

них установок. Зазначені результати створюють науково-методичне підґрунтя для подальшої кількісної оцінки ефективності різних схем осушення та формування рекомендацій щодо вибору оптимальної конфігурації промислових осушувачів повітря.

Висновки. У статті розглянуто науково-технічну задачу підвищення енергоефективності процесів осушення повітря в промислових осушувальних установках з вбудованим тепловим насосом та рекуператором теплоти, що функціонують у складі систем опалення, вентиляції та кондиціювання повітря. Дослідження виконано на основі системного аналізу тепломасообмінних процесів, які супроводжують конденсаційне осушення повітря, з акцентом на виявлення причин енергетичних втрат і формування узагальненого підходу до їх мінімізації за рахунок керованого перерозподілу теплових потоків у межах осушувальної установки. У результаті проведеного дослідження отримано такі основні результати:

1. Проаналізовано особливості процесів осушення повітря в промислових умовах та показано, що низька енергетична ефективність традиційних осушувальних схем зумовлена структурною неузгодженістю теплового балансу та відсутністю утилізації теплоти конденсації і охолодженого повітря.

2. Обґрунтовано доцільність використання теплового насоса як системоутворювального елемента осушувальної установки, що забезпечує замкнений перерозподіл теплових потоків і дозволяє трансформувати внутрішні теплові ресурси системи у корисний тепловий ефект.

3. Розроблено аналітичний опис функцій випарника та конденсатора в складі осушувача з тепловим насосом, а також показано їх роль у формуванні загального енергетичного балансу системи осушення.

4. Показано, що застосування рекуперації теплоти повітряних потоків дозволяє зменшити теплові втрати, пов’язані з відведенням відпрацьованого повітря та знизити навантаження на компресійний контур теплового насоса.

5. Встановлено, що інтеграція рекуператора з тепловим насосом формує синергетичний ефект, який проявляється у зменшенні питомих витрат електричної енергії та підвищенні загальної енергоефективності промислових осушувальних установок.

Отримані результати мають узагальнений характер і можуть бути використані як науково-методична основа для проєктування, модернізації та оптимізації енергоефективних систем осушення повітря в складі промислових систем HVAC. Подальші дослідження доцільно спрямувати на кількісну оцінку енергетичних показників запропонованих схем у різних режимах експлуатації та експериментальну верифікацію отриманих аналітичних результатів, що створює підґрунтя для їх практичного впровадження.

Список використаних джерел

1. Huang, Y., & Niu, J. L. (2016). A review of the advance of HVAC technologies as witnessed in ENB publications in the period from 1987 to 2014. *Energy and Buildings, 130*, 33–45. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.036.

2. Xie, M., Chen, E., Huang, G., Jia, T., & Dai, Y. (2025). Recent advancements in deep dehumidification technology: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *211*, 115321. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115321.

3. Mazzei, P., Minichiello, F., & Palma, D. (2005). HVAC dehumidification systems for thermal comfort: A critical review. *Applied Thermal Engineering*, *25*(5-6), 677–707. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.07.014.

4. Liu, H., Huang, Y., Tian, S., Huang, L., Li, S., Wang, Q., & Su, X. (2025). Operational performance of heat pump desiccant wheel system in low humidity industrial environment: On-site measurements and model-based optimization. *Energy, 322*, 135543. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135543.

5. Mei, L., & Dai, Y. J. (2008). A technical review on use of liquid-desiccant dehumidification for air-conditioning application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12*(3), 662–689. https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.006.

6. Halawa, E., & Bruno, F. (2023). Energy performance and thermal comfort delivery capabilities of solid-desiccant rotor-based air-conditioning for warm to hot and humid climates — A critical review. *Energies, 16*(16), 6032. https://doi.org/10.3390/en16166032.

7. Zhao, Y., & Yu, J. (2023). Thermodynamic analysis of a modified vapor-injection heat pump cycle using an ejector. *International Journal of Refrigeration, 145*, 137–147. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.09.011.

8. Vieren, E., Demeester, T., Beyne, W., Arteconi, A., De Paepe, M., & Lecompte, S. (2023). The thermodynamic potential of high-temperature transcritical heat pump cycles for industrial processes with large temperature glides. *Applied Thermal Engineering, 234*, 121197. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121197.

9. Sarkar, J. (2012). Ejector enhanced vapor compression refrigeration and heat pump systems – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(9), 6647–6659. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.08.007.

10. Zmrhal, V. (2023). The energy saving potential of a rotary heat exchanger with bypass dampers. *Energy and Buildings, 285,* 112934. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112934.

11. Cuce, P. M., & Riffat, S. (2015). A comprehensive review of heat recovery systems for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 47*, 665–682. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.087.

12. Zender-Świercz, E. (2021). A review of heat recovery in ventilation. *Energies, 14*(6), 1759. https://doi.org/10.3390/en14061759.

13. Zhang, L., & Zhang, Y.-F. (2014). Research on energy saving potential for dedicated ventilation systems based on Heat Recovery Technology. *Energies, 7*(7), 4261–4280. https://doi.org/10.3390/en7074261.

14. Liu, S., Ma, G., Lv, Y., & Xu, S. (2024). Review on heat pump energy recovery technologies and their integrated systems for building ventilation. *Building and Environment, 248*, 111067. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111067

15. Zhang, L. Z. (2005). Energy performance of independent air dehumidification systems with energy recovery measures. *Energy, 31*(8), 1228–1242. https://doi.org/10.1016/j.energy. 2005.05.027

16. Qi, R., & Zhao, X. (2020). A review of liquid desiccant air dehumidification. *Energy, 200*, 117525. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109897

17. Venegas, T., Zambrano, H., & Castro, R. (2023). Review of liquid desiccant air dehumidification systems coupled with heat pump system configurations, component design and performance. *Energy Reports, 9*, 317–329.

18. Shamim, J. A., Hsu, W.-L., Paul, S., Yu, L., & Daiguji, H. (2021). A review of solid desiccant dehumidifiers: Current status and near-term development goals in the context of net zero energy buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 137*, 110456. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110456.

19. Xue, D., Liu, J., Song, Y., & Zhang, X. (2023). Performance analysis of a hybrid dehumidification system adapted for suspension bridge corrosion protection: A numerical study. *Applied Sciences, 13*(7), 4219. https://doi.org/10.3390/app13074219.

20. Alghamdi, F., & Krarti, M. (2025). Review analysis for the energy performance of integrated air-conditioning systems. *Energies, 18*(7), 1611. https://doi.org/10.3390/en18071611.

References

1. Huang, Y., & Niu, J. L. (2016). A review of the advance of HVAC technologies as witnessed in ENB publications in the period from 1987 to 2014. *Energy and Buildings, 130*, 33–45. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.036.

2. Xie, M., Chen, E., Huang, G., Jia, T., & Dai, Y. (2025). Recent advancements in deep dehumidification technology: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *211*, 115321. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115321.

3. Mazzei, P., Minichiello, F., & Palma, D. (2005). HVAC dehumidification systems for thermal comfort: A critical review. *Applied Thermal Engineering*, *25*(5-6), 677–707. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.07.014.

4. Liu, H., Huang, Y., Tian, S., Huang, L., Li, S., Wang, Q., & Su, X. (2025). Operational performance of heat pump desiccant wheel system in low humidity industrial environment: On-site measurements and model-based optimization. *Energy, 322*, 135543. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135543.

5. Mei, L., & Dai, Y. J. (2008). A technical review on use of liquid-desiccant dehumidification for air-conditioning application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12*(3), 662–689. https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.006.

6. Halawa, E., & Bruno, F. (2023). Energy performance and thermal comfort delivery capabilities of solid-desiccant rotor-based air-conditioning for warm to hot and humid climates — A critical review. *Energies, 16*(16), 6032. https://doi.org/10.3390/en16166032.

7. Zhao, Y., & Yu, J. (2023). Thermodynamic analysis of a modified vapor-injection heat pump cycle using an ejector. *International Journal of Refrigeration, 145*, 137–147. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.09.011.

21. Vieren, E., Demeester, T., Beyne, W., Arteconi, A., De Paepe, M., & Lecompte, S. (2023). The thermodynamic potential of high-temperature transcritical heat pump cycles for industrial processes with large temperature glides. *Applied Thermal Engineering, 234*, 121197. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121197.

22. Sarkar, J. (2012). Ejector enhanced vapor compression refrigeration and heat pump systems – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(9), 6647–6659. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.08.007.

23. Zmrhal, V. (2023). The energy saving potential of a rotary heat exchanger with bypass dampers. *Energy and Buildings, 285,* 112934. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112934.

24. Cuce, P. M., & Riffat, S. (2015). A comprehensive review of heat recovery systems for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 47*, 665–682. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.087.

25. Zender-Świercz, E. (2021). A review of heat recovery in ventilation. *Energies, 14*(6), 1759. https://doi.org/10.3390/en14061759.

26. Zhang, L., & Zhang, Y.-F. (2014). Research on energy saving potential for dedicated ventilation systems based on Heat Recovery Technology. *Energies, 7*(7), 4261–4280. https://doi.org/10.3390/en7074261.

27. Liu, S., Ma, G., Lv, Y., & Xu, S. (2024). Review on heat pump energy recovery technologies and their integrated systems for building ventilation. *Building and Environment, 248*, 111067. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111067

28. Zhang, L. Z. (2005). Energy performance of independent air dehumidification systems with energy recovery measures. *Energy, 31*(8), 1228–1242. https://doi.org/10.1016/j.energy. 2005.05.027

29. Qi, R., & Zhao, X. (2020). A review of liquid desiccant air dehumidification. *Energy, 200*, 117525. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109897

30. Venegas, T., Zambrano, H., & Castro, R. (2023). Review of liquid desiccant air dehumidification systems coupled with heat pump system configurations, component design and performance. *Energy Reports, 9*, 317–329.

31. Shamim, J. A., Hsu, W.-L., Paul, S., Yu, L., & Daiguji, H. (2021). A review of solid desiccant dehumidifiers: Current status and near-term development goals in the context of net zero energy buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 137*, 110456. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110456.

32. Xue, D., Liu, J., Song, Y., & Zhang, X. (2023). Performance analysis of a hybrid dehumidification system adapted for suspension bridge corrosion protection: A numerical study. *Applied Sciences, 13*(7), 4219. https://doi.org/10.3390/app13074219.

33. Alghamdi, F., & Krarti, M. (2025). Review analysis for the energy performance of integrated air-conditioning systems. *Energies, 18*(7), 1611. https://doi.org/10.3390/en18071611.

Дата першого надходження статті до видання: 01.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.03.2026

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

UDC 697.94:621.577

Mykola Bandurkyn[1], Volodymyr Makarov[2], Petro Siniaiev[3]

[1]Third-year PhD student of group DFB-3, specialty: 192 "Construction and Civil Engineering"
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture (Odessa, Ukraine)
E-mail: bandurkinn@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0000-3354-2445

[2]Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture (Odessa, Ukraine)
E-mail: volmak.03@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-9265-4663

[3]3rd year postgraduate student of group DFB-3 in specialty 192 "Construction and Civil Engineering"
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture (Odessa, Ukraine)
E-mail: petersinyaev@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0007-9127-2456

ENERGY EFFICIENCY OF INDUSTRIAL DEHUMIDIFIERS WITH A HEAT PUMP AND HEAT RECOVERY UNIT: DESIGN PRINCIPLES AND PERFORMANCE ASSESSMENT

The article addresses a scientific and applied problem of improving the energy efficiency of industrial air dehumidifiers equipped with an integrated heat pump and a heat recovery unit, which operate within ventilation, air conditioning, and technological air treatment systems in energy-intensive industrial processes. A systematic analysis of the physical fundamentals of air dehumidification by moisture condensation is carried out, with particular attention to heat and mass transfer between the air stream and the refrigerant, as well as to the key factors responsible for increased specific energy consumption in conventional dehumidification schemes. It is shown that a significant portion of the supplied energy in such systems is lost with the exhaust air streams, which substantiates the feasibility of implementing heat utilization and recovery technologies. The operating principles of the heat pump within the dehumidifier circuit are analyzed, and the features of heat flow redistribution between the evaporator and the condenser are considered with regard to variable operating conditions, inlet air humidity, and temperature. The efficiency of integrating a heat recovery unit into the air channels of the dehumidification system is substantiated as a means of reusing low-grade thermal energy, which reduces the load on the compressor circuit of the heat pump and increases the overall energy efficiency of the installation. A generalized structural and functional scheme of an industrial dehumidifier combining a heat pump and a heat recovery unit is proposed, providing optimization of the system heat balance, stabilization of air parameters, and reduction of specific electric power consumption. Within the study, an approach to the quantitative assessment of the energy efficiency of the dehumidification system is formulated based on a set of generalized indicators, including specific electric energy consumption per unit mass of removed moisture, the coefficient of performance of the heat pump, and the reduction in thermal and energy losses compared with baseline dehumidification schemes. A comparative analysis of a conventional dehumidifier configuration and an energy-efficient scheme with heat recovery is performed, allowing the impact of integrating a heat pump and a heat recovery unit on overall energy performance and dehumidification efficiency to be evaluated. The obtained results confirm the feasibility and effectiveness of applying the proposed technical and structural solutions in industrial dehumidification systems of various functional purposes.

Keywords*: industrial dehumidifier; heat pump; heat recovery; energy efficiency; air dehumidification; heat and mass transfer; coefficient of performance.*

Fig.: 2. References: 20.

Бандуркин М. С., Макаров В. О., Сіняєв П. Г. Енергетична ефективність промислових осушувачів з тепловим насосом та рекуператором: принципи побудови та оцінка показників. *Технічні науки та технології*. 2026. № 2(44). С. 568-583. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-568-583.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-584-599
УДК 004.89; 621.3; 351/354; 658

Олександр Миколайович Васильєв[1], Сергій Сергійович Зубенко[2]

[1]аспірант 2 року навчання, спеціальність 193 – Геодезія та землеустрій
Київський національний університет імені Тараса Шевченка ННІ «Інститут геології» (Київ, Україна)
E-mail: vasilyeva455@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0009-2177-7859

[2]магістр 2 року навчання, спеціальність 103 – Науки про Землю.
Київський національний університет імені Тараса Шевченка ННІ «Інститут геології» (Київ, Україна)
E-mail: szubnko02@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0008-1166-4693

ТЕХНОЛОГІЇ BIG DATA В ПРОГНОЗУВАННІ ГЕНЕРАЦІЇ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

У дослідженні розглянуто можливості застосування технологій Big Data для прогнозування генерації сонячної електроенергії. Проаналізовано особливості часових рядів виробництва електроенергії з відновлюваних джерел та вплив природно-кліматичних чинників на змінність генерації. Для дослідження використано відкритий набір даних Open Power System Data, що містить погодинні показники виробництва енергії. Проведено попередню обробку та статистичний аналіз даних, виконано декомпозицію часових рядів і побудовано алгоритм прогнозування.. Отримані результати підтверджують ефективність використання методів аналізу великих масивів даних для підвищення точності прогнозування генерації сонячної енергії та підтримки управлінських рішень у сфері енергетики.

Ключові слова: *великі дані, Big Date, оптимізація виробництва сонячної енергії, прогнозування.*
Табл.: 1. Рис.: 14. Бібл.: 20.

Актуальність теми дослідження. Розвиток відновлюваної енергетики є одним із ключових напрямів забезпечення сталого розвитку та енергетичної безпеки. Водночас сонячна генерація характеризуються високою часовою, добовою, сезонною мінливістю, що ускладнює процеси прогнозування й управління енергосистемами**.** Існуючі методи прогнозування мають певні обмеження і не завжди забезпечують достатню точність особливо в умовах динамічних змін навколишнього середовища і його погодних умов. Тому актуальним науково-практичним завданням є розробка нових підходів, заснованих на технологіях великих даних для підвищення ефективності прогнозування та оптимізації виробництва сонячної енергії, дослідження часових закономірностей виробництва електроенергії з ВДЕ.

Зростання попиту на ВДЕ та інтеграція сонячної енергетики в сучасні енергетичні системи зумовлюють потребу в точному прогнозуванні генерації електроенергії для забезпечення надійності та стабільності мережі. Точні прогнози сонячної генерації дозволяють ефективніше балансувати попит і пропозицію, зменшувати витрати на резервні потужності та підвищувати загальну енергоефективність енергосистеми. Попередні дослідження засвідчили, що використання машинного та глибокого навчання, метеорологічних даних для аналізу часових рядів генерації дозволяє зменшити небаланси та підвищити економічну ефективність роботи систем, сприяє підвищенню точності коротко- та довгострокових прогнозів виробництва сонячної електроенергії.

Сонячні електростанції характеризуються високою змінністю виробництва, що залежить від погодних умов, часу доби та сезонних коливань сонячної радіації. Ця мінливість ускладнює планування режимів роботи енергосистеми та потребує впровадження ефективних методів прогнозування генерації для зменшення небалансів.

Використання високоточних метеопрогнозів, супутникових даних і алгоритмів машинного навчання дозволяє підвищити надійність оцінок виробітку сонячних електростанцій у коротко- та довгостроковій перспективі.

Сонячні електростанції характеризуються високою змінністю виробництва, що залежить від погодних умов, часу доби та сезонних коливань сонячної радіації. Недостатньо точні прогнози генерації ускладнюють балансування енергосистеми та підвищують ризики нестачі або надлишку електроенергії.

Застосування технологій Big Data дозволяє обробляти великі обсяги даних з різних джерел – метеорологічні показники, дані супутникового моніторингу, історичні дані ро-

© О. М. Васильєв, С. С. Зубенко, 2026

боти панелей – та використовувати їх для створення високоточних моделей прогнозування. Це підвищує ефективність планування виробництва, оптимізує роботу енергосистеми та сприяє інтеграції відновлюваних джерел енергії у національні мережі.

Таким чином, дослідження методів аналізу великих даних для прогнозування генерації сонячної енергії є актуальним з погляду забезпечення енергетичної безпеки, економічної ефективності та сталого розвитку енергетики.

Дані та методи дослідження. У дослідженні використано відкриті набори даних платформи Open Power System Data (Німеччина), що містять детальні часові ряди виробництва електроенергії з відновлюваних джерел, зокрема сонячної та вітрової генерації. Дані представлені з високою часовою розрізненістю (погодинні та субпогодинні інтервали), що дозволяє виконувати аналіз короткострокових коливань і сезонних закономірностей генерації. Використані дані базуються на офіційній статистиці операторів енергосистем і ринку електроенергії Німеччини, що забезпечує їхню достовірність, повноту та придатність для наукових досліджень.

Методологія дослідження включає статистичний аналіз, декомпозицію часових рядів і виявлення трендових та сезонних компонент. Окремо аналізується вплив метеорологічних факторів на коливання обсягів генерації**.**

Аналіз сучасних досліджень і публікацій. За останні роки інтерес до застосування технологій Big Data у сфері відновлюваної енергетики, зокрема сонячної, значно зріс. Велика кількість досліджень присвячена методам збору, обробки та аналізу великих обсягів даних для точного прогнозування генерації електроенергії та оптимізації роботи енергетичних систем.

Підходи машинного навчання та штучного інтелекту для прогнозування генерації сонячної енергії представлені в працях [1, 2] і свідчать, що використання алгоритмів нейронних мереж, регресійного аналізу та методів ансамблевого навчання дозволяє підвищити точність прогнозів у порівнянні з традиційними статистичними методами.

Дослідження представлені в працях [3, 4] демонструють ефективність інтеграції даних супутникового спостереження та метеорологічних показників для побудови моделей прогнозування, що враховують сезонні та добові коливання сонячної радіації. Такі підходи дозволяють отримувати прогнози з короткостроковою (години) та середньостроковою (дні) точністю, що є критично важливим для управління енергосистемою.

У працях [5, 6] підкреслюється важливість великих даних та технологій IoT для моніторингу стану сонячних панелей у реальному часі. Це дозволяє відстежувати деградацію модулів, втрати ефективності та адаптувати прогнозні моделі відповідно до фактичних умов.

Водночас сучасні дослідження [7] вказують на наявні обмеження: потребу у великих обчислювальних потужностях, складність інтеграції даних з різних джерел та необхідність корекції моделей під локальні кліматичні умови.

Таким чином, аналіз наукових публікацій показує, що технології Big Data є перспективним інструментом для прогнозування генерації сонячної енергії, проте потребують комплексного підходу, що включає обробку великих обсягів даних, застосування сучасних алгоритмів машинного навчання та адаптацію моделей до специфіки конкретної енергетичної системи.

У праці [8] досліджено ринкові механізми стимулювання розвитку систем накопичення енергії в Україні, зосереджено увагу на аналізі регуляторного середовища, моделей державної підтримки та економічних інструментів, що можуть забезпечити інтеграцію накопичувачів енергії в енергетичний ринок. Розглянуто можливості впровадження стимулюючих тарифів, участі систем накопичення в ринку допоміжних послуг, а також перспективи створення конкурентних умов для інвестування в технології зберігання електроенергії.

Можливості підвищення енергонезалежність територіальних громад, розглянуто в праці [9]. Питання енергоефективності та енергозалежності в Україні розглянуто в праці [10]. Перетворення енергії різних видів відновлюваних джерел – вітрової, сонячної та геотермальної енергії, енергії малих річок і біомаси – на електричну й теплову енергію розглянуто в праці [11].

Огляд методів машинного навчання для прогнозування фотоелектричної енергії представлено в праці [12]. В праці [13] показано, що попри швидке зростання енергії з ВДЕ, його мінливий характер ускладнює його прогнозування.

Таким чином, проведений аналіз літературних джерел свідчить, що проблема ефективного використання сонячної енергетики і ВДЕ загалом, їх прогнозування шляхом застосування сучасних технологій аналізу великих даних є вкрай актуальною задачею.

Мета дослідження – оцінка ефективності використання технологій Big Data для підвищення точності прогнозування виробництва сонячної енергії та обґрунтування їх ролі в забезпеченні стабільності й адаптивності сучасних енергетичних систем.

Наукова новизна дослідження полягає у комплексному підході до інтеграції технічних, метеорологічних і споживчих даних у межах єдиного аналітичного середовища big data для прогнозування генерації сонячної енергії, що дає змогу підвищити точність прогнозів та обґрунтувати управлінські рішення в енергетичному секторі.

Завдання дослідження: аналіз можливості застосування Big Data в енергетичному секторі; інформаційної інфраструктури збору та збереження енергетичних даних; реалізація аналізу даних OPSD Germany в середовищі Jupyter Notebook.

Виклад основного матеріалу. Технології Big Data відіграють ключову роль у сьогоднішній трансформації енергетичного сектору, зокрема у сфері альтернативної енергетики, де виникає потреба в аналізі величезних обсягів гетерогенних даних із різних джерел. Це пов’язано з тим, що специфіка надання послуг енергозабезпечення, обсягів споживання та виробництва енергії, стану обладнання, режимів роботи ліній електропередачі, прогнозування погодних умов тощо передбачає необхідність обробки великих масивів даних в режимі реального часу.

Альтернативна енергетика охоплює системи генерації з відновлюваних джерел – сонячної, вітрової, гідро-, геотермальної та біоенергетики. Ці системи характеризуються високою варіабельністю виробництва, залежністю від погодних і кліматичних умов, а також необхідністю збалансування між генерацією, зберіганням та споживанням енергії в реальному часі. Тому саме технології Big Data стають центральним елементом аналітичної інфраструктури, здатним забезпечити інтеграцію, обробку та прогнозування на основі багатовимірних і високочастотних даних.

Серед напрямків реального застосування технологій Big Data в енергетиці можна відзначити: взаємодію з клієнтами, управління та інтелектуалізацію мереж, створення мікромереж, віртуальних станцій, нових бізнес-моделей на ринку, торгівля електроенергією, її акумулювання та виявлення крадіжок, прогнозування режимів роботи інфраструктури та планування її розвитку, підвищення рівня кібербезпеки енергосистем, управління виробничими процесами тощо.

Великі дані (Big Data) сьогодні відіграють ключову роль у розвитку енергетичних систем нового покоління, особливо у сфері ВДЕ. Їх використання дозволяє оптимізувати прогнозування генерації, управління навантаженнями, балансування мережі та зменшення втрат енергії.

Основними джерелами енергетичних даних виступають: міжнародні організації, такі як МЕА, ООН або Світовий банк, які надають узагальнені та порівняльні енергетичні дані між країнами; енергетичні компанії та оператори мереж, які надають дані про видо-

буток, генерацію, передачу і розподіл енергії; наукові установи та університети, які публікують аналітичні та експериментальні енергетичні дані у звітах і наукових статтях; відкриті онлайн-платформи та бази відкритих даних, які забезпечують доступ до енергетичної статистики в цифровому форматі; сенсорні мережі, метеостанції, супутникові системи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), смартлічильники, енергетичні біржі та хмарні платформи моніторингу тощо. Кожен із цих елементів генерує потоки інформації у різних форматах (часові ряди, геопросторові зображення, телеметричні сигнали), що потребують інтеграції в єдину базу даних для подальшої аналітики. Використання хмарних обчислень (AWS, Google Cloud, Azure) у поєднанні з розподіленими системами збереження, такими як Hadoop, Spark та Cassandra, дає змогу виконувати масштабні обчислення з терабайтними наборами даних. У контексті альтернативної енергетики це дозволяє створювати реалістичні цифрові моделі енергосистеми, здатні реагувати на зміни зовнішніх умов у режимі реального часу.

Аналітична обробка великих енергетичних даних передбачає застосування методів машинного навчання (МН) і глибокого навчання (ГН) для виявлення закономірностей, прогнозування попиту та оптимізації роботи енергосистем. При цьому, методи МН використовуються головним чином для класифікації, кластеризації та регресійного аналізу енергетичних даних, а методи ГН особливо ефективні в роботі з великими обсягами часових рядів і даних з датчиків у «розумних» мережах та системах енергомоніторингу. Завдяки цьому підвищується точність прогнозів, надійність енергопостачання та енергоефективність.

Моделі прогнозування попиту й генерації енергії будуються з урахуванням сезонних і стохастичних компонентів часових рядів, оскільки споживання та виробництво енергії мають регулярні періодичні коливання і випадкові збурення. Сезонні компоненти відображають добові, тижневі та річні цикли, пов’язані з поведінкою споживачів і погодними умовами. Стохастичні компоненти враховують випадкові відхилення, похибки вимірювань та непередбачувані події в енергосистемі. Поєднання цих компонентів у моделях, таких як ARIMA, SARIMA, Prophet або нейронні мережі, забезпечує більш точні й надійні прогнози.

Для короткострокового прогнозування часових рядів широко застосовуються статистичні методи (ARIMA, SARIMA, Prophet) та нейронні підходи (RNN, LSTM), які дозволяють моделювати тренди, сезонність і нелінійні залежності [14].

Водночас для оцінювання ефективності роботи окремих елементів енергосистем, наприклад, прогнозування потужності вітрових турбін або сонячних панелей широко застосовуються регресійні моделі, ансамблеві методи машинного навчання (зокрема Random Forest і Gradient Boosting), а також штучні нейронні мережі [15].

Просторовий аналіз і візуалізація результатів досліджень здійснюються з використанням геоінформаційних платформ, які забезпечують інтеграцію енергетичних даних із географічними характеристиками**,** комплексно враховувати кліматичні та соціально-економічні чинники, підвищуючи обґрунтованість аналізу та підтримку управлінських рішень у сфері енергетики [15].

Ключовим чинником аналітики Big Data в енергетиці є концепція «data-driven decision making» – прийняття управлінських і технічних рішень на основі аналізу даних, а не лише інтуїції чи експертних припущень. У межах цієї концепції великі масиви енергетичних даних із лічильників, датчиків, SCADA та ринків електроенергії перетворюються на знання за допомогою аналітичних моделей. Data-driven підхід дає змогу оптимізувати прогнозування попиту, управління генерацією, зменшення втрат і підвищення надійності енергосистем. Таким чином, аналітика Big Data стає фундаментом цифрової трансформації сучасної енергетики.

Стратегічне та оперативне управління енергосистемами здійснюється не лише на основі експертних оцінок, але й із використанням моделей прогнозування, які безперервно оновлюються з урахуванням нових даних**.** Такий підхід забезпечує підвищення адаптивності, точності управлінських рішень і стійкості функціонування енергосистем в умовах невизначеності та змінного попиту.

У поєднанні з технологіями Інтернету речей (IoT) підходи Big Data формують передумови для розвитку розумних енергетичних мереж (Smart Grids), що забезпечують автоматизоване управління процесами генерації, споживання та акумулювання енергії**.** Інтеграція цих технологій підвищує ефективність, надійність і гнучкість енергосистем, сприяючи їх адаптації до динамічних змін попиту та зростання частки відновлюваних джерел енергії [16-18].

Застосування Big Data в альтернативній енергетиці також охоплюють питання надійності і якості даних, сумісності форматів, етичних аспектів і кібербезпеки, оскільки без надійних і захищених даних аналітичні рішення втрачають ефективність. Якість даних передбачає повноту, точність, актуальність і узгодженість інформації, що надходить з різних джерел відновлюваної енергетики. Сумісність форматів є критичною для інтеграції даних з різних платформ, виробників обладнання та інформаційних систем. Етичні аспекти стосуються конфіденційності даних споживачів і прозорості використання аналітичних моделей. Кібербезпека забезпечує захист енергетичних даних і критичної інфраструктури від несанкціонованого доступу та кібератак. Надійність моделей залежить від репрезентативності даних і стійкості алгоритмів до шуму. Тому розробка методів очищення, нормалізації та узгодження даних є критично важливою для достовірності результатів. Поєднання Big Data з технологіями штучного інтелекту створить умови для повноцінного переходу до енергетики п’ятого покоління – інтелектуальної, адаптивної й сталорозвиненої енергетичної екосистеми [19].

Для дослідження часових закономірностей виробництва електроенергії з відновлюваних джерел з урахуванням добової, сезонної та міжрічної мінливості була використана платформа OPSD (Open Power System Data), яка збирає, оброблює і публікує високоякісні централізовані дані про системи електропостачання Західної Європи з метою розробки моделей енергосистем, підвищення прозорості досліджень і скорочення дублювання роботи для дослідників у галузі енергетики за рахунок надання надійних вихідних даних.

OPSD розробляється за підтримки наукових інституцій та енергетичних аналітичних центрів і надає безкоштовний доступ до узгоджених даних про виробництво, споживання, потужності, ціни та викиди CO_2 у форматах CSV і API. Платформа агрегує та гармонізує інформацію з національних операторів електромереж, європейських агентств (ENTSO-E, Eurostat) і метеорологічних служб [20]. Дані охоплюють 30 країн Європи й містять часові ряди з інтервалом до 1 години починаючи з 2006 року. Особливістю OPSD є відкрите ліцензування, чітка структура метаданих і автоматизовані механізми перевірки якості. OPSD широко використовується в дослідженнях, пов’язаних із прогнозуванням виробництва енергії, моделюванням балансів електромереж, аналізом інтеграції відновлюваних джерел енергії та розробкою енергетичної політики. У поєднанні з аналітичними платформами (Python, Jupyter, Pandas) цей ресурс є базовим джерелом для реплікабельних наукових досліджень у сфері Big Data та альтернативної енергетики.

Дані Open Power System Data Germany характеризуються високою часовою розрізненістю та відкритістю, що робить їх придатними для статистичного аналізу, машинного навчання й побудови моделей прогнозування генерації. У досліджені використано часові ряди за 2015–2020 рр., де основними ознаками виступають фактична генерація сонячної та вітрової енергії (у МВт).

Структура набору даних представлена в табл. 1.

Таблиця 1 – Структура набору даних

Назва поля	Тип даних	Одиниця виміру	Опис	Приклад значення
utc_timestamp	date-time	UTC (ISO 8601)	Часова мітка у форматі UTC, що визначає момент вимірювання енергогенерації. Використовується як уніфікований часовий індекс для об'єднання з іншими джерелами даних.	2015-01-01T00:00:00+00:00
cet_cest_timestamp	date-time	CET/CEST (UTC+1/UTC+2)	Локальний час (Central European Time або Central European Summer Time), що відповідає німецькому часовому поясу. Використовується для зручності аналізу добових циклів генерації.	2015-01-01T01:00:00+01:00
DE_solar_generation_actual	float	Мегавати (MW)	Фактична величина виробництва сонячної енергії у Німеччині, виміряна за годину. Відсутність значення (NaN) вказує на нічний період або відсутність даних.	773.0
DE_wind_generation_actual	float	Мегавати (MW)	Фактична величина виробництва вітрової енергії у Німеччині, виміряна за той самий період. Дані використовуються для моделювання короткострокового прогнозу генерації.	9689.00

Попередня обробка даних була спрямована на підвищення їхньої якості та придатності до подальшого аналізу. Зокрема, виконано очищення набору даних від пропусків, частка яких становила близько 0,3 % записів. Відсутні значення відновлювалися за даними попереднього дня, що дало змогу зберегти добову та сезонну структуру часових рядів. Крім того, здійснено усереднення добових показників з метою зниження рівня випадкового шуму для зниження шуму та підвищення стійкості подальших моделей аналізу і прогнозування. Фрагмент коду імпортування модулів представлено на рис. 1.

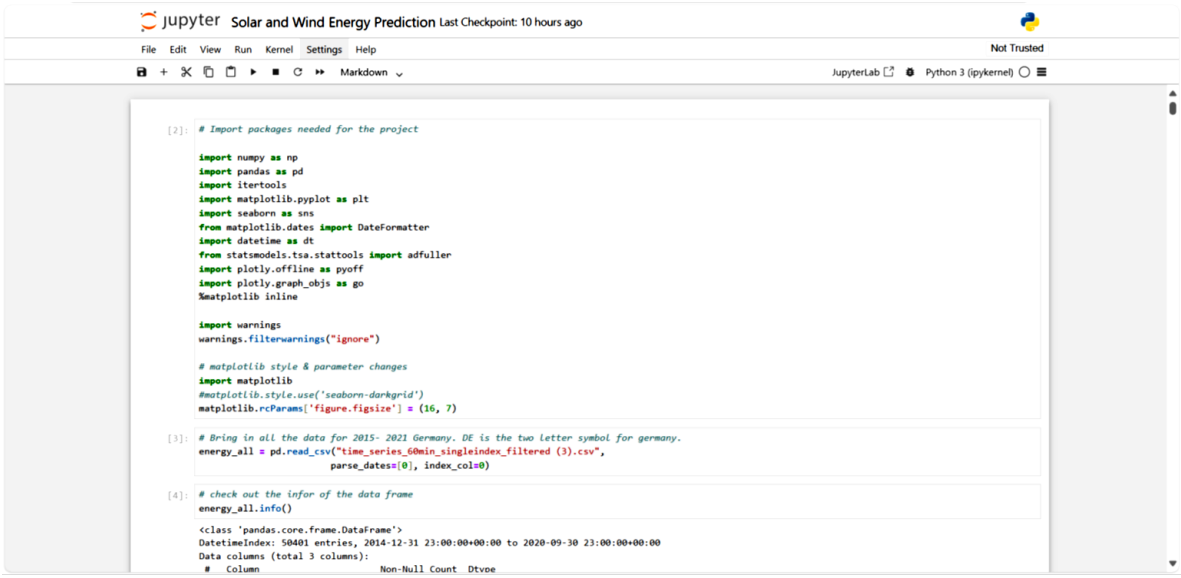
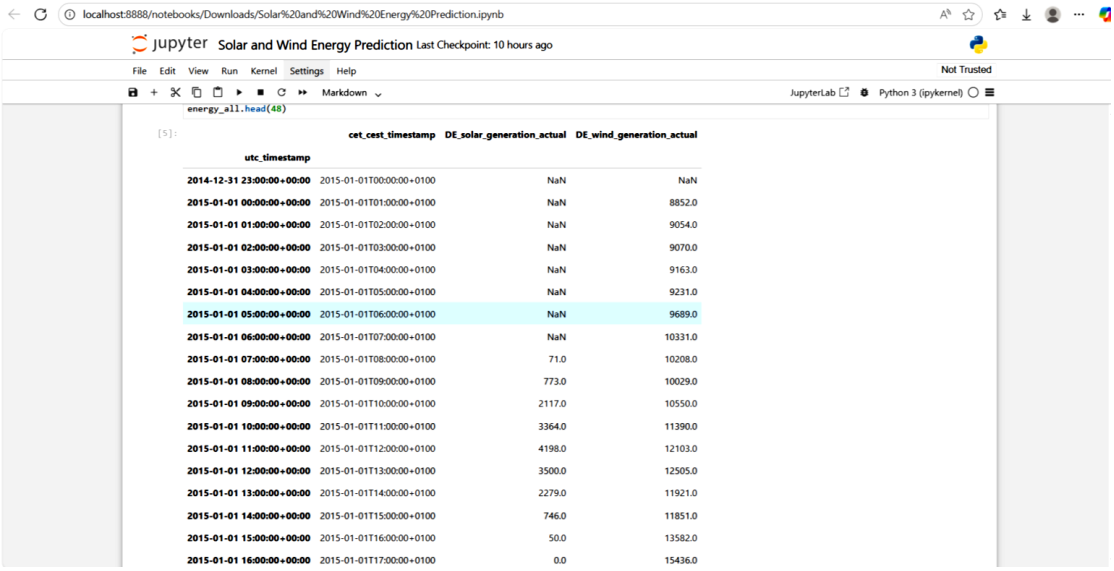


Рис. 1. Фрагмент коду імпортування модулів в Jupyter Notebook

Джерело: розроблено авторами.

Всього в датасеті нараховується 50401 рядок Тип даних визначено як float64**,** що забезпечує достатню числову точність для представлення значень генерації електроенергії та коректне виконання статистичного аналізу й побудови моделей прогнозування.

Проведений авторами статистичний свідчить про зростаючі тенденції виробництва німецьких відновних джерел енергії. Для подальшого аналізу потрібно позбутися стовпця cet_cest_timestamp. Перші значення набору даних представлені на рис. 2.



utc_timestamp	cet_cest_timestamp	DE_solar_generation_actual	DE_wind_generation_actual
2014-12-31 23:00:00+00:00	2015-01-01T00:00:00+0100	NaN	NaN
2015-01-01 00:00:00+00:00	2015-01-01T01:00:00+0100	NaN	8852.0
2015-01-01 01:00:00+00:00	2015-01-01T02:00:00+0100	NaN	9054.0
2015-01-01 02:00:00+00:00	2015-01-01T03:00:00+0100	NaN	9070.0
2015-01-01 03:00:00+00:00	2015-01-01T04:00:00+0100	NaN	9163.0
2015-01-01 04:00:00+00:00	2015-01-01T05:00:00+0100	NaN	9231.0
2015-01-01 05:00:00+00:00	2015-01-01T06:00:00+0100	NaN	9689.0
2015-01-01 06:00:00+00:00	2015-01-01T07:00:00+0100	NaN	10331.0
2015-01-01 07:00:00+00:00	2015-01-01T08:00:00+0100	71.0	10208.0
2015-01-01 08:00:00+00:00	2015-01-01T09:00:00+0100	773.0	10029.0
2015-01-01 09:00:00+00:00	2015-01-01T10:00:00+0100	2117.0	10550.0
2015-01-01 10:00:00+00:00	2015-01-01T11:00:00+0100	3364.0	11390.0
2015-01-01 11:00:00+00:00	2015-01-01T12:00:00+0100	4198.0	12103.0
2015-01-01 12:00:00+00:00	2015-01-01T13:00:00+0100	3500.0	12505.0
2015-01-01 13:00:00+00:00	2015-01-01T14:00:00+0100	2279.0	11921.0
2015-01-01 14:00:00+00:00	2015-01-01T15:00:00+0100	746.0	11851.0
2015-01-01 15:00:00+00:00	2015-01-01T16:00:00+0100	50.0	13582.0
2015-01-01 16:00:00+00:00	2015-01-01T17:00:00+0100	0.0	15436.0

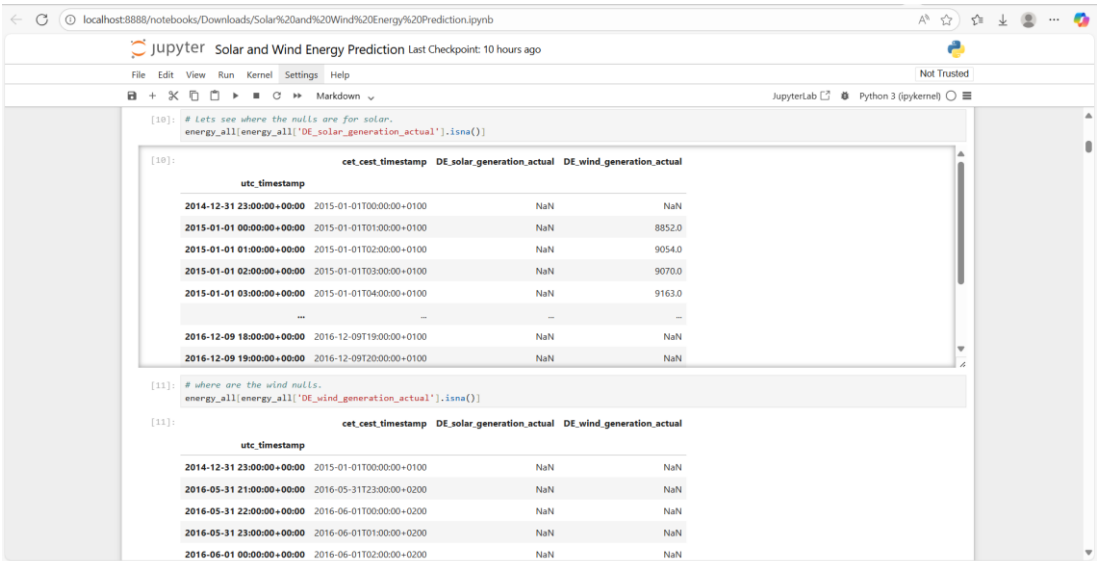
Рис. 2 Перші значення набору даних

Джерело: побудовано авторами в Jupyter Notebook.

Видаляти нульові значення недоцільно, оскільки це може порушити структуру та безперервність часового ряду

Значення NaN у часових рядах генерації сонячної та вітрової енергії відповідають відсутнім або некоректно зафіксованим спостереженням, що можуть виникати через збої вимірювального обладнання, затримки передачі даних або технічні помилки під час збору інформації.

Як свідчить рис. 3, є 7 точок даних NaN для сонячної енергії, і, крім того, багато нулів.



utc_timestamp	cet_cest_timestamp	DE_solar_generation_actual	DE_wind_generation_actual
2014-12-31 23:00:00+00:00	2015-01-01T00:00:00+0100	NaN	NaN
2015-01-01 00:00:00+00:00	2015-01-01T01:00:00+0100	NaN	8852.0
2015-01-01 01:00:00+00:00	2015-01-01T02:00:00+0100	NaN	9054.0
2015-01-01 02:00:00+00:00	2015-01-01T03:00:00+0100	NaN	9070.0
2015-01-01 03:00:00+00:00	2015-01-01T04:00:00+0100	NaN	9163.0
...	...	...	...
2016-12-09 18:00:00+00:00	2016-12-09T19:00:00+0100	NaN	NaN
2016-12-09 19:00:00+00:00	2016-12-09T20:00:00+0100	NaN	NaN

utc_timestamp	cet_cest_timestamp	DE_solar_generation_actual	DE_wind_generation_actual
2014-12-31 23:00:00+00:00	2015-01-01T00:00:00+0100	NaN	NaN
2016-05-31 21:00:00+00:00	2016-05-31T23:00:00+0200	NaN	NaN
2016-05-31 22:00:00+00:00	2016-06-01T00:00:00+0200	NaN	NaN
2016-05-31 23:00:00+00:00	2016-06-01T01:00:00+0200	NaN	NaN
2016-06-01 00:00:00+00:00	2016-06-01T02:00:00+0200	NaN	NaN

Рис. 3. Значення NaN серед часових рядів для сонячної та вітрової енергії

Джерело: побудовано авторами в Jupyter Notebook.

Це ускладнює перетворення даних під час моделювання. Наявність таких пропусків потребує етапу попередньої обробки даних, зокрема заповнення або коригування значень, аби забезпечити коректний статистичний аналіз і моделювання часових закономірностей. Не можна взяти логарифм нуля. Нулі виникають тому, що вночі та рано вранці відсутнє сонце.

Нульових значень не так і вже багато. Для коректного наступного моделювання потрібно заповнити їх значенням за день до цього. Це не дуже значний відсоток даних, і надалі усередним ці дані за весь день. Такий підхід виглядає більш прийнятним, оскільки це не спотворює прогнози.

Залишилися лише нульові значення з першого дня, оскільки решта була заповнена нульовими значеннями з попереднього дня. Це перетворило фіктивний стовпець cet_cest_timestamp на нульові значення в тому ж місці. Саме тому він був використаний як фіктивний стовпець. Дані мають великий міжквартильний діапазон. Висновок узгоджується з фізичною природою процесу, оскільки сонячна радіація досягає максимуму близько полудня, що й призводить до великого міжквартильного діапазону в цей період (рис. 4).

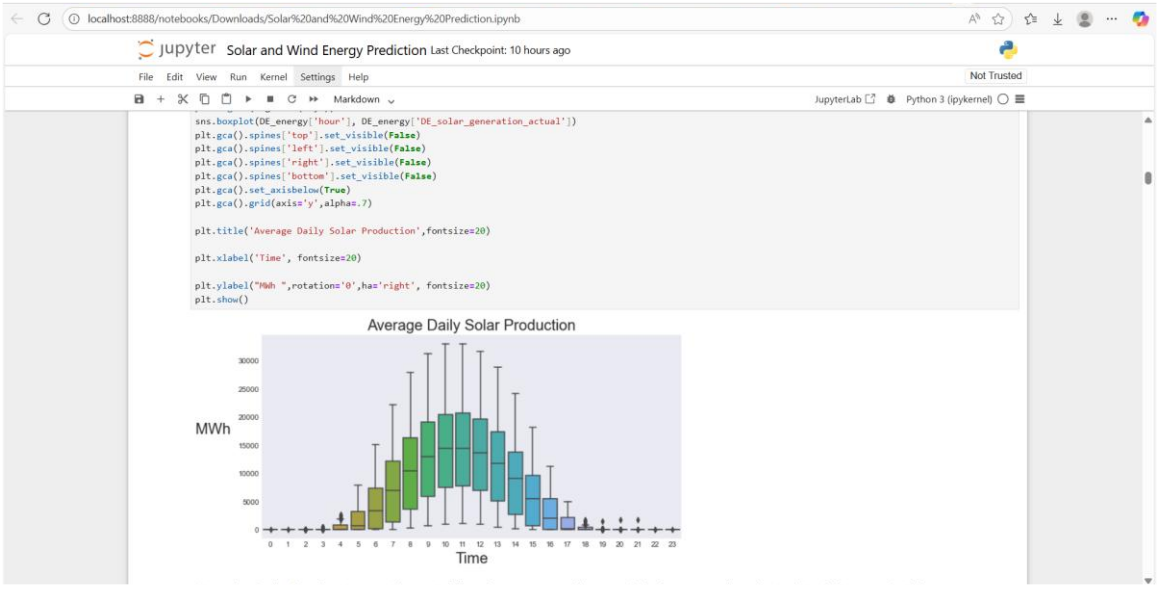


Рис. 4. Box-plot усередненої кількості виробленої сонячної електроенергії
Джерело: побудовано авторами в Jupyter Notebook.

Розподіл даних є асиметричним і змінюється протягом доби, тому цілком виправданим є використання робастних статистик, таких як медіана та IQR.

Прогнозування генерації сонячної енергії є ключовим завданням для балансування енергосистеми та планування навантажень. Зазвичай воно базується на історичних часових рядах, метеорологічних змінних (сонячна радіація, хмарність, температура) та добовій і сезонній циклічності. Для розв'язання задачі застосовують статистичні підходи (ARIMA, SARIMA), методи машинного навчання (Random Forest, XGBoost) і глибинні нейромережі (LSTM, GRU).

У процесі прогнозування важливо коректно обробляти нульові значення та враховувати нічні години, коли генерація фізично відсутня.

Зазвичай дані впорядковують у часовому порядку та розділяють на навчальну, валідаційну й тестову частини без випадкового перемішування.

До навчальної вибірки можуть входити ознаки години доби, дня тижня, пори року, а також метеорологічні параметри, зокрема сонячна радіація, хмарність, температура повітря та вологість, тоді як цільовою змінною є обсяг згенерованої сонячної енергії.

Інтеграція супутникових та метеорологічних даних у прогнозуванні генерації сонячної енергії відбувається через поєднання різнорідних джерел інформації для побудови більш точних моделей.

Особливу увагу варто приділити коректній інтерпретації нульових значень, щоб навчальна вибірка не вводила модель в оману. Для підвищення якості моделей у навчальну вибірку включають часові ознаки, такі як година доби, день тижня та номер місяця. Також ефективним підходом є використання лагових значень генерації, що дозволяє моделі враховувати попередній стан системи. Навчальна вибірка для даних по сонячній енергії і характер розподілу що побудовані авторами в Jupyter Notebook представлені відповідно на рис. 6 та рис. 7.

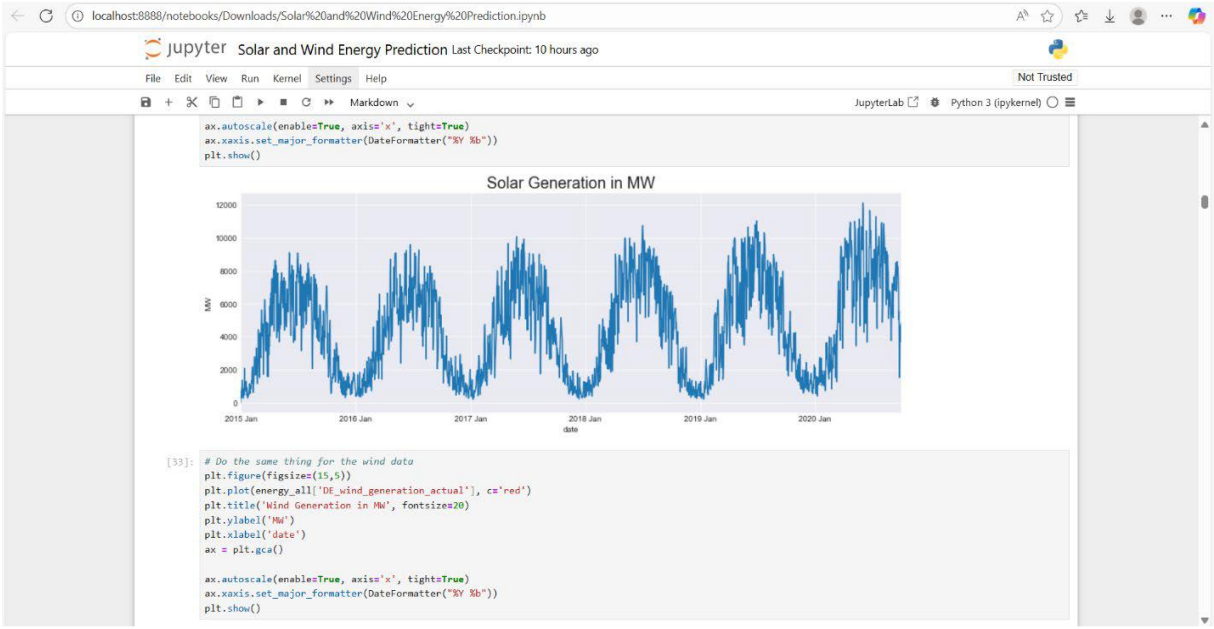


Рис. 6. Навчальна вибірка для даних по сонячній енергії

Джерело: побудовано авторами в Jupyter Notebook.

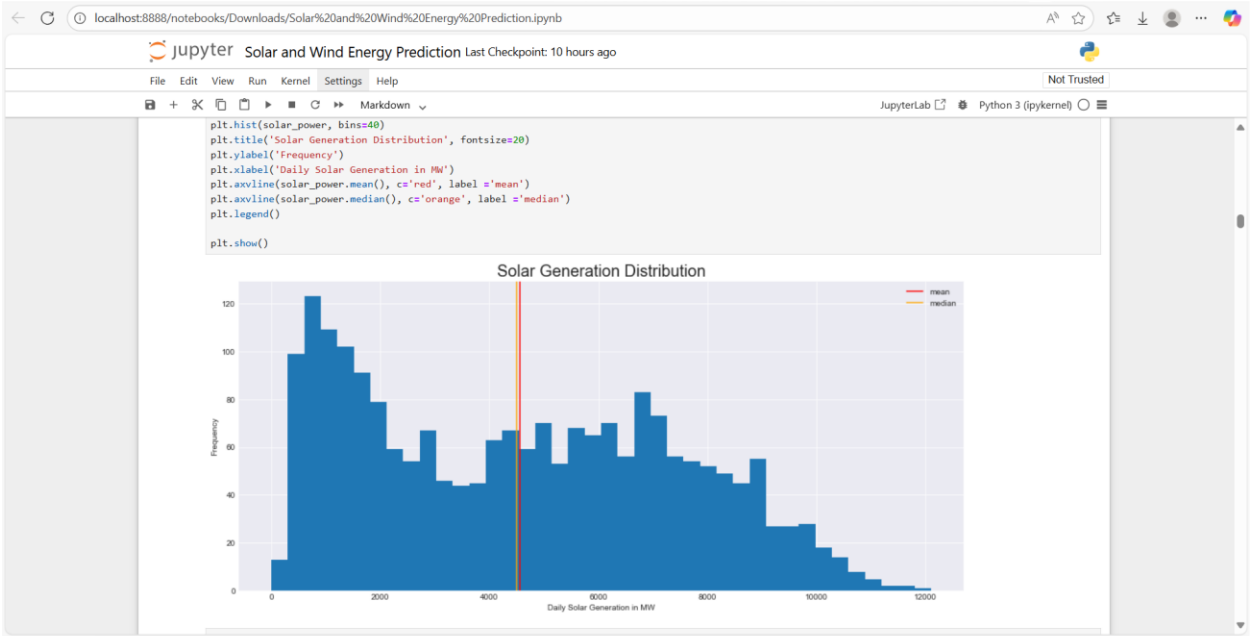


Рис. 7. Характер розподілу сонячної енергії

Джерело: побудована авторами в Jupyter Notebook.

Навчальну вибірку слід відокремлювати від тестової та валідаційної частин з урахуванням часової послідовності. Такий підхід запобігає витоку інформації з майбутнього та забезпечує коректну оцінку якості прогнозування. Якісно сформована навчальна вибірка є запорукою точного прогнозування генерації сонячної енергії. Урахування фізичних закономірностей, сезонності та особливостей даних дозволяє значно підвищити надійність моделей машинного навчання.

Для візуалізації розподілу основних статистичних характеристик, таких як медіана, квартилі та можливі викиди, скористаємося box-plot (рис. 8), який допомагає швидко оцінити, як розподілені дані генерації сонячної енергії, а також виявити асиметрію або наявність аномальних значень.



Рис. 8. Box-plot розподілу частоти різних об'ємів генерації сонячної енергії
Джерело: побудовано авторами в Jupyter Notebook.

Box-plot (рис. 8 і рис. 9) представляє інтерквартильний діапазон (IQR), який охоплює 50% найсередніших значень. Верхня частина ящика – це третій квартиль (Q3), а нижня – перший квартиль (Q1).

IQR – число, яке показує розкид середньої половини (тобто середні 50%) набору даних і допомагає визначити викиди. IQR – це різниця між Q3 і Q1.

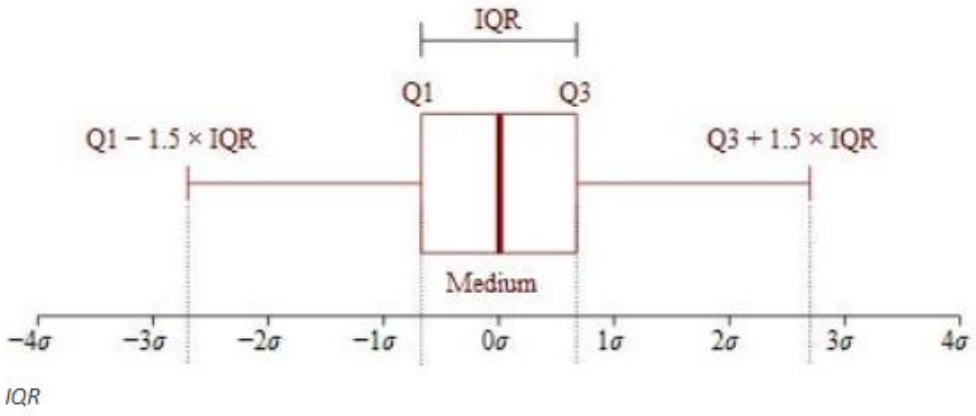


Рис. 9. Інтерквартільний розмах

Лінія всередині ящика: показує медіану (Q2) даних. Вуси: виходять з ящика і зазвичай простягаються до найменшого та найбільшого значення, які не є викидами. Викиди часто показуються як окремі точки. Викиди: значення, що виходять за межі 1,5 раза IQR від країв ящика.

Для моделювання був використаний підхід до статистичного прогнозування часових рядів. Побудовано графіки автокореляції та часткової автокореляції. На рисунках нижче наведено вилучення тренду (рис. 10), сезонної (рис. 11) і шумової компоненти (рис. 12).



Рис. 10. Тренд генерації сонячної енергії

Джерело: побудований авторами в Jupyter Notebook.

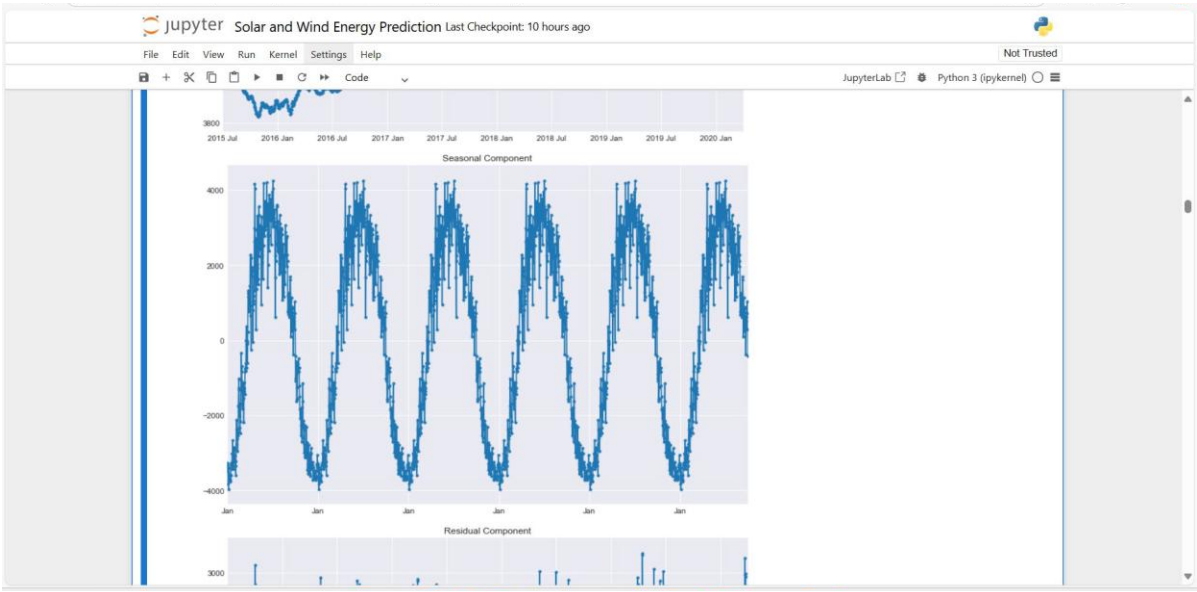


Рис. 11. Сезонні компоненти

Джерело: побудований авторами в Jupyter Notebook.

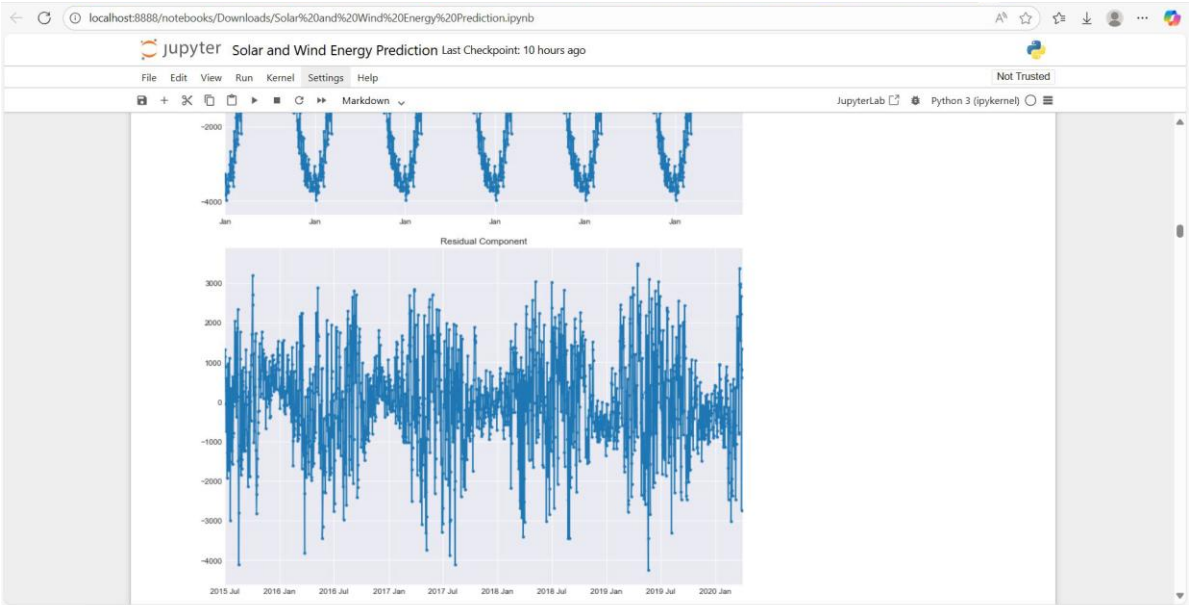


Рис. 11. Компонента білого шуму

Джерело: побудований авторами в Jupyter Notebook.

Наведені три графіки автокореляції свідчать що після декомпозиції часового ряду (другий та третій графіки автокореляція при мінімальному кроці стає практично нульовою (рис. 12).

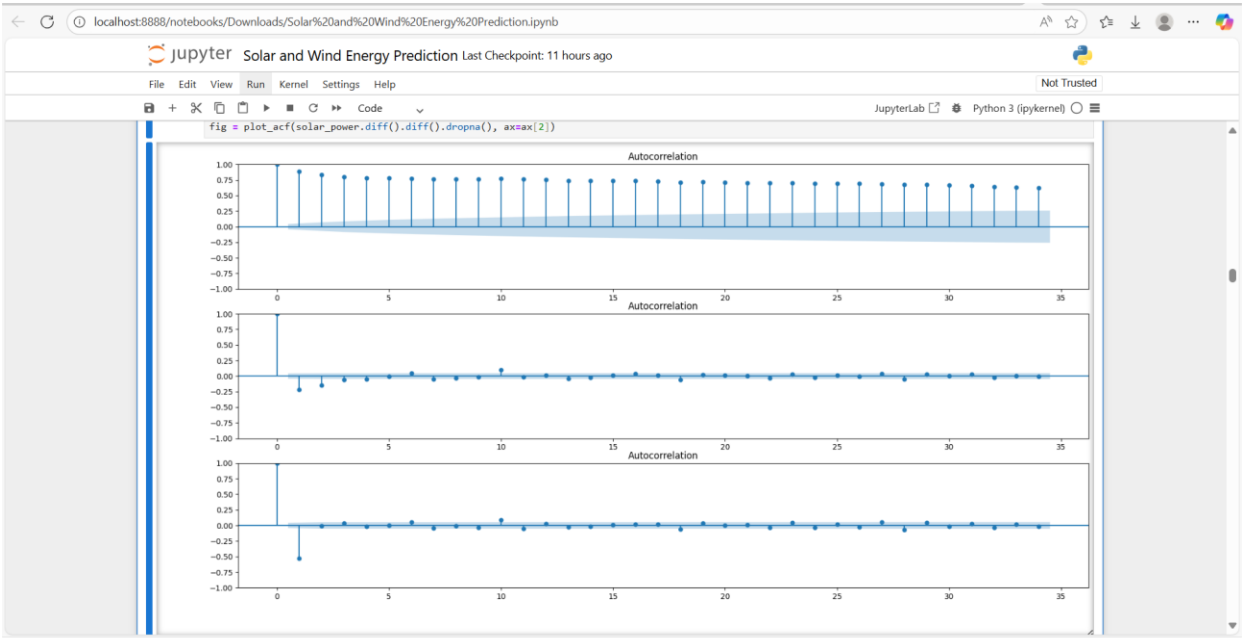


Рис. 12. Результати автокореляції для повного сигналу, сезонної і шумової компонент

Джерело: побудований авторами в Jupyter Notebook.

Далі був використаний модуль python scikit learnt для створення рекурентної моделі, яка ідеально підходить для розв'язання такої задачі і здійснили її навчання. Модель оптимізувалась досить швидко. На рис. 13 наведено результати прогнозування на тестовій вибірці за довгий період.

Останнім кроком будуємо довірчі границі (рис. 14), які свідчать що 80 % даних лежить у межах довірчих границь. Проте дані мають сезону гетероскедастчність (дисперсія

(варіація) даних змінюється залежно від часу або сезону), а саме в літні дні спостерігається набагато більше коливання генерації сонячної енергії, ніж взимку.

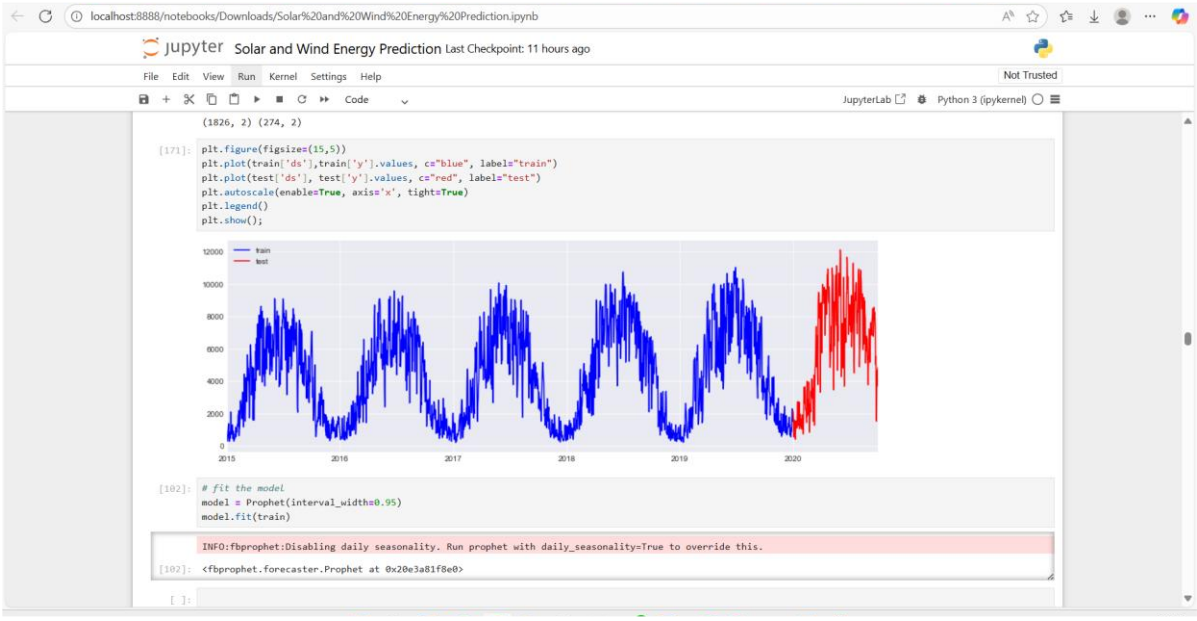


Рис. 13. Побудова прогнозу на один рік для генерації сонячної електроенергії
Побудований авторами в Jupyter Notebook.

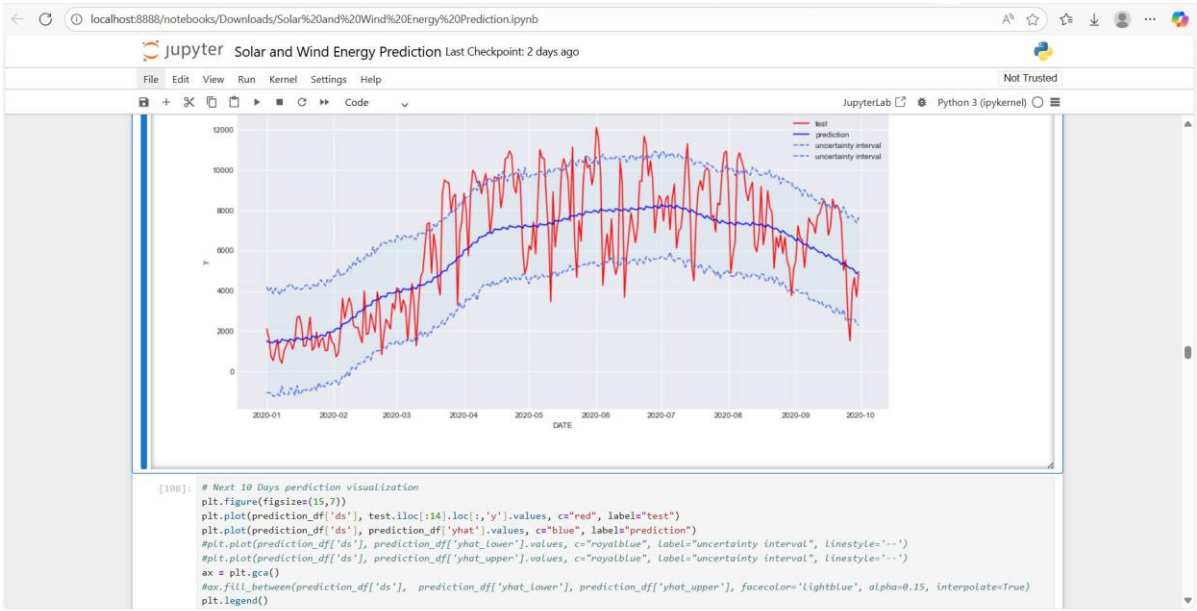


Рис. 14. Побудова довірчих границь

Висновки. Використання технологій Big Data в альтернативній енергетиці відкриває нові можливості для підвищення ефективності, прогнозованості та надійності енергосистем. Обробка великих масивів даних дозволяє створювати точні моделі поведінки енергогенерації та оптимізувати балансування навантажень. Отримані результати демонструють практичне впровадження цих принципів і підтверджує потенціал аналітики великих даних у сфері відновлюваної енергетики.

Для моделювання використано підхід до статистичного прогнозування часових рядів. Побудовано графіки автокореляції та часткової автокореляції. Моделі оцінювались за метриками MAE та RMSE. В роботі розглянуто та проаналізовано набір даних OPSD

Germany, здійснено його комплексний аналітичний аналіз. Побудовано моделі класу RNN та здійснено їх навчання за допомогою модуля Python scikit-learn. Результати показали, що застосування RNN забезпечує високу точність 86,191 % для передбачення генерації сонячної енергії в короткостроковому горизонті, враховуючи сезонні та трендові компоненти. Зростання генерації сонячної й вітрової енергії чітко корелює з розширенням інфраструктури відновних джерел енергетики у Німеччині. Варто звернути увагу що сонячна електрогенерація має підвищену дисперсію даних в літні періоди і навпаки дисперсія знижується взимку.

Отримане прогнозування є прикладом практичного застосування технологій Big Data та аналітики часових рядів у системах управління відновлюваною енергетикою. Вона демонструє, як інтеграція відкритих енергетичних даних, хмарних обчислень і машинного навчання може підвищити точність прогнозів, необхідних для планування навантажень, стабільності мережі та розробки політики сталого розвитку.

Список використаних джерел

1. Li, H., Wang, L., Liu, J., & Zhou, A. (2020). Short-term solar power forecasting using deep learning models. *Renewable Energy, 152*, 635–645.

2. Ahmad, F., Khan, M. A., & Lee, S. (2020). Machine learning techniques for solar irradiance prediction: A review. *Solar Energy, 209*, 224–245.

3. Zhang, Y., Li, Z., & Chen, X. (2018). Satellite data and meteorological parameters integration for PV power forecasting. *Applied Energy, 230*, 1056–1067.

4. Jain, P., & Kumar, R. (2020). Ensemble learning methods for solar power forecasting: A comparative study. *Energy Reports, 6*, 1205–1218.

5. Rahman, M., Chowdhury, S., & Rahman, T. (2020). IoT-based real-time monitoring and predictive maintenance of solar panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 132*, 1100–1113.

6. Park, J., & Kim, K. (2020). Big Data analytics for forecasting solar energy generation in smart grids. *IEEE Access, 8*, 104563–104574.

7. Singh, A., & Gupta, N. (2021). Challenges and opportunities in machine learning-based solar energy prediction. *Energy Reports, 7*, 1120–1135.

8. Письменна У. та ін. (2021). Становлення ринкового механізму стимулювання розвитку систем накопичення енергії. *Вісник СумДУ. Серія «Економіка»*, (3), 31-39.

9. Станицина В. І. та ін. (2023). Можливості підвищення енергетичної незалежності територіальних громад в Україні. *Енергетика та громади* (с. 12–20).

10. Кизим М. І. та ін. (2023). Енергоефективність та енергозалежність в Україні з урахуванням світових тенденцій. *Проблеми економіки,* (2(56)), 41-55.

11. Кудря, С. О. (ред.). (2025). *Відновлювані джерела енергії: видання третє, оновлене*. Інститут відновлюваної енергетики НАНУ.

12. Chandel S.S. et al. Review of deep learning techniques for power generation prediction of industrial solar photovoltaic plants // Solar Compass 8 (2023) http:www.elsevier.com/locate/solcom

13. Iheanetu Kelachukwu J. Solar Photovoltaic Power Forecasting: A Review https://www.mdpi.com/journal/sustainability.

14. Bedi, J., & Toshniwal, D. (2022). Deep learning framework to forecast electricity demand. Energy, 239, 122006.

15. Ahmad, T., Zhang, D., & Dai, H. (2020). Toward smart energy systems — Big data and machine learning approaches. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 122, 109772.

16. Cavazzi, S., & Dalla Longa, F. (2019). GIS-based assessment of onshore wind energy potential in Europe. *Renewable Energy, 139,* 734–747.

17. Khan, A., et al. (2020). Big data analytics and smart grid integration: A comprehensive review. IEEE Access, 8, 198947–198967.

18. Zhou, K., Fu, C., & Yang, S. (2016). Big data driven smart energy management: From big data to big insights. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 56*, 215–225.

19. Siano, P., De Marco, G., Rolán, A., & Loia, V. (2019). A survey and evaluation of the potentials of artificial intelligence applications in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems, 34*(5), 3836–3846.

20. Open Power System Data. 2020. *Data Package Time series.* Version 2020-10-06. https://doi.org/10.25832/time_series/2020-10-06.

References

1. Li, H., Wang, L., Liu, J., & Zhou, A. (2020). Short-term solar power forecasting using deep learning models. *Renewable Energy, 152*, 635–645.

2. Ahmad, F., Khan, M. A., & Lee, S. (2020). Machine learning techniques for solar irradiance prediction: A review. *Solar Energy, 209*, 224–245.

3. Zhang, Y., Li, Z., & Chen, X. (2018). Satellite data and meteorological parameters integration for PV power forecasting. *Applied Energy, 230*, 1056–1067.

4. Jain, P., & Kumar, R. (2020). Ensemble learning methods for solar power forecasting: A comparative study. *Energy Reports, 6*, 1205–1218.

5. Rahman, M., Chowdhury, S., & Rahman, T. (2020). IoT-based real-time monitoring and predictive maintenance of solar panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 132*, 1100–1113.

6. Park, J., & Kim, K. (2020). Big Data analytics for forecasting solar energy generation in smart grids. *IEEE Access, 8*, 104563–104574.

7. Singh, A., & Gupta, N. (2021). Challenges and opportunities in machine learning-based solar energy prediction. *Energy Reports, 7*, 1120–1135.

8. Pysmenna, U., et al. (2021). Stanovlennia rynkovoho mekhanizmu stymuliuvannia rozvytku system nakopychennia enerhii [Formation of the market mechanism for stimulating the development of energy storage systems]. *Visnyk SumDU. Seriia «Ekonomika» – Visnyk of Sumy State University. Series: Economics*, (3), 31–39.

9. Stanytsyna, V. I., et al. (2023). Mozhlyvosti pidvyshchennia enerhetychnoi nezalezhnosti terytorialnykh hromad v Ukraini [Opportunities to increase the energy independence of territorial communities in Ukraine]. *Enerhetyka ta hromady – Energy and Communities*, 12–20.

10. Kyzym, M. I., et al. (2023). Enerhoefektyvnist ta enerhozalezhnist v Ukraini z urakhu-vanniam svitovykh tendentsii [Energy efficiency and energy dependence in Ukraine considering global trends]. *Problemy ekonomiky – Problems of Economy*, *2*(56), 41–55.

11. Kudria, S. O. (Ed.). (2025). *Vidnovliuvani dzherela enerhii: vydannia tretie, onovlene [Renewable energy sources]* (3rd updated ed.). Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine.

12. Chandel, S. S., et al. (2023). Review of deep learning techniques for power generation prediction of industrial solar photovoltaic plants. *Solar Compass, 8*. http://www.elsevier.com/locate/solcom

13. Iheanetu, K. J. Solar photovoltaic power forecasting: A review. *Sustainability*. https://www.mdpi.com/journal/sustainability

14. Bedi, J., & Toshniwal, D. (2022). Deep learning framework to forecast electricity demand. *Energy, 239*, 122006.

15. Ahmad, T., Zhang, D., & Dai, H. (2020). Toward smart energy systems—Big data and machine learning approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 122*, 109772.

16. Cavazzi, S., & Dalla Longa, F. (2019). GIS-based assessment of onshore wind energy potential in Europe. *Renewable Energy, 139*, 734–747.

17, Khan, A., et al. (2020). Big data analytics and smart grid integration: A comprehensive review. *IEEE Access, 8*, 198947–198967.

18. Zhou, K., Fu, C., & Yang, S. (2016). Big data driven smart energy management: From big data to big insights. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 56*, 215–225.

19. Siano, P., De Marco, G., Rolán, A., & Loia, V. (2019). A survey and evaluation of the potentials of artificial intelligence applications in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems, 34*(5), 3836–3846.

20. Open Power System Data. (2020). *Data package time series (Version 2020-10-06).* https://doi.org/10.25832/time_series/2020-10-06

Дата першого надходження статті до видання: 26.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.03.2026

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

UDC 004.89; 621.3; 351/354; 658

Oleksandr Vasyliev[1], Serhii Zubenko[2]

[1]PhD student, 2nd year of study, specialty 193 – Geodesy and Land Management
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Educational and Scientific Institute "Institute of Geology" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: vasilyeva455@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0009-2177-7859

[2]Master's student, 2nd year of study, specialty 103 – Earth Sciences
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Educational and Scientific Institute "Institute of Geology" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: szubnko02@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0008-1166-4693

BIG DATA TECHNOLOGIES IN FORECASTING SOLAR ENERGY GENERATION

The growing share of renewable energy sources (RES), particularly solar power, in the global energy balance necessitates highly accurate forecasting of electricity generation. The variable nature of solar radiation, along with seasonal and diurnal fluctuations, poses significant challenges to the stability and reliability of power systems. Big Data technologies enable the real-time processing of massive datasets, improving forecast accuracy and optimizing power system operations.

This paper examines modern Big Data technologies and their application in forecasting solar energy generation. It focuses on methods for collecting, processing, and analyzing large volumes of data from various sources, including meteorological parameters, solar panel performance metrics, and satellite observations. The study explores machine learning and artificial intelligence algorithms for building forecasting models, which improve the precision of electricity generation predictions and optimize the integration of solar energy into power grids.

Big Data facilitates the accurate forecasting of energy production from solar power plants, accounting for weather conditions and seasonal variability. Furthermore, it enhances the efficiency of power grid management by enabling real-time balancing of supply and demand.

The proposed approaches demonstrate the effectiveness of using Big Data analytics to support decision-making in the renewable energy sector and ensure power grid stability. The findings of this study are applicable to production planning and resource management at solar power plants.

The temporal patterns of electricity production from RES are analyzed based on solar energy generation data. The primary focus is on the diurnal, seasonal, and interannual variability of generation, as well as the impact of environmental and climatic factors on production stability.

Keywords: *Big Data; solar energy production optimization; forecasting.*

Table: 1. Fig.: 14. References: 20.

Васильєв О. М., Зубенко С. С. Технології BIG DATA в прогнозуванні генерації сонячної енергії. *Технічні науки та технології*, 2026. № 2(44). С. 584-299. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-584-599.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-600-611
УДК 528.7:332

Мирослав Олександрович Кравчук
аспірант кафедри кадастру територій, інституту геодезії
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)
E-mail: myroslav.o.kravchuk@lpnu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0000-8743-8715

ІНТЕГРАЦІЯ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ У ФОРМУВАННІ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД

Висвітлено концепцію формування цифрової моделі землекористування територіальних громад. До технологічного процесу створення цифрової моделі включено чотири етапи робіт, що забезпечують комплексний підхід до збору, систематизації та візуалізації геопросторових даних для ефективного управління земельними ресурсами. Розглянуто інтеграцію геопросторових даних як технологічний процес приведення різнорідної просторової інформації (растрових даних ДЗЗ, векторних кадастрових карт, результатів аерозйомки) до єдиної системи координат та топологічної узгодженості в ГІС-середовищі з метою комплексного моделювання та аналізу території громади. Запропоновано структурно-логічну схему інтеграції мультисенсорних даних ДЗЗ та кадастрової інформації в ГІС-середовищі.

Ключові слова: *Геоінформаційні системи (ГІС); дистанційне зондування Землі (ДЗЗ); цифрова модель землекористування; оверлейний аналіз; земельний кадастр; просторове планування; «цифровий двійник».*
Рис.: 3. Табл.: 1. Бібл.: 21.

Актуальність теми дослідження. Унаслідок реформування системи земельних відносин та децентралізації влади в Україні територіальні громади (ТГ) отримали широкі повноваження щодо розпорядження землями. Ефективне управління земельними ресурсами неможливе без актуальної, достовірної та повної просторової інформації, що зумовлено потребою розробки комплексних планів просторового розвитку територіальних громад та переходом до нових технологічних рішень – цифрових моделей землекористувань. Сьогодні цифрова модель землекористування територіальних громад розглядається як інструмент забезпечення сталого розвитку, ефективного наповнення місцевих бюджетів та раціонального використання природноресурсного потенціалу громади. Крім того, під час воєнного стану та повоєнного відновлення постає питання швидкої інвентаризації земель та оцінки збитків, завданих довкіллю, визначення яких неможливе без застосування аерокосмічних методів. Космічну візуалізацію забезпечують мультиспектральні просторові зображення у різних діапазонах довжин хвиль електромагнітного спектра. Обробка мультиспектральних знімків здійснюється із застосуванням комерційного та відкритого інструментарію ГІС (зокрема QGIS), що дозволяє створювати інтерактивні карти, розраховувати вегетаційні індекси та моделювати аналітичні поверхні.

Постановка проблеми. Відсутність адаптованих методичних підходів щодо комплексної інтеграції даних ДЗЗ та ГІС у єдині цифрові моделі землекористування територіальних громад ускладнює процес використання супутникових знімків та програмного забезпечення для вирішення нагальних питань територіального розвитку. Перетворення розрізненого масиву інформації на дієвий інструмент «цифровий двійник» території громади для моніторингу та управління територією громади є пріоритетним завданням сучасного просторового планування та землевпорядкування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання впровадження геоінформаційних систем та використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) в системі управління земельними ресурсами є предметом активних дискусій у сучасному науковому середовищі. Теоретико-методологічні засади цифрової трансформації системи землеустрою, зокрема автоматизація управлінських процесів, ґрунтовно висвітлено у працях О. Ступень та співавторів [1]. Безпосередньо розробці методик цифрового моделювання землекористувань територіальних громад присвячені дослідження М. Білявського [2], тоді як питання геодезичного планування та створення цифрових моделей безпосередньо в агроландшафтах розкриті в роботах В. Кирилюка та колег [3].

© М. О. Кравчук, 2026

Значний масив наукових праць присвячений практичним аспектам використання ГІС-технологій та даних ДЗЗ для моніторингу змін землекористування та інвентаризації земель. Ці питання детально розглядаються в роботах О. Браславської [4]. Вагомий внесок у формування геоінформаційних та індикативних підходів до оцінки ефективності використання земель з урахуванням різноманітних просторових обмежень зробили С. Нестеренко, О. Байструк та ін. [5, 6]. Специфіку застосування ГІС для сталого управління сільськогосподарськими землями (наприклад, аналіз крутизни схилів) досліджує L. Datsenko та інші [7; 8].

Окремим перспективним напрямом є концепції «Smart Land» та просторове планування на місцевому рівні. Використання ГІС-платформ як основи для створення комплексних планів просторового розвитку громад аналізується у праці O. Kopishynska [9]. Роль ГІС-інтеграції та геоінформаційного аналізу для сталого розвитку саме об'єднаних територіальних громад підкреслюється в дослідженнях S. Shevchuk [10], A. Evdokimov [11] та моделях регіонального розвитку K. Mamonov [12]. Водночас інноваційні концепції смартурбаністики, розумного землекористування та інтеграції 3D-геопросторових даних для сталого територіального управління розкриті в публікаціях А. Станкевича [13], A. Figurek та ін. [14], а також F. Bianconi [15].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на значну кількість ґрунтовних наукових праць, присвячених окремим аспектам застосування ГІС та ДЗЗ, проблема їхньої комплексної інтеграції саме для формування цілісних цифрових моделей землекористування на базовому рівні (територіальних громад) залишається недостатньо розкритою. Більшість досліджень фокусується або на загальнорегіональному чи національному моніторингу, або на вузькогалузевих завданнях (виключно агроландшафти чи великі міста). Інтеграція різних видів даних ДЗЗ з місцевими геоінформаційними системами громад для розробки комплексних планів просторового розвитку потребує вдосконалення наявних механізмів та формування єдиного методологічного алгоритму.

Мета статті. Мета дослідження полягає в аналізі теоретико-методологічного обґрунтування та розроблення практичних алгоритмів інтеграції даних дистанційного зондування Землі та геоінформаційних систем для формування комплексних цифрових моделей землекористування територіальних громад.

Виклад основного матеріалу. Сучасний етап розвитку земельних відносин в Україні характеризується докорінним реформуванням системи управління територіями на базовому рівні. Ключовим нормативно-правовим рушієм цих змін став Закон України № 711-IX «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо планування використання земель територіальних громад». Цим документом запроваджено фундаментально новий інструмент управління – Комплексний план просторового розвитку території територіальної громади, який одночасно є містобудівною документацією та документацією із землеустрою [16]. Крім того, імплементація вимог Закону України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» зобов'язує органи місцевого самоврядування створювати, регулярно оновлювати та інтегрувати набори базових і тематичних геоданих на відповідних геопорталах [17]. Відповідно до Порядку розроблення містобудівної документації (Постанова КМУ № 926), основою для таких планів мають слугувати виключно актуальні цифрові карти у державній системі координат УСК-2000 [18].

Незважаючи на ґрунтовну законодавчу базу, практичний стан забезпечення територіальних громад якісною просторовою інформацією на сьогодні залишається незадовільним. Більшість громад не володіють актуальною топографо-геодезичною основою (зокрема масштабу 1:10000), а наявні матеріали є застарілими та розрізненими. Дані Державного земельного кадастру часто містять топологічні помилки, так звані «білі плями», просторові накладки та суттєві розбіжності між юридичними межами ділянок і їхнім фактичним використанням (рис. 1) [1; 4].



Рис. 1. Помилки в Державному земельному кадастрі:
а – земельна ділянка обліковувалась як сільськогосподарське угіддя – «пасовище» і продана з аукціону; б – земельна ділянка обліковується як рілля із невиділеними межами річки Коврaєць та прибережною захисною смугою; в – приватизовані земельні ділянки з ЦП 01.01 на березі Сейму у межах прибережної захисної смуги
Джерело: [21].

На сьогодні значні площі земельного фонду зазнали і продовжують зазнавати безпосередній вплив військових дій, які призводять до деградації ґрунтового покриву, порушення рельєфу та змін структури землекористування. Таким чином, традиційні наземні геодезичні обстеження, інвентаризація земель, оцінка збитків та планування відновлення територій є не тільки фінансово затратними й довготривалими, але й фізично небезпечними або неможливими через за мінування та обмежений доступ. Відповідно, інноваційні цифрові інструменти стають обов'язковою умовою для об'єктивного моніторингу стану земельних ресурсів, фіксації порушень та розроблення комплексних планів просторового розвитку громад. Саме глибока інтеграція даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) у середовище сучасних геоінформаційних систем (ГІС) виступає тим технологічним рішенням, що дозволяє дистанційно, безпечно та з високою точністю формувати комплексну цифрову модель землекористування територіальної громади [19].

Цифрова модель землекористування територіальної громади – це динамічне інформаційне відображення просторової організації території, що базується на інтегрованій сукупності геопросторових і атрибутивних даних про правовий режим, кількісні та якісні характеристики, а також функціональне призначення земельних ресурсів у межах громади. Модель створюють шляхом накладання (оверлею) та об'єднання різних баз даних: топографо-геодезичної основи, відомостей Державного земельного кадастру (ДЗК), Реєстру речових прав, чинної містобудівної документації та матеріалів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). На відміну від статичних електронних або паперових карт, цифрова

модель землекористування є динамічним інструментом. Кожний її графічний об'єкт (земельна ділянка, лісовий масив, водойма) пов'язаний із розширеною базою даних, що дозволяє автоматично здійснювати просторовий аналіз, виявляти топологічні помилки, накладки та юридичні розбіжності між правовим статусом землі та її фактичним використанням. Модель слугує фундаментом для розробки комплексних планів просторового розвитку територій, здійснення постійного моніторингу земель, оцінки екологічного стану ландшафтів та прийняття обґрунтованих управлінських рішень органами місцевого самоврядування.

У процесі цифрового моделювання землекористування ключову роль відіграють геоінформаційні системи, які дозволяють інтегрувати різноманітні джерела даних (кадастрова інформація, супутникові знімки, топографічні матеріали та екологічні показники), забезпечуючи повну багаторівневу зручність використання за допомогою ArcGIS Pro. Методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), зокрема супутникова й аерофотозйомка, забезпечують ефективний моніторинг змін землекористування, дозволяють оцінювати природні процеси, виявляти антропогенний вплив та здійснювати прогнозування трансформацій земельних ресурсів. Сучасні дослідження підтверджують високу ефективність інтеграції технологій ДЗЗ та ГІС у процесах моніторингу навколишнього природного середовища [1; 2; 4; 5; 7] з вивчення площ поверхневих вод, фіксування деградації озер, контролю лісів (вирубки і стану лісових насаджень) та сільськогосподарських земель (оцінка посівів, фіксація надзвичайних ситуацій). Інтеграція цих двох потужних інструментів суттєво підвищує ефективність управління земельним фондом, забезпечуючи оперативність, масштабність і точність. Архітектура системи утворює гнучку модульну структуру, що дозволяє вертикальну та горизонтальну інтеграцію різних джерел даних. Система охоплює тематичні та функціональні шари, включаючи геопросторові, екологічні, соціально-демографічні й інфраструктурні дані, утворюючи таким чином багатовимірну та доступну для досліджень інформаційну базу.

Формування цифрової моделі землекористування – це не просто «малювання карти», це створення багатошарової бази геопросторових даних, яка відображає юридичний (де-юре) та фактичний (де-факто) стан земель. І. Ковальчук та А. Ковальчук запропонували блокову структуру картографічного забезпечення бази геоданих, яка дозволить всесторонньо забезпечити вимоги менеджменту функціонуванням територіальної громади. Запропонована структура передбачає поділ картографічного матеріалу на чотири блоки, а саме [20]:

Блок 1. Загальна інформація про об’єднану територіальну громаду. Блок включає межі, адміністративний поділ, топографічну карту, цифрову карту рельєфу, карти забудованих територій, дорожньої інфраструктури громади, об’єктів інженерного облаштування, населення та його розміщення по території громади, розміщення сільськогосподарських угідь та іншого цільового призначення.

Блок 2. Аналітична інформація про об’єднану територіальну громаду передбачає актуальні космічні знімки, карти інвентаризації земель, існуючого використання земель різного цільового призначення, порушень цільового використання земель громади, карти агрохімічного та агрофізичного стану земель сільськогосподарського призначення, карти лісів, водних об’єктів, мінерально-сировинних ресурсів на території громади, карта звалищ побутових відходів на території ОТГ.

Блок 3. Соціально-економічна інформація про територіальну громаду включає інформацію про соціальний статус населення громади, карти соціальної інфраструктури територіальної громади (освіта, лікувально-оздоровча, рекреаційна, туристична і природоохоронна інфраструктура) та карти економічної інфраструктури громади.

Блок 4. Перспективи розвитку об'єднаної територіальної громади містить проєктну документацію – Генеральний план, плани і схеми перспективного господарського розвитку громади, інновацій, ініціатив та проєкти природоохоронних заходів.

Концепцію цифрової моделі землекористування розглядають через призму створення «цифрового двійника» земельного фонду територіальної громади. На відміну від традиційних карт, це динамічна, багатовимірна система, архітектура якої формується шляхом інтеграції та просторового накладання масивів даних за допомогою ГІС. Процес створення шарів охоплює зведення в єдину координатну систему кадастрової інформації, топографічної основи, гідрологічної мережі, даних ґрунтового покриву, інженерних комунікацій та даних ДЗЗ. Сформоване віртуальне середовище об'єктивно відображає поточний стан угідь, а також дозволяє моделювати просторові процеси, аналізувати наслідки антропогенного навантаження (впливу військових дій, деградації ґрунтів) та прогнозувати ефективність впровадження систем точного землеробства чи меліоративних заходів. Перетворення розрізнених просторових даних на дієвий цифровий інструмент управління територією громади здійснюється за чітким алгоритмом. Архітектура побудови повноцінного «цифрового двійника» землекористування громади передбачає проходження низки послідовних кроків.

Технологічний процес створення цифрової моделі землекористування можна розділити на чотири ключових етапи: 1. Підготовчий етап або збір та аудит вхідних даних. 2. Етап первинної обробки або формування бази геоданих. 3. Аналітичний та синтезуючий етап (Просторове моделювання). 4. Прикладний етап (Впровадження та моніторинг) (рис. 2). Побудова цифрової моделі території громади здійснюється відповідно до вимог просторового планування, кадастрового обліку, розвитку інженерної та транспортної інфраструктури, екологічного моніторингу. В основу процесу закладено інтеграцію даних дистанційного зондування Землі та геоінформаційних систем. Зазначимо, що інтеграція даних – це процес об'єднання даних із різних джерел, які відрізняються за форматом, структурою або походженням, у єдине уніфіковане інформаційне середовище для забезпечення їх цілісності, узгодженості та придатності для спільного аналізу. Відповідно, інтеграція геопросторових даних – це технологічний процес приведення різнорідної інформації (зокрема растрових даних ДЗЗ, векторних кадастрових планів та матеріалів аерофотознімання) до єдиної системи координат і топологічної узгодженості в ГІС-середовищі, що здійснюється з метою комплексного моделювання та аналізу території громади [10].

Формування цифрової моделі території здійснюється у векторному вигляді, що є оптимальним рішенням для забезпечення гнучкості процесів просторового аналізу, моніторингу та візуалізації. Джерельною базою для векторизації геопросторових об'єктів слугують високодетальні ортофотоплани, супутникові знімки Sentinel-2, топографічні плани масштабів 1:2000–1:5000 та дані з Державного земельного кадастру. Процес моделювання реалізується на базі програмного комплексу QGIS із застосуванням його стандартних аналітичних інструментів. Структурування інформації передбачає розподіл на тематичні векторні шари: шляхи сполучення (лінійні та полігональні), межі земельних ділянок (полігональні), водні об'єкти (лінійні та полігональні) та будівлі (полігональні). Усі геопросторові дані зведені до єдиної Державної системи координат УСК-2000 для забезпечення їхньої повної сумісності.

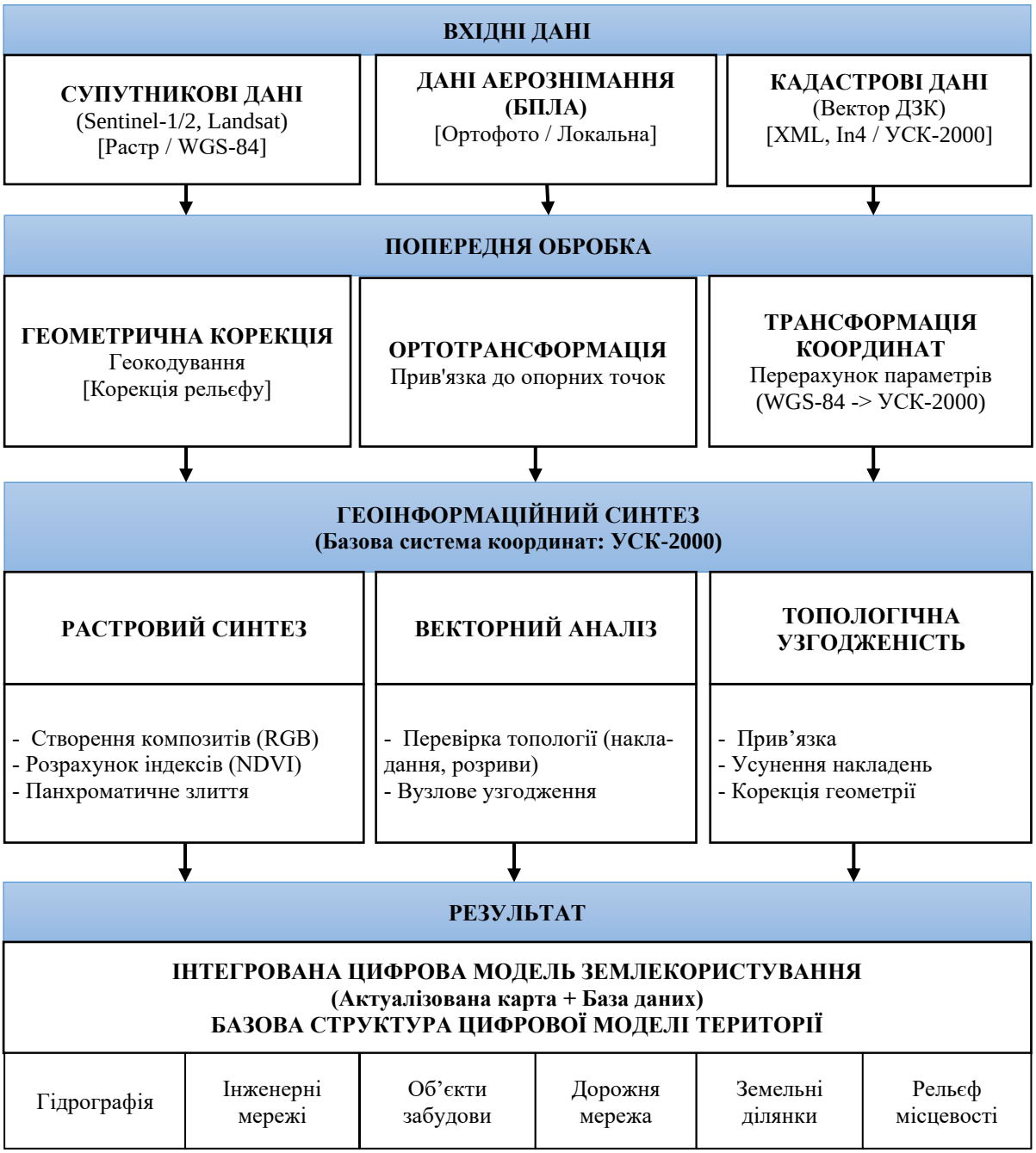


Рис. 2. Структурно-логічна схема інтеграції мультисенсорних даних ДЗЗ та кадастрової інформації в ГІС-середовищі

Джерело: авторська розробка.

Зазначимо, що навіть за умови однакової системи координат, супутникові дані можуть мати зміщення відносно точних меж ділянок. Вирішення проблеми досягається вибором опорних точок та геометричною корекцією. Опорні точки – це чіткі контури на місцевості (перехрестя доріг, кути капітальних будівель) і, які добре ідентифікуються як на радарних/оптичних знімках, так і на ортофотопланах БПЛА. Геометрична корекція передбачає здійснення поліноміальне перетворення (зазвичай 1-го або 2-го порядку) растрового зображення для мінімізації середньоквадратичної помилки (RMS Error). Цільове значення RMS не повинно перевищувати 0,5…1 пікселя. Інтеграція кадастрових карт часто виявляє «то-

пологічні колізії» – помилки в геометрії об’єктів. Для їх усунення в ГІС (QGIS) застосовуються правила топології – перевірка на накладання меж однієї земельної ділянки, що заходять на іншу, розриви між спільними межами суміжними ділянками та вузлове узгодження вершин векторних об'єктів до вузлів базового шару (наприклад, меж, визначених за високоточними даними БПЛА) в межах заданого допуску.

Невід'ємним складником створення цифрової моделі є процес ідентифікації просторових змін та структурування землекористування відповідно методики автоматизованого дешифрування даних дистанційного зондування Землі. Автоматизоване дешифрування даних ДЗЗ передбачає розчленування зображення та виділення фотосинтезуючої біомаси на основі розрахунку нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (NDVI). Індекс (NDVI) дозволяє чітко відмежовувати рослинний покрив від урбанізованих територій та водних дзеркал на основі спектральної яскравості пікселів.

Процес автоматизованої класифікації типів земельного покриву реалізовано з використанням попередньо підготовлених еталонних навчальних вибірок (training samples). У результаті формуються тематичні растрові шари за класами землекористування: «рілля», «лісова рослинність», «водні об'єкти», «забудова» та «пасовища». Отримані растрові моделі конвертуються у векторний формат (полігональні об'єкти) для подальшої геопросторової обробки, що забезпечує можливість точного картометричного визначення площ трансформованих угідь та їх інтеграції в базу даних ГІС. Особлива увага приділяється формуванню шару землекористування. Кожна земельна ділянка отримує унікальний кадастровий номер, вказується форма власності, площа, цільове призначення. За допомогою інструментів просторового аналізу здійснюється перевірка сумісності меж ділянок та актуалізація кадастрової інформації (рис. 3).

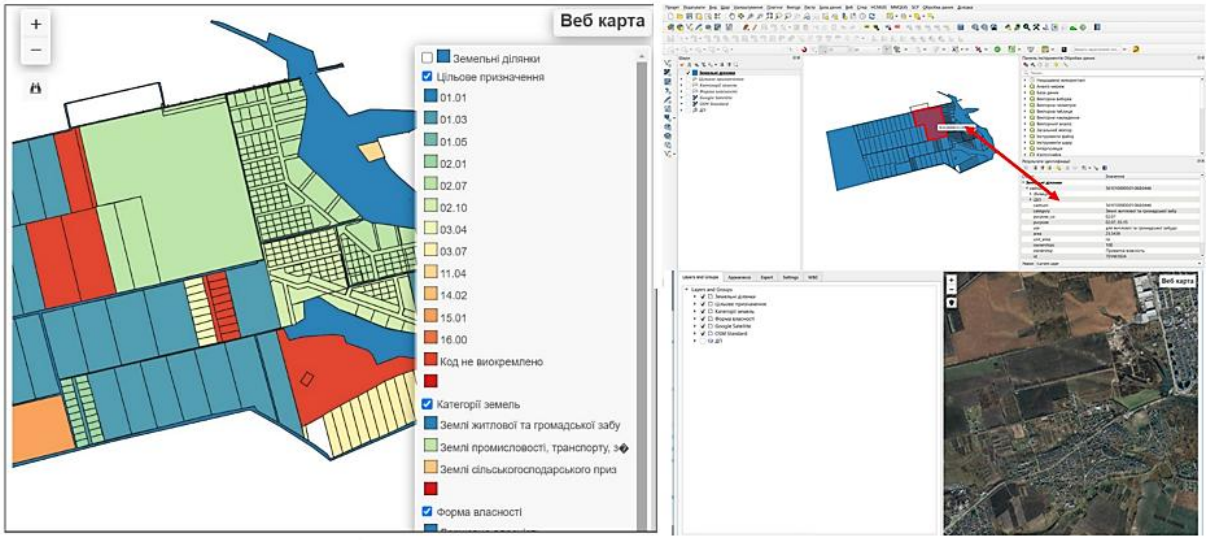


Рис. 3. Приклад цифрової моделі землекористування Рівненської громади
Джерело: авторська розробка.

Отже, формування єдиного геоінформаційного простору є фінальним етапом зі створення багатошарового проєкту, де нижній шар – це цифрова модель рельєфу (SRTM або з БПЛА), середній шар – синтезоване растрове покриття (Мультиспектр + Радар), а верхній шар – векторна маска кадастрового поділу з атрибутивними даними.

Просторові дані зберігаються у форматах, що забезпечують високу швидкість обробки та можливість інтеграції в системи управління базами даних (PostGIS, Spatialite) або у форматах файлових баз (ESRI Geodatabase, GeoPackage). Для роботи із середовищами з відкритим кодом обирається формат GeoPackage, який забезпечує компактне збереження векторних і растрових даних разом з атрибутами в єдиному файлі (табл. 1).

Таблиця 1 – Атрибутивна таблиця структури бази даних

Назва шару ГІС	Тип геометрії	Атрибути (інформація в таблиці)	Джерело даних
Земельні ділянки (факт)	Полігон (Polygon)	Площа, культура, стан ґрунту, індекс NDVI	ДЗЗ (Супутник/БПЛА)
Земельні ділянки (право)	Полігон (Polygon)	Кадастровий номер, власник, цільове призначення	ДЗК (Кадастр)
Обмеження та обтяження	Полігон/Лінія	Тип обмеження (ЛЕП, санітарна зона), ширина	Містобудівна документація
Конфліктні зони	Полігон (Polygon)	Тип порушення (самозахоплення, нецільове), площа порушення, втрати бюджету	Розрахунковий шар (ГІС-аналіз)

Джерело: авторська розробка.

Процес побудови цифрової моделі передбачає інтеграцію тематичних шарів у єдину базу геоданих. Забезпечується узгодженість топологічних зв'язків між об'єктами різних класів, побудова логічної структури з урахуванням ієрархії об'єктів (наприклад, будівлі прив'язані до вулиць, вулиці – до меж населених пунктів, населені пункти – до меж громади).

Важливу частину процесу побудови цифрової моделі займає розробка стилів візуалізації тематичних шарів, які ґрунтуються на правилах відображення елементів (колір, тип ліній, товщина контурів, заповнення полігонів), що дозволяють створювати зрозумілу й інформативну картографічну продукцію. Створена цифрова модель території Рівненської територіальної громади є багаторівневою просторовою базою даних, що містить різноманітні об'єкти та забезпечує їхню обробку, аналіз і візуалізацію для вирішення завдань просторового планування, управління інфраструктурою та охорони навколишнього середовища.

Методи геоінформаційного аналізу і моделювання є ефективними засобами управління територіальними громадами, які дозволяють громадам автоматизовано порівнювати юридичні відомості Державного земельного кадастру з фактичним станом землекористування. Топологічне накладання картографічних шарів є основою проведення інвентаризації земель, виявлення ділянок необлікованого використання ріллі або сільськогосподарських угідь, самозахоплення та нецільового використання, що сприяє уточненню бази оподаткування і наповнення місцевого бюджету, дотримання екологічних вимог, виявлення порушень використання режимів прибережних захисних смуг та охоронних зон, а також забезпечення системного та прозорого управління земельним банком громади.

Висновки та рекомендації. Побудова цифрових моделей землекористування територіальних громад шляхом інтеграції даних дистанційного зондування Землі та ГІС-технологій вимагає застосування спеціалізованих алгоритмів просторового аналізу, забезпечення жорсткої топологічної узгодженості векторних шарів та формування комплексної геореляційної бази даних атрибутивної інформації. Під інтеграцією даних розуміємо комплекс процедур із геометричної корекції, спектрального синтезу та оверлейного поєднання мультисенсорних даних дистанційного зондування (оптичних, радарних) із топографо-геодезичною основою для створення актуальної цифрової моделі землекористування. Методика створення цифрової моделі землекористування передбачає використання відкритих супутникових даних Sentinel та програмного забезпечення QGIS, які є базовими інструментами формування динамічної моделі «цифрового двійника» територій громади. Застосування геоінформаційного оверлейного аналізу забезпечує можливість автоматизованого зіставлення юридичних даних земельного кадастру з фактичним станом землекористування, що дозволяє ефективно ідентифікувати випадки порушень у використанні земель територіальних громад, а в умовах воєнного стану забезпечити безпечний моніторинг ресурсів та оцінку збитків без фізичного доступу до небезпечних ділянок. Використання відкритих даних (Sentinel-2) та програмного забезпечення з відкритим кодом (QGIS) робить технологію цифрового моделювання землекористування

економічно доступною для громад у розроблені комплексних планів просторового розвитку та забезпечення сталого повоєнного відновлення територій.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розширення функціоналу цифрової моделі шляхом інтеграції даних лазерного сканування (LiDAR) для 3D-моделювання забудови та вдосконалення алгоритмів автоматичного розпізнавання змін на основі штучного інтелекту.

Список використаних джерел

1. 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.https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336296.

2. Білявський, М. О. (2025). Розробка методики цифрового моделювання землекористувань та землеволодінь громади. *Український журнал прикладної економіки та техніки*, *1*(10), 133-139. https://doi.org/10.36887/2415-8453-2025-1-22.

3. Кирилюк, В., Рожі, & Т., Харів, В. (2023). Геодезичне планування в агроландшафті: створення цифрових карт та моделей для оптимізації землекористування. *Просторовий розвиток*, *6*, 293–308. https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.6.293-308.

4. Браславська, О. В. (2025). ГІС-технології та дистанційне зондування у моніторингу змін землекористування. *Містобудування та територіальне планування*, *89*, 472–487. https://doi.org/10.32347/2076-815x.2025.89.472-487.

5. Нестеренко, С. Г., Байструк, О. В., Демочко, І. О., (&) Фролов О. В. (2025). Геоінформаційний підхід до інвентаризації та оцінки ефективності використання земель різного цільового призначення з урахуванням просторових обмежень. *Комунальне господарство міст*, *6*(194), 271-277. https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-271-277.

6. Нестеренко, С. Г., Байструк, О. В., Демочко, І. О., & Фролов, О. В. (2025). Індикативний підхід в геоінформаційних системах до моніторингу ефективності використання земель з просторовими обмеженнями. *Науковий вісник будівництва*, *113*, 238-248. https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.113.1.29.

7. Datsenko, L., Dubnytska, M., Mikhno, O., Polyakova, N., Sytnyk, M., & Titova, S. (2025). Analyzing Slope Steepness for Sustainable Agricultural Land Management in the Vinnytsia Urban Territorial Community Using GIS. *5th EAGE Workshop on assessment of landslide hazards and impact on communities,* (p. 1-5). https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025520002.

8. Datsenko, L., Titova, S., & Dubnytska, M.,(2025) Advantages of comprehensive renovation of territorial communities in Ukraine in the context of spatial planning. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, *4*(1), 15–30. http://dx.doi.org/10.15576/ASP.FC/200728.

9. Kopishynska, O., Utkin, Yu., Sliusar, I., Flehantov, L., Somych, M., Yakovlieva, O., & Scryl, O. (2024). Geodata Processing Methodology on GIS Platforms when Creating Spatial Development Plans of Territorial Communities: Case of Ukraine. *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics*, *22*(4), 33-40. https://doi.org/10.54808/JSCI.22.04.33.

10. Shevchuk, S., Prokopenko, N., Vynnyk, A., Mukhin, O., & Sitko, D. (2025) How can gis integration improve land management for sustainable development in territorial communities. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, *103*(15), 5819-5832. https://doi.org/10.24425/gac.2021.136681.

11. Evdokimov, A., Dolia, K., Rudomakha, A., & Palamar, E. (2019). Geoinformation analysis of the united territorial communities land use. *Geodesy and Cartography*, *68*(2), 261-272. https://doi.org/12.10.24425/gac.2019.131072.

12. Mamonov, K., Sklyar, Iu., Pilicheva, M., Kasyanov, V., & Shyshkin, E. (2021) A model for assessing the regional land-use territorial development. *Geodesy and cartography*, *70*(2). https://doi.org/10.24425/gac.2021.136681.

13. Станкевич, А. (2025). Сматр-урбаністика як концепція ефективного управління земельними ресурсами мегаполісу. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*, 56(1), 427-438. https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(1).427-438.

14. Figurek, A., Semenov, A.V., Ronzhin, A., & Semenova, E.I. (2025). Smart Land Use for Territorial Restructuring: Digital Agriculture as a Tool for Rural Revitalization and Spatial Integration in Cyprus. *Land*, 14, 2409. https://doi.org/10.3390/land14122409.

15. Bianconi, F., Filippucci, M., Ceccaroni, S., & Cornacchini, F. (2025). Trasimeno Smart Land: 3D geospatial data integration for sustainable territorial management. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-4/W16-2025, 9-16. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W16-2025-9-2025.

16. Верховна Рада України. (2020, 17 червня). Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо планування використання земель (Закон № 711-IX). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/711-20.

17. Верховна Рада України. (2020, 13 квітня). Про національну інфраструктуру геопросторових даних (Закон № 554-IX). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20.

18. Кабінет Міністрів України. (2021, 1 вересня). Про затвердження Порядку розроблення, оновлення, внесення змін та затвердження містобудівної документації (№ 926). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/926-2021-%D0%BF.

19. Пілічева, М. О., & Данилюк, А. А. (2025). Інтеграція аерокосмічних даних у національну інфраструктуру геопросторових даних: сучасний стан та перспективи розвитку. *Науковий вісник будівництва, 113*, 249-256. https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.113.1.30.

20. Ковальчук, І. П., & Ковальчук, А. І. (2024). Картографічне забезпечення функціонування територіальних громад. *Землеустрій і топографічна діяльність в умовах війни та післявоєнного відновлення і зміни клімату (GEOPOINT - 2024)* (с. 61-64). Національний університет біоресурсів і природокористування України. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u169/heopoint_tezy.pdf#page=61.

21. Кученко Б. (2026) Обмеження щодо використання земельних ділянок як недооцінений інструмент охорони природи. https://drive.google.com/drive/folders/1dmV77nU1_TWID_KuT58f5EjjoRJhUBpB.

References

1. Stupen, O. I., Prokopenko, N. I., & Shevchuk, S. M. (2025) Tsyfrova transformatsiia systemy zemleustroiu: avtomatyzatsiia upravlinskykh protsesiv u sferi vykorystannia ta okhorony zemelnykh resursiv. [Digital transformation of the land management system: automation of management processes by using and protecting land resources). *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, *212*, 172-184. https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336296.

2. Biliavskyi, M.O. (2025) Rozrobka metodyky tsyfrovoho modeliuvannia zemlekorystuvan ta zemlevolodin hromady. [Development of a methodology for digital modeling of community land use and land ownership.] *Ukrainskyi zhurnal prykladnoi ekonomiky ta tekhniky – Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology*, *1*(10), 133-139. https://doi.org/10.36887/2415-8453-2025-1-22.

3. Kyrylyuk, V., Rozhi, T., Khariv, V. (2023) Heodezychne planuvannya v ahrolandshafti: stvorennya tsyfrovykh kart ta modeley dlya optymizatsiyi zemlekorystuvannya [Geodetic planning in agricultural landscape: creation of digital maps and models for land use optimization]. *Prostorovyy rozvytok – Spatial development*, *6*, 293–308. https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.6.293-308.

4. Braslavska, O. V. (2025). HIS -tekhnolohiyi ta dystantsiyne zonduvannya u monitorynhu zmin zemlekorystuvannya [GIS technologies and remote sensing in monitoring land use changes]. *Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya – Urban planning and territorial planning*, *89*, 472–487. https://doi.org/10.32347/2076-815x.2025.89.472-487.

5. Nestrenko, S. H., Baistruk, O. V., Demochko, I. O., & Frolov, O. V. (2025). Heoinformatsiinyi pidkhid do inventaryzatsii ta otsinky efektyvnosti vykorystannia zemel riznoho tsilovoho pryznachennia z urakhuvanniam prostorovykh obmezhen [A geo-informational approach to inventory and assessment of the effective land use for various purposes, taking into account spatial limitations]. *Komunalne hospodarstvo mist – Utilities of cities*, *6*(194), 271-277. https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-271-277.

6. Nesterenko, S. H., Baistruk, O. V., Demochko, I. O. (2025). Indykatyvnyy pidkhid v heoinformatsiynykh systemakh do monitorynhu efektyvnosti vykorystannya zemel z prostorovymy obmezhennyamy [Indicative approach in geoinformation systems to monitoring the efficiency of land use with spatial constraints]. *Naukovyy visnyk budivnytstva – Scientific Bulletin of Construction,* 113, 238-248. DOI: 10.33042/2311-7257.2025.113.1.2.

7. Datsenko, L., Dubnytska, M., Mikhno, O., Poliakova, N., Sytnyk, M., Titova, S. (2025). Analyzing Slope Steepness for Sustainable Agricultural Land Management in the Vinnytsia Urban Territorial Community Using GIS. *5th EAGE Workshop on assessment of landslide hazards and impact on communities*, 1-5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025520002.

8. Datsenko, L., Titova, S., Dubnytska, M. (2025). Advantages of comprehensive renovation of territorial communities in Ukraine in the context of spatial planning. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, *4*(1), 15–30. http://dx.doi.org/10.15576/ASP.FC/200728.

9. Kopishynska, O., Utkin, Yu., Sliusar, I., Flehantov, L., Somych, M., Yakovlieva O., Scryl O. (2024). Geodata Processing Methodology on GIS Platforms when Creating Spatial Development Plans of Territorial Communities: Case of Ukraine. *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics*, *22*(4), 33-40. https://doi.org/10.54808/JSCI.22.04.33

10. Shevchuk, S., Prokopenko, N., Vynnyk, A., Mukhin, O., Sitko, D. (2025). How can gis integration improve land management for sustainable development in territorial communities. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 103, 15, 5819-5832. https://doi.org/10.24425/gac.2021.136681.

11. Evdokimov, A., Dolia, K., Rudomakha, A., Palamar, E. (2019). Geoinformation analysis of the united territorial communities land use. *Geodesy and Cartography*, *68*(2), 261-272. DOI: https://doi.org/12.10.24425/gac.2019.131072.

12. Mamonov, K., Sklyar, Iu., Pilicheva, M., Kasyanov, V., Shyshkin, E. (2021). A model for assessing the regional land-use territorial development. *Geodesy and cartography*, *70*, 2. https://doi.org/10.24425/gac.2021.136681.

13. Stankevych, A. (2025). Smatr-urbanistyka yak kontseptsiia efektyvnoho upravlinnia zemelnymy resursamy mehapolisu. [Smart urbanism as a concept of effective management of land resources of the metropolis]. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva – Ways to improve construction efficiency*, *56*(1), 427-438. https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(1).427-438.

14. Figurek, A., Semenov, A.V., Ronzhin, A., Semenova, E.I. (2025). Smart Land Use for Territorial Restructuring: Digital Agriculture as a Tool for Rural Revitalization and Spatial Integration in Cyprus. *Land, 14*, 2409. https://doi.org/10.3390/land14122409.

15. Bianconi, F., Filippucci, M., Ceccaroni, S., Cornacchini, F. (2025). Trasimeno Smart Land: 3D geospatial data integration for sustainable territorial management. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-4/W16-2025, 9-16. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W16-2025-9-2025.

16. Pro vnesennya zmin do deyakykh zakonodavchykh aktiv Ukrayiny shchodo planuvannya vykorystannya zemel terytorialnykh hromad [On the Amendments to Certain Legislative Acts of Ukraine Regarding Land Use Planning of Territorial Communities], Law of Ukraine of 17. 06. 2022 № 711-IX. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/711-20#Text.

17. Pro natsionalnu infrastrukturu heoprostorovykh danykh [About the National Geospatial Data Infrastructure], Law of Ukraine of 13.04.2020 № 554 https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20#Text.

18. Poryadok rozroblennya, onovlennya, vnesennya zmin ta zatverdzhennya mistobudivnoyi dokumentatsiyi [Procedure for developing, updating, amending and approving urban planning documentation], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 01.09.2021 № 926. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/926-2021-%D0%BF#Text.

19. Pilicheva, M. O., Danylyuk, A. A. (2025). Intehratsiya aerokosmichnykh danykh u natsional′nu infrastrukturu heoprostorovykh danykh: suchasnyy stan ta perspektyvy rozvytku [Integration of aerospace data into the national infrastructure of geospatial data: current status and development prospects]. *Naukovyy visnyk budivnytstva – Scientific Bulletin of Construction*, 113, 249-256. DOI: 10.33042/2311-7257.2025.113.1.30.

20. Kovalchuk, I. P., Kovalchuk, A. I. (2024). Kartohrafichne zabezpechennya funktsionuvannya terytorialnykh hromad [Cartographic support for the functioning of territorial communities]. Proceedings from GEOPOINT – 2024: *III Mizhnar. nauk.-prakt. konf. "Zemleustriy i topohrafichna diyalnist v umovakh viyny ta pislyavoyennoho vidnovlennya i zminy klimatu" – III Int. scient. and prac. conf "Land management and topographic activities in conditions of war and post-war recovery and climate change* (GEOPOINT – 2024)" (pp. 61-64). National University of Life Resources and Environmental Sciences of Ukraine. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u169/heopoint_tezy.pdf#page=6.

21. Kuchenko, B. (2026). *Obmezhennya shchodo vykorystannya zemelnykh dilyanok yak nedootsinenyy instrument okhorony [Land-use restrictions as an underutilized tool for nature conservation]*. https://drive.google.com/drive/folders/1dmV77nU1_TWID_KuT58f5EjjoRJhUBpB.

Дата першого надходження статті до видання: 22.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.03.2026

UDC 528.7:332

Myroslav Kravchuk
Postgraduate Student at Department of Cadastre of Territory, Institute of Geodesy
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)
E-mail: myroslav.o.kravchuk@lpnu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0000-8743-8715

INTEGRATION OF EARTH REMOTE SENSING DATA AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS IN THE FORMATION OF DIGITAL LAND USE OF THE MODELS FOR TERRITORIAL COMMUNITIES

The article highlights the urgent problem of information support for land resource management of territorial communities in the context of reforming the land relations system, decentralization of power, and the post-war recovery of Ukraine. The article analyzes the state of the existing topographic and geodetic base and the shortcomings of the State Land Cadastre data, which often contain spatial errors and do not reflect the actual state of land use. Open multispectral satellite data from the Sentinel-2 mission (Copernicus program), aerial survey materials, and QGIS software are determined as the foundation for digital land use models of territorial communities. A concept for forming a digital model of a community's land bank is proposed, which is considered a dynamic multidimensional system rather than a static map. The technological process of creating a digital land use model is described, which includes five key stages (preparatory stage or collection and audit of input data; primary processing stage or formation of a geodatabase; analytical and synthesizing stage (spatial modeling); applied stage (implementation and monitoring)). The integration of geospatial data is considered as a technological process of bringing heterogeneous spatial information (raster remote sensing data, vector cadastral maps, aerial survey results) to a unified coordinate system and topological consistency within a geographic information system (GIS) environment for the purpose of comprehensive modeling and analysis of the territory. A structural and logical scheme for the integration of multi-sensor remote sensing data and cadastral information in a GIS environment is proposed. It is noted that topology rules are applied to eliminate errors in the geometry of objects: checking for overlaps where boundaries of one land plot cross into another, gaps between common boundaries of adjacent plots, and vertex snapping of vector objects to the nodes of the base layer within a specified tolerance. The identification of spatial changes and the structuring of land use were carried out according to the methodology of automated interpretation of Earth Remote Sensing (ERS) data based on the calculation of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which allowed for a clear delineation of vegetation cover from urbanized areas and water bodies based on the spectral brightness of pixels. A digital model of the Rivne territorial community is presented as a multilevel spatial database that contains various objects and ensures their processing, analysis, and visualization for solving tasks of spatial planning, infrastructure management, and environmental protection.

Keywords*: Geographic Information Systems (GIS); Earth Remote Sensing (ERS); digital land use model; overlay analysis; land cadastre; spatial planning; "digital twin".*

Fig.: 3. Table: 1. References: 21.

Кравчук М. О. Інтеграція даних дистанційного зондування землі та геоінформаційних систем у формуванні цифрових моделей землекористування територіальних громад. *Технічні науки та технології*, 2026. № 2(44). С. 600-611. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-600-611.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-612-620
УДК 528.28:521.1:004.42

Роман Олегович Пилипяк[1], Зоряна Романівна Тартачинська[2]

[1]аспірант кафедри геодезії, Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)
E-mail: romanpylypyak97@gmail.com. **ORCID**: https://orcid.org/0009-0007-5430-0112

[2]кандидат 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

ОБЧИСЛЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ КООРДИНАТ СОНЦЯ І МІСЯЦЯ В МОБІЛЬНОМУ НАВІГАЦІЙНОМУ ДОДАТКУ

У роботі представлено алгоритми обчислення горизонтальних координат Сонця та Місяця (азимут і висота над горизонтом), реалізовані в мобільному навігаційному додатку на платформі React Native. Астрономічні обчислення базуються на алгоритмах Meeus та використовують перетворення еліптичних координат в екваторіальні та горизонтальні з урахуванням атмосферної рефракції та місячного паралаксу. Валідація виконана шляхом порівняння обчислених значень із даними NOAA Solar Position Calculator та U.S. Naval Observatory для трьох контрольних пунктів, що представляють різні широтні зони (Львів, Рейк'явік, Ліма). СКП визначення азимута Сонця не перевищує 0,017°, висоти — 0,045°; для Місяця — 0,26° та 0,22° відповідно. Досягнута точність є достатньою для використання в задачах орієнтування на місцевості та верифікації показів магнітного компаса.

***Ключові слова**: астрономічні обчислення, азимут Сонця, положення Місяця, мобільна навігація, орієнтування на місцевості.*

Рис.: 1. Табл.: 6. Бібл.: 17.

Актуальність теми досліджень. Задачі орієнтування на місцевості та визначення напрямків є фундаментальними для навігаційних систем. Сучасні мобільні пристрої оснащені магнітометрами, проте їхні покази суттєво залежать від електромагнітних перешкод навколишнього середовища. Експериментальне дослідження точності визначення напряму на північ за допомогою різних типів магнітних компасів [1] показало, що середня похибка наведення для польових компасів становить близько 1°, для планшетних — до 1°36′. Навіть геодезичні бусолі, що мають найвищу точність серед досліджених приладів, забезпечують похибку 30–40′. Водночас залежність від глобальних навігаційних супутникових систем стає дедалі вразливішою. За даними Міжнародної асоціації повітряного транспорту кількість випадків втрати й підміни супутникових сигналів постійно зростає [2]. Особливо гостро ця проблема відчувається в Україні та прилеглих регіонах, де активна робота засобів радіоелектронної боротьби унеможливлює стабільне використання супутникової навігації. Одним із підходів до підвищення надійності визначення напрямку є використання астрономічних методів орієнтування. Якщо для заданого моменту часу та географічних координат обчислити азимут і висоту Сонця чи Місяця над горизонтом, ці дані можуть бути використані як незалежне джерело інформації про напрямок — зокрема для верифікації та калібрування магнітного компаса. Алгоритми обчислення положення Сонця, описані в класичній роботі [3] та реалізовані у вигляді Solar Position Algorithm (SPA) [4], забезпечують точність ±0,0003° і є широко визнаним стандартом у сонячній енергетиці та метрології. Однак їх застосування у контексті мобільної навігації та пішохідного орієнтування залишається малодослідженим, попри те, що сучасні смартфони мають достатню обчислювальну потужність для виконання відповідних розрахунків у реальному часі.

Постановка проблеми. У багатьох випадках точність орієнтування є критичною — похибки навіть у кілька градусів можуть суттєво відхилити від запланованого маршруту. Як було показано [1], похибки наведення магнітних компасів становлять від 0,5° до 1,5°. При цьому точність визначення магнітного схилення залежить насамперед від похибки наведення магнітної стрілки на північ [5], що обмежує можливості компасного орієнтування. Дослідження можливості використання вбудованих сенсорів смартфона для вимі-

© Р. О. Пилипяк, З. Р. Тартачинська, 2026

рювання кутів [6] також підтвердило, що найбільші похибки виникають саме при визначенні горизонтальних кутів за допомогою магнітометра внаслідок електромагнітних перешкод навколишнього середовища. Ці результати підтверджують доцільність використання астрономічних методів орієнтування як альтернативного джерела інформації про напрямок. Критичність цієї задачі підсилюється у контексті пішохідної навігації (Pedestrian Dead Reckoning), де похибка визначення напрямку накопичується з кожним кроком. Як показано в роботі [7], навіть похибка в 10° призводить до зміщення у 1,74 м на кожні 10 м шляху. Тому наявність додаткового астрономічного джерела верифікації напрямку, що працює автономно на мобільному пристрої є практично доцільною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Алгоритми обчислення положення небесних світил мають тривалу історію розвитку. Фундаментальною роботою в цій галузі є книга «Astronomical Algorithms» [3], яка систематизувала алгоритми обчислення положення Сонця, Місяця та планет на основі теорії VSOP87. Для обчислення координат Місяця в роботі [3] використано скорочений варіант теорії ELP-2000/82 [8], що включає 59 періодичних членів у довготі та 30 у широті, забезпечуючи точність приблизно 10″ у довготі та 4″ у широті. На основі алгоритмів [3] було розроблено кілька спеціалізованих реалізацій різної точності й обчислювальної складності: створено Solar Position Algorithm (SPA) [4], який забезпечує точність ±0,0003° для періоду від 2000 р. до н.е. до 6000 р. н.е. і став стандартом у сонячній метрології; запропоновано PSA-алгоритм [10], оптимізований для мікропроцесорів з обмеженими ресурсами, з точністю 0,5′ для періоду 1999–2015 рр.; його було оновлено для періоду 2020–2050 рр. зі зменшенням середньої похибки на 25 % [11]; запропоновано алгоритм проміжної точності (максимальна похибка 0,0027°) з низькою обчислювальною складністю [12]. У сфері навігації обчислення азимута Сонця традиційно використовується на морських суднах для визначення похибки компаса [13], а також в інженерній геодезії для орієнтування під час розмічування на місцевості. Проблема надійності супутникової навігації стає дедалі гострішою: за даними IATA у період 2021–2024 рр. кількість випадків втрати GPS-сигналу зросла на 220 % [2], що актуалізує пошук альтернативних методів орієнтування. Щодо мобільних реалізацій, існує низка комерційних додатків для відстеження положення Сонця та Місяця (Sun Surveyor, PhotoPills, SunQuest та інші), проте їхні алгоритми зазвичай не документовані у наукових публікаціях, а точність не порівнювалась з еталонними джерелами. Більшість цих додатків орієнтовані на фотографію та ландшафтне планування, а не на навігаційні задачі.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри наявність широкого спектра високоточних алгоритмів обчислення положення Сонця [4; 10; 12], більшість із них розроблялися та валідувалися для задач сонячної енергетики та метрології, а не для навігаційних застосувань. Особливо бракує досліджень, що поєднували б: 1) реалізацію повного циклу обчислень координат як Сонця, так і Місяця у єдиному мобільному додатку; 2) порівняння отриманих результатів з незалежними еталонними джерелами (NOAA Solar Position Calculator, U.S. Naval Observatory); 3) оцінку придатності досягнутої точності саме для навігаційних задач — верифікації магнітного компаса та орієнтування на місцевості. Також недостатньо вивчено можливість автономної роботи таких алгоритмів на мобільному пристрої, що є критичною вимогою для використання в умовах обмеженого зв'язку.

Мета дослідження. Метою цієї роботи є реалізація та валідація алгоритмів обчислення горизонтальних координат Сонця і Місяця у мобільному навігаційному додатку. Запропонований модуль обчислює азимут і висоту світил для довільних географічних координат та моменту часу, не потребуючи мережевого з'єднання.

Виклад основного матеріалу. Визначення горизонтальних координат небесного світила (азимуту A та висоти h) для заданого моменту часу та географічного положення спостерігача виконується у три етапи відповідно до методики, викладеної у [3]:

1) обчислення еліптичних координат світила – довготи λ та широти β у площині екліптики;

2) перетворення в екваторіальну систему – пряме сходження α та схилення δ з урахуванням нахилу екліптики;

3) перетворення в горизонтальну систему – азимут A та висота h через часовий кут.

Вхідними параметрами є: момент спостереження у форматі UTC, географічна широта φ та довгота L спостерігача. З моменту UTC обчислюється юліанська дата JD та столітній параметр T — кількість юліанських століть від епохи J2000.0 (1 січня 2000, 12:00 UTC):

$$T = \frac{JD - 2451545.0}{36525}. \quad (1)$$

Місцевий зоряний час LST обчислюється за поліноміальним виразом з роботи [14] з подальшим додаванням довготи спостерігача $LST = \theta + L$.

Визначення положення Сонця. Еліптична довгота Сонця обчислюється через середню довготу L_0 та середню аномалію M, які є поліноміальними функціями від T. Рівняння центру C враховує ексцентриситет земної орбіти і обчислюється з виразу:

$$C = (1{,}9146 - 0{,}004817\ T)\ \sin M + 0{,}019993 \sin 2M + 0{,}00029 \sin 3M \quad (2)$$

Еліптична довгота визначається як $\lambda = L_0 + C$.

Оскільки Сонце рухається практично в площині екліптики, еліптична широта $\beta \approx 0$.

Перетворення в екваторіальні координати виконується з урахуванням нахилу екліптики ε, представленого в роботі [15]:

$$\sin\delta = \sin\beta \cdot \cos\varepsilon + \cos\beta \cdot \sin\varepsilon \cdot \sin\lambda \quad (3)$$

$$\tan\alpha = \frac{\sin\lambda \cdot \cos\varepsilon - \tan\beta \cdot \sin\varepsilon}{\cos\lambda} \quad (4)$$

Для отримання горизонтальних координат спочатку обчислюється часовий кут

$$H = LST - \alpha \quad (5)$$

Після чого знаходять висоту світила h та його азимут A:

$$\sin h = \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos H \quad (6)$$

$$\tan A = \frac{\sin H}{\cos H \cdot \sin\varphi - \tan\delta \cdot \cos\varphi} \quad (7)$$

Корекцію атмосферної рефракції виконують за формулою, наведеною в [9], що враховує поправку до геометричної висоти:

$$\Delta h \approx \frac{1.02'}{\tan\left(h + \frac{10.3}{h + 5.11}\right)} \quad (8)$$

Ця корекція є суттєвою при малих висотах світила над горизонтом.

Визначення положення Місяця. Обчислення координат Місяця є значно складнішим, ніж для Сонця, оскільки його рух суттєво залежить від гравітаційних збурень з боку Сонця та нерівномірностей гравітаційного поля Землі. Для опису орбіти використовують п’ять основних кутових параметрів, які є поліноміальними функціями від параметра: L' – середня довгота Місяця; D – середня елонгація; M – середня аномалія Сонця; M' – середня аномалія Місяця; F – аргумент широти Місяця.

Еліптична довгота Місяця визначається як сума середньої довготи L' та десяти періодичних членів, кожен з яких є тригонометричною функцією лінійних комбінацій зазначених параметрів. Еліптична широта визначається п’ятьма членами ряду.

Після визначення екліптичних координат Місяця їх перетворюють в екваторіальні та горизонтальні координати за формулами (3), (4), (6), (7), аналогічно до алгоритму для Сонця.

На відміну від Сонця, для Місяця необхідно враховувати горизонтальний паралакс – зміщення видимого положення світила, який виникає через те, що спостерігач знаходиться не в центрі Землі, а на її поверхні. Горизонтальний паралакс π залежить від відстані до Місяця та радіуса Землі і становить приблизно 0,95°.

Поправка до висоти Місяця (корекція висоти) визначається за формулою

$$h' = h - \pi \cdot \cos h \quad (9)$$

Реалізація та валідація. Алгоритми реалізовано мовою TypeScript у вигляді трьох модулів: sunCalc.ts (положення Сонця), moonCalc.ts (положення Місяця) та utils.ts (спільні функції). Модулі інтегровано в мобільний додаток на платформі React Native. Усі обчислення виконуються локально на пристрої без потреби у мережевому з'єднанні. На рис. 1 наведено скріншоти мобільного застосунку, що використовується для обчислення азимуту та висоти небесних світил у цьому дослідженні.

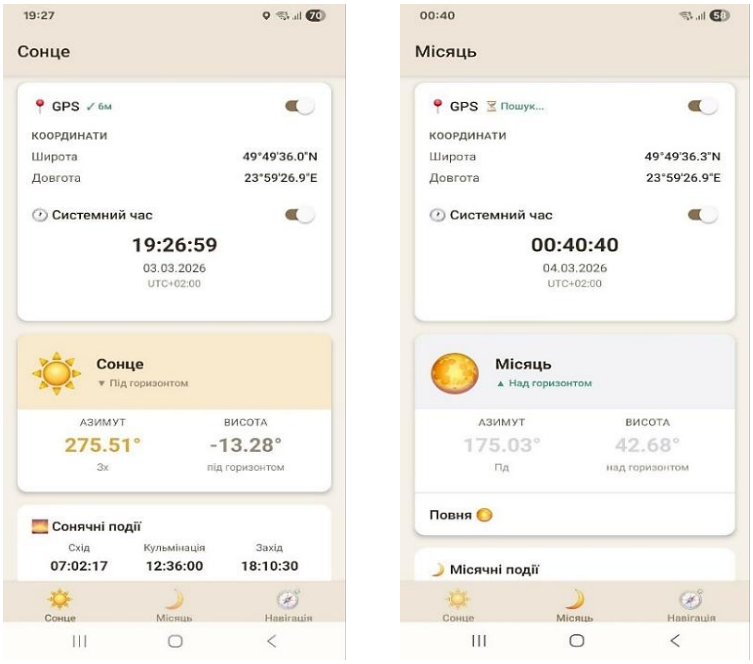


Рис. 1. Скриншоти мобільного застосунку

Джерело: розроблено авторами.

Результати визначення значень азимутів та висоти небесних світил за допомогою мобільного застосунку порівнювались із двома незалежними еталонними джерелами: NOAA Solar Position Calculator [16] для Сонця та U.S. Naval Observatory Altitude/Azimuth Table [17] для Місяця.

Валідацію проведено для трьох контрольних пунктів, що охоплюють різні широтні зони: м. Львів (Україна, 49°50′ N, 24°00′ E), м. Ліма (Перу, 12°03′ S, 77°02′ W) та м. Рейк'явік (Ісландія, 64°08′ N, 21°54′ W). Такий вибір дозволяє перевірити коректність алгоритмів у широкому діапазоні геометричних умов. Львів представляє помірні широти, Ліма — приекваторіальні умови Південної півкулі, де Сонце проходить поблизу зеніту, а Рейк'явік — високі північні широти, де Сонце і Місяць тривалий час перебувають на малих висотах над горизонтом.

Результати для Львова. Обчислення горизонтальних координат Сонця і Місяця для Львова виконувались протягом 27–28 лютого 2026 р. у різний час доби, що забезпечило різноманітність положень світил на небесній сфері. Порівняння обчислених координат

Сонця в навігаційному додатку (A додаток, h додаток) з даними NOAA, які були прийняті за еталонні (A еталон, h еталон) представлено в табл. 1. Результати порівняння демонструють високу точність обчислень. Абсолютне відхилення визначеного азимута від еталона не перевищує 0,04°, висоти — 0,03°. Відхилення є рівномірно малими для всіх спостережень незалежно від висоти Сонця над горизонтом.

Таблиця 1 — Порівняння обчислених координат Сонця з даними NOAA (Львів)

№	Дата	Час UTC	A додаток	h додаток	A еталон	h еталон	ΔA	Δh
1	27.02.2026	14:00	203,75	29,20	203,75	29,19	0,00	+0,01
2	27.02.2026	15:00	219,39	24,15	219,39	24,14	0,00	+0,01
3	27.02.2026	16:00	233,40	17,18	233,40	17,17	0,00	+0,01
4	27.02.2026	17:00	246,02	8,89	246,02	8,88	0,00	+0,01
5	27.02.2026	20:00	280,87	−19,58	280,86	−19,59	+0,01	+0,01
6	28.02.2026	08:00	111,18	7,12	111,20	7,10	−0,02	+0,02
7	28.02.2026	12:00	169,34	31,77	169,30	31,80	+0,04	−0,03

Джерело: розроблено авторами.

Порівняння обчислених координат Місяця в навігаційному додатку з даними USNO, які були прийняті за еталонні представлено в табл. 2. Для Місяця похибки дещо більші, що є очікуваним з огляду на складність місячної орбіти та використання скороченого ряду збурень. Максимальне відхилення азимута становить 0,2° і спостерігається при великих значеннях азимута (240–288°). Похибка висоти є стабільно низькою – не перевищує 0,1°.

Таблиця 2 – Порівняння обчислених координат Місяця з даними USNO (Львів)

№	Дата	Час UTC	A додаток	h додаток	A еталон	h еталон	ΔA	Δh
1	27.02.2026	14:00	59,2	7,7	59,1	7,8	+0,1	−0,1
2	27.02.2026	15:00	69,4	15,9	69,3	16,0	+0,1	−0,1
3	27.02.2026	16:00	79,5	24,8	79,4	24,9	+0,1	−0,1
4	27.02.2026	17:00	90,2	34,0	90,0	34,1	+0,2	−0,1
5	27.02.2026	20:00	136,2	59,5	136,1	59,6	+0,1	−0,1
6	28.02.2026	00:00	240,4	52,5	240,6	52,6	−0,2	−0,1
7	28.02.2026	04:00	288,1	15,7	288,3	15,8	−0,2	−0,1

Джерело: розроблено авторами.

На основі порівняння визначених координат Сонця і Місяця з еталонними значеннями проведено оцінку точності, результати якої наведено в табл. 3 у вигляді середніх (Mean), максимальних (Max) та середньоквадратичних похибок (СКП).

Таблиця 3 – Статистичні показники похибок для Сонця і Місяця (Львів)

Параметр	Mean, °	Max, °	СКП, °	Mean, °	Max, °	СКП, °
	Сонце			Місяць		
Азимут	0,010	0,040	0,017	0,14	0,20	0,15
Висота	0,014	0,030	0,016	0,10	0,10	0,10

Джерело: розроблено авторами.

Результати для Ліми. Визначення координат для Ліми виконувались 3 березня 2026 р. Кульмінаційні висоти Сонця сягали 82,66°. Аналогічно як для Львова виконувалось порівняння обчислених координат Сонця в навігаційному додатку з еталонними даними NOAA. Абсолютне відхилення азимута Сонця для Ліми не перевищує 0,02°, висоти — 0,09°. Навіть для спостереження о 12:00 UTC, коли Сонце перебувало майже в зеніті, відхилення азимута становить лише 0,01°, що підтверджує стійкість алгоритму.

Для Місяця в Лімі максимальне відхилення азимута становить 0,3°, висоти — також 0,3° (при висоті Місяця 69,7°, тобто знову поблизу зеніту). СКП азимуту Місяця для Ліми (0,26°) є найбільшою серед усіх шести наборів даних, що пов'язано як зі складністю місячної орбіти, так і з екваторіальними умовами спостережень.

Оцінка точності результатів порівняння обчислених в додатку значень азимута та висоти Сонця і Місяця з еталонними величинами представлена в табл. 4.

Таблиця 4 — Статистичні показники похибок для Сонця і Місяця (Ліма)

Параметр	Mean, °	Max, °	СКП, °	Mean, °	Max, °	СКП, °
	Сонце			Місяць		
Азимут	0,007	0,020	0,010	0,26	0,30	0,26
Висота	0,017	0,090	0,035	0,14	0,30	0,16

Джерело: розроблено авторами

Результати для Рейк'явіка. Обчислення горизонтальних координат Сонця і Місяця для Рейк'явіка виконувались 1 березня 2026 р. у різний час доби. Результати порівняння обчислених координат Сонця в Рейк'явіку з еталонними демонструють практично нульові відхилення азимута: максимальне відхилення становить 0,01°. Для висоти відхилення також залишаються малими, хоча для спостережень із від'ємною висотою Сонця вони зростають до 0,04–0,11°. СКП азимуту Сонця для Рейк'явіка становить 0,007°, а висоти — 0,045°.

Для Місяця в Рейк'явіку похибки визначення азимута не перевищують 0,15°, що є меншим, ніж для Львова та Ліми. Водночас похибки висоти стабільно від'ємні й досягають 0,3°, унаслідок чого СКП висоти становить 0,22°. Таким чином, саме набір даних для Рейк'явіка виявився найкритичнішим для визначення висоти Місяця.

Оцінка точності результатів представлена в табл. 5.

Таблиця 5 — Статистичні показники похибок для Сонця і Місяця (Рейк'явік)

Параметр	Mean, °	Max, °	СКП, °	Mean, °	Max, °	СКП, °
	Сонце			Місяць		
Азимут	0,004	0,010	0,007	0,10	0,15	0,10
Висота	0,029	0,110	0,045	0,21	0,30	0,22

Джерело: розроблено авторами.

Порівняльний аналіз результатів для всіх трьох пунктів спостереження (табл. 6) свідчить про те, що алгоритм для Сонця забезпечує значно вищу точність, ніж для Місяця, що пояснюється використанням повнішого набору членів ряду для обчислень та простішою геометрією руху Сонця порівняно з Місяцем.

Таблиця 6 – СКП для всіх наборів даних

Пункт спостереження	СКП азимуту, °	СКП висоти, °	СКП азимуту, °	СКП висоти, °
	Сонце		Місяць	
Львів (Україна, 49°50′ N, 24°00′ E),	0,017	0,016	0,15	0,10
Ліма (Перу, 12°03′ S, 77°02′ W)	0,010	0,035	0,26	0,16
Рейк'явік (Ісландія, 64°08′ N, 21°54′ W)	0,007	0,045	0,10	0,22

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. У роботі реалізовано та валідовано алгоритми обчислення горизонтальних координат Сонця та Місяця (азимут і висота над горизонтом) для мобільного навігаційного додатка на платформі React Native. Алгоритми базуються на методиці [3] та виконують повний цикл перетворень еліптичних координат в екваторіальні та горизонтальні з урахуванням атмосферної рефракції для Сонця та місячного паралаксу.

Для трьох контрольних пунктів — м. Львів, м. Ліма та м. Рейк'явік — проведено порівняння обчислених значень із незалежними еталонними джерелами: NOAA Solar Position Calculator для Сонця та U.S. Naval Observatory для Місяця.

Отримані результати свідчать про високу точність реалізованих алгоритмів. . СКП визначення азимуту Сонця не перевищує 0,017°, висоти — 0,045°. Для Місяця СКП азимуту досягає 0,26° (Ліма), висоти — 0,22° (Рейк'явік), що пов'язано з використанням скороченого ряду збурень. Навіть найбільші зафіксовані похибки залишаються меншими за похибки магнітних приладів [1], а точність визначення азимута Сонця перевищує точність магнітних компасів у десятки разів (0,017° проти ~0,5°), що відкриває можливості використання обчисленого азимута Сонця як основного джерела інформації про напрямок за умови візуальної видимості.

Практична цінність розробленого модуля полягає в тому, що він забезпечує автономне визначення еталонного напрямку в умовах, де магнітний компас є ненадійним (сильні електромагнітні перешкоди, магнітні аномалії, деградоване навігаційне середовище), а супутникова навігація — недоступною через глушіння або відсутність сигналу. Це є особливо актуальним у сучасних умовах, коли кількість випадків навмисного глушіння GPS-сигналу зростає щороку.

У перспективі планується інтеграція астрономічного модуля мобільного додатку з системою орієнтування на основі гіроскопа, акселерометра та магнітометра смартфона для створення повноцінної автономної системи Pedestrian Dead Reckoning, яка дозволить визначати поточний напрямок руху та місце розташування користувача без залежності від мережевого з'єднання та супутникової навігації.

Список використаних джерел

1. Тартачинська З. Р., Пилипяк Р. О. (2025). Точність визначення напряму на північ для різних типів компасів. *Технічні науки та технології*, 4(42), 572–580.

2. International Air Transport Association. (2024). *GNSS interference report*. https://www.iata.org

3. Meeus, J. (1998). *Astronomical algorithms* (2nd ed.). Willmann-Bell.

4. Reda, I., & Andreas, A. (2004). *Solar position algorithm for solar radiation applications*. *Solar Energy*, 76(5), 577–589. https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.003.

5. Перій, С., Тартачинська, З., & Пилипяк, Р. (2025). *Визначення магнітного схилення геодезичним методом* (с. 68–70). https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2025/04/ТЕЗИ_ГЕОФОРУМ.

6. Sampaio, L. F., Bandeira, A. L., Veiga, L. A. K., & Alves, S. S. O. (2022). *Feasibility of using data from sensors embedded in smartphones to measure angles and distances*. *Revista Brasileira de Cartografia*, 74(4). https://doi.org/10.14393/rbcv74n4-65814.

7. Borenstein, J., Everett, H. R., & Feng, L. (1996). *Where am I? Sensors and methods for mobile robot positioning*. University of Michigan.

8. Chapront-Touzé, M., & Chapront, J. (1983). The lunar ephemeris ELP 2000. *Astronomy and Astrophysics*, 124, 50–62.

9. Bennett, G. G. (1982). The calculation of astronomical refraction in marine navigation. *Journal of Navigation*, 35(2), 255–259. https://doi.org/10.1017/S0373463300022037.

10. Blanco-Muriel, M., Alarcón-Padilla, D. C., López-Moratalla, T., & Lara-Coira, M. (2001). Computing the solar vector. *Solar Energy*, 70(5), 431–441. https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00156-0.

11. Blanco, M., Milidonis, K., & Bonanos, A. M. (2020). Updating the PSA sun position algorithm. *Solar Energy*, 212, 339–341. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.084.

12. Grena, R. (2008). An algorithm for the computation of the solar position. *Solar Energy*, 82(5), 462–470. https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.10.001.

13. Blewitt, M. (1997). *Celestial navigation for yachtsmen* (11th ed.). Adlard Coles Nautical.

14. Aoki, S., Guinot, B., Kaplan, G.H., Kinoshita, H., McCarthy, D.D., Seidelmann, P.K. (1982). The New Definition of Universal Time. *Astronomy and Astrophysics*, 105(2), 359–361.

15. Capitaine, N., Wallace, P. T., & Chapront, J. (2003). *Expressions for IAU 2000 precession quantities*. *Astronomy & Astrophysics*, 412, 567–586. https://doi.org/10.1051/0004-6361:20031539.

16. NOAA Global Monitoring Laboratory. (2024). *Solar position calculator*. https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/azel.html.

17. U.S. Naval Observatory. (2024). *Astronomical applications: Altitude/azimuth table*. https://aa.usno.navy.mil/data/AltAz.

References

1. Tartachynska Z. R., Pylypiak R. O. Tochnist′ vyznachennia napryamu na pivnich dlia riznykh typiv kompasiv [Accuracy of Determining the North Direction for Different Types of Compasses]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical Sciences and Technologies*, *4*(42), 572–580.

2. International Air Transport Association. (2024). *GNSS interference report*. https://www.iata.org

3. Meeus, J. (1998). *Astronomical algorithms* (2nd ed.). Willmann-Bell.

4. Reda, I., & Andreas, A. (2004). *Solar position algorithm for solar radiation applications*. *Solar Energy*, 76(5), 577–589. https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.003.

5. Перій, С., Тартачинська, З., & Пилипяк, Р. (2025). *Визначення магнітного схилення геодезичним методом* (с. 68–70). https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2025/04/ТЕЗИ_ГЕОФОРУМ.

6. Sampaio, L. F., Bandeira, A. L., Veiga, L. A. K., & Alves, S. S. O. (2022). *Feasibility of using data from sensors embedded in smartphones to measure angles and distances*. *Revista Brasileira de Cartografia*, 74(4). https://doi.org/10.14393/rbcv74n4-65814.

7. Borenstein, J., Everett, H. R., & Feng, L. (1996). *Where am I? Sensors and methods for mobile robot positioning*. University of Michigan.

8. Chapront-Touzé, M., & Chapront, J. (1983). The lunar ephemeris ELP 2000. *Astronomy and Astrophysics*, 124, 50–62.

9. Bennett, G. G. (1982). The calculation of astronomical refraction in marine navigation. *Journal of Navigation*, 35(2), 255–259. https://doi.org/10.1017/S0373463300022037.

10. Blanco-Muriel, M., Alarcón-Padilla, D. C., López-Moratalla, T., & Lara-Coira, M. (2001). Computing the solar vector. *Solar Energy*, 70(5), 431–441. https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00156-0.

11. Blanco, M., Milidonis, K., & Bonanos, A. M. (2020). Updating the PSA sun position algorithm. *Solar Energy*, 212, 339–341. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.084.

12. Grena, R. (2008). An algorithm for the computation of the solar position. *Solar Energy*, 82(5), 462–470. https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.10.001.

13. Blewitt, M. (1997). *Celestial navigation for yachtsmen* (11th ed.). Adlard Coles Nautical.

14. Aoki, S., Guinot, B., Kaplan, G.H., Kinoshita, H., McCarthy, D.D., Seidelmann, P.K. (1982). The New Definition of Universal Time. *Astronomy and Astrophysics*, 105(2), 359–361.

15. Capitaine, N., Wallace, P. T., & Chapront, J. (2003). *Expressions for IAU 2000 precession quantities*. *Astronomy & Astrophysics*, 412, 567–586. https://doi.org/10.1051/0004-6361:20031539.

16. NOAA Global Monitoring Laboratory. (2024). *Solar position calculator*. https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/azel.html.

17. U.S. Naval Observatory. (2024). *Astronomical applications: Altitude/azimuth table*. https://aa.usno.navy.mil/data/AltAz.

Дата першого надходження статті до видання: 18.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.03.2026

UDC 528.28:521.1:004.42

Roman Pylypyak[1], Zoryana Tartachynska[2]

[1]Postgraduate Student of the Geodesy Department
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)
E-mail: romanpylypyak97@gmail.com. **ORCID**: https://orcid.org/0009-0007-5430-0112

[2]PhD 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

CALCULATION OF HORIZONTAL COORDINATES OF THE SUN AND THE MOON IN A MOBILE NAVIGATION APPLICATION

The paper presents the development and validation of algorithms for calculating the horizontal coordinates of the Sun and the Moon, namely azimuth and altitude above the horizon, implemented in a mobile navigation application built on the React Native platform. The study is motivated by the need for an autonomous reference direction in conditions where magnetic compasses may be affected by disturbances and satellite navigation may be degraded or unavailable. In these situations, astronomical orientation can provide an independent basis for heading determination and verification of magnetic compass readings. The module performs all calculations locally on the mobile device without network access. The computational procedure is based on the algorithms described by Meeus and includes the transformation of ecliptic coordinates into equatorial and horizontal coordinates. For the Sun, atmospheric refraction is taken into account; for the Moon, the algorithm also includes parallax correction caused by the observer's position on the Earth's surface. The implementation is divided into separate TypeScript modules for solar calculations, lunar calculations, and shared mathematical utilities. Validation was carried out by comparing the computed coordinates with independent reference data. For the Sun, the NOAA Solar Position Calculator was used, while for the Moon the reference values were obtained from the U.S. Naval Observatory tables. The comparison was performed for three control points representing different latitude zones and observation conditions: Lviv, Reykjavik, and Lima. This made it possible to verify the algorithms under moderate latitudes, high northern latitudes, and near-equatorial conditions of the Southern Hemisphere. The obtained results confirm the high accuracy of the developed module. For the Sun, the root mean square error of azimuth equals 0.017° for Lviv, 0.007° for Reykjavik, and 0.010° for Lima, while the corresponding root mean square errors of altitude are 0.016°, 0.045°, and 0.035°, respectively. Even in Lima, where the solar altitude reached 82.66°, the azimuth error did not exceed 0.02°, which confirms the stability of the implemented algorithm near the zenith. For the Moon, the errors are higher because the implemented model uses a shortened series of perturbation terms compared with complete high-precision lunar theories. The root mean square error of lunar azimuth equals 0.15° for Lviv, 0.10° for Reykjavik, and 0.26° for Lima, while the corresponding root mean square errors of altitude are 0.10°, 0.22°, and 0.16°. The maximum lunar azimuth error was observed for Lima, whereas the maximum lunar altitude error was obtained for Reykjavik. Even these values remain below the typical error range of field magnetic compasses. The validation results show that the developed astronomical module provides sufficient accuracy for terrain orientation, and calibration support in a mobile environment. Its practical value lies in the possibility of using celestial bodies as reference objects where GNSS signals are unavailable or magnetic measurements are unreliable. The proposed solution can be integrated into autonomous pedestrian navigation systems based on smartphone sensors.

Keywords: *astronomical calculations; solar azimuth; lunar position; mobile navigation; terrain orientation.*
Fig.: 1. Table: 6. References: 17.

Пилипяк Р. О., Тартачинська З. Р. Обчислення горизонтальних координат Сонця і Місяця в мобільному навігаційному додатку. *Технічні науки та технології*, 2026. № 2(44). С. 612-620. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-612-620.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-621-629
УДК 528. 481; 528.06

Остап-Михайло Володимирович Серант
Кафедра вищої геодезії та астрономії
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)
E-mail: ostap-mykhailo.v.serant@lpnu.ua. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-6150-3280

МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ ДАНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ РЕФЕРЕНЦНИХ ГНСС СТАНЦІЙ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДЕФОРМАЦІЙ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

У статті подано методику підготовки, формування та опрацювання добових RINEX-даних референцних ГНСС-станцій для визначення параметрів деформацій земної поверхні. Використано 44 референцних ГНСС-станцій мережі GeoTerrace за період 01.01.2017 – 16.03.2024. Дані проходять контроль повноти, точності та стабільності спостережень, опрацьовуються в програмному комплексі GipsyX методом точного позиціонування (PPP), унаслідок чого отримано координати в ITRF2014 (епоха 2024) які перетворені в систему ETRF2014. Для вибраної мережі за координатами станцій створено тріангуляцію Делоне (47 трикутників) і для центру кожного трикутника визначено параметри деформацій (дилатація, відносний зсув, максимальний стиск або розтяг, обертання),це дає основу для аналізу просторової неоднорідності деформації поверхні та подальшої геодинамічної інтерпретації.

Ключові слова: *ГНСС спостереження; GipsyX; ITRF2014; ETRF2014; часові ряди координат; вектори швидкостей; точне позиціонування (PPP); тріангуляція Делоне; деформації земної кори.*
Рис.: 3. Табл.: 4. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. ГНСС-мережі референцних станцій забезпечують неперервні часові ряди координат і дозволяють кількісно оцінювати сучасні рухи та деформації земної поверхні. Сучасні задачі геодинамічного моніторингу та моніторингу інженерних споруд потребують послідовної технології підготовки й опрацювання даних референцних ГНСС-станцій, оскільки саме довготривалі часові ряди координат відображають як повільні трендові зміщення, так і короткочасні аномалії, що формують деформаційні індикатори земної поверхні. Метод /Precise Point Positioning/ був описаний як ефективний підхід для опрацювання спостережень великих мереж без побудови відносних векторів і забезпечує отримання добових розв'язків координат, придатних для оцінювання швидкостей та подальшого деформаційного аналізу [1]. Достовірність таких результатів залежить від узгодженого застосування глобальної системи відліку та точних продуктів міжнародних сервісів; внесок IGS у реалізацію ITRF2014 визначає принципову основу для порівнюваності результатів між різними наборами даних і часовими інтервалами [2]. Для забезпечення метрологічної коректності опрацювання необхідно використовувати стандартизовані моделі та процедури (припливні ефекти, релятивістські поправки, параметри орієнтації Землі тощо), які регламентуються IERS Conventions (2010) [3], а також точні тропосферні моделі [4]. Таким чином, технологія підготовки даних і єдність моделей опрацювання прямо визначає якість швидкісних оцінок і похідних деформаційних параметрів.

ГНСС-часові ряди мають складну шумову структуру та сезонні компоненти, які впливають на оцінювання швидкостей і можуть маскувати слабкі деформаційні сигнали. Класичні дослідження показують наявність комбінації шуму в щоденних координатних розв'язках і демонструють, що ігнорування реалістичних шумових моделей призводить до завищення точності трендів та неоднозначної інтерпретації результатів [5, 6]. У задачах деформаційного аналізу додатковий ризик створює перехід від точкових швидкостей до площинних деформаційних полів: сегментні підходи на основі триангуляції (зокрема Делоне) є простими для реалізації, але мають підвищену чутливість до похибок вихідних швидкостей і потребують ретельної попередньої фільтрації та контролю якості [7]. Практичні дослідження локальних деформацій на трикутниках показують, що навіть у тектонічно стабільних регіонах нестабільність окремих станцій здатна суттєво спотворювати деформаційні оцінки, тому саме етапи підготовки та верифікації даних визначають на-

© О.-М. В. Серант, 2026

дійність кінцевих параметрів деформації [8]. Отже, розроблення та опис методики підготовки даних опрацювання референцних ГНСС-спостережень є актуальним, оскільки воно забезпечує відтворюваний перехід від «сирих» добових файлів до кількісних параметрів деформацій, придатних для подальшої геодинамічної інтерпретації.

Постановка проблеми. Необхідно створити послідовну методику переходу від великого масиву добових ГНСС-спостережень референцних станцій до кількісних параметрів деформацій земної поверхні, які придатні для геодинамічної інтерпретації. Добові RINEX-файли формують неоднорідні за якістю часові ряди, тому технологія підготовки даних повинна включати контроль повноти, стабільності спостережень і виявлення аномалій, оскільки ці чинники безпосередньо впливають на оцінювання швидкостей [5; 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Опрацювання ГНСС-даних у геодинаміці зводиться до двох послідовних задач: формування однорідних координатних часових рядів і швидкостей у стабільній системі відліку та перетворення цих швидкостей у деформаційні індикатори, що відображають просторові рухи. Метод PPP /Precise Point Positioning/ забезпечує опрацювання великих мереж із використанням точних орбіт і годинників та формування добових розв'язків без побудови відносних векторів [1], а порівнюваність швидкостей між епохами визначається узгодженістю ITRF/IGS і застосуванням стандартизованих моделей редукцій (IERS Conventions) та коректного моделювання тропосфери (наприклад, VMF1) [2–4, 9]. Оскільки ГНСС-часові ряди містять сезонні компоненти та поєднання білого і корельованого шуму, оцінювання швидкостей потребує реалістичних моделей невизначеностей, а якість підготовки даних прямо впливає на стабільність трендів [5, 6]. Для деформаційного аналізу з дискретних швидкостей застосовують різні підходи, серед яких тріангуляція Делоне є зручною для локальної оцінки тензора деформацій на елементарних ділянках, але вимагає контролю надійності через чутливість до геометрії мережі та похибок швидкостей [7,8]. Отже, сучасний стан досліджень формує чіткий висновок: деформаційний аналіз є коректним лише тоді, коли він спирається на однорідно підготовлені дані та на швидкості з адекватними похибками, отриманими з урахуванням шумових властивостей ряду.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У сучасних публікаціях широко описуються методи точного позиціонування та загальні принципи формування ГНСС-часових рядів, однак недостатньо системно представлено саме технологічний ланцюг підготовки даних**,** який забезпечує відтворюваний перехід від добових файлів спостережень до деформаційних показників земної поверхні.

Практично важливі етапи (контроль повноти і стабільності, узгодження вхідних продуктів, відбір станцій, фіксація проміжних результатів) часто описуються фрагментарно, тому опрацювання складно повторити для іншої мережі або інтервалу. Отже, невирішеною частиною загальної проблеми залишається методика, яка на прикладі показує етапи підготовки даних референцних ГНСС-станцій, прецизійного опрацювання, оцінювання швидкостей і розрахунку деформацій у локальних елементарних ділянках з обов'язковим контролем якості та відтворюваності результатів.

Мета дослідження полягає у формуванні відтворюваної технології підготовки та опрацювання добових спостережень референцних ГНСС-станцій, яка забезпечує отримання однорідних часових рядів координат і надійних оцінок швидкостей зміщення земної поверхні. Дослідження демонструє типові вихідні та проміжні продукти опрацювання і приклад їх використання в деформаційному аналізі шляхом формування елементарних ділянок за тріангуляцією Делоне та обчислення деформаційних характеристик для вибраних трикутників.

Виклад основного матеріалу.

1. Вихідні дані та попередня підготовка.

Вихідними даними слугують добові файли спостережень у форматі RINEX за період з 1 січня 2017 року по березень 2024 року, що містять фазові та кодові вимірювання, а

також допоміжні навігаційні та антенні відомості. До аналізу залучаються 44 станції мережі GeoTerrace, розташовані у західній Україні та суміжних регіонах Польщі й Румунії (рис. 1, табл. 1).

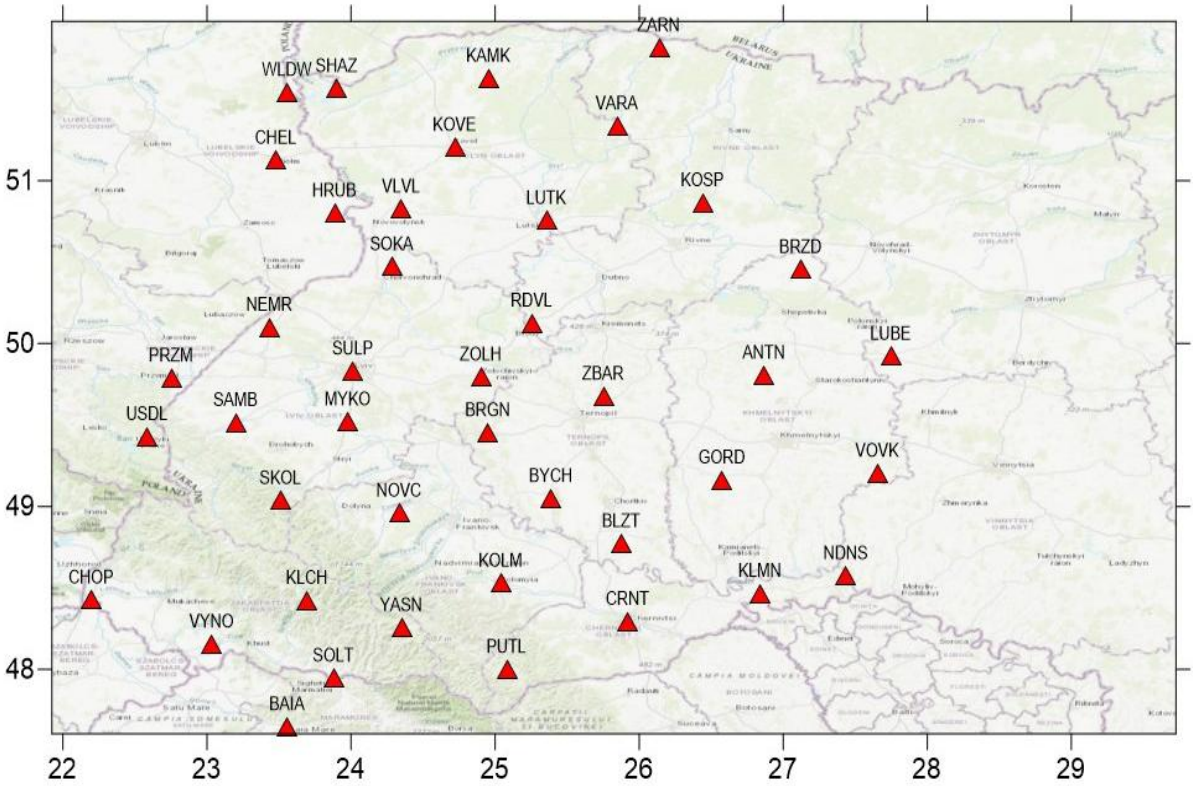


Рис. 1. Розташування ГНСС станцій мережі Geo Terrace вибраних для опрацювання
Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 1 – Розподіл станцій за територією

Територія	Кількість станцій
Західна Україна	37
Польща	5
Румунія	2
Разом	44

Джерело: розроблено авторами.

На етапі підготовки дані впорядковуються за станціями та датами, перевіряється повнота добових файлів і наявність пропусків, а також фіксуються можливі аномалії, які впливають на стабільність часових рядів (стрибки, викиди, перерви у спостереженнях). Така попередня процедура забезпечує контроль якості вхідної інформації та зменшує ризик появи локальних похибок у швидкостях і деформаційних оцінках, що є критичним для подальшого деформаційного аналізу за нерегулярною мережею пунктів. Більшість станцій демонструє повноту спостережень на рівні 90–95 %, але окремі пункти мають недостатню кількість даних, такі станції не беруться для подальшого дослідження.

2. Опрацювання RINEX-даних у GipsyX методом PPP та приведення координат до ETRF2014.

Після сортування та контролю якості добові RINEX-файли опрацьовуються у програмному комплексі GipsyX, який реалізує прецизійні схеми супутникового позиціонування для наукових та прикладних задач геодезії. GipsyX орієнтується на задачі позиціонування, навігації, часу та геодинаміки; він підтримує ГНСС (а також SLR і DORIS) і

реалізує узгоджені моделі та алгоритми оцінювання параметрів у глобальній системі відліку. У практичному застосуванні GipsyX формує добові координатні розв'язки та супровідні статистики якості, а також оцінює параметри моделі (зокрема тропосферні складові) у межах єдиної конфігурації запуску, що підсилює відтворюваність результатів у довгих часових інтервалах [10].

Опрацювання виконується методом точного позиціонування PPP /Precise Point Positioning/, у межах якого координати станції визначаються на основі фазових і кодових вимірювань у поєднанні з точними супутниковими продуктами; такий підхід є придатним для довготривалих мереж, оскільки забезпечує однорідні добові розв'язки без залежності від вибору опорної станції, а отже підтримує надійне оцінювання лінійних трендів (швидкостей), які далі використовуються як основа деформаційних показників [1]. Приклад застосування точного позиціонування для мережі GeoTerrace з подальшим аналізом сучасних горизонтальних рухів демонструється у [13], а попередня верифікація та відбір станцій як елемент підготовки даних висвітлюються у [12].

У результаті PPP-опрацювання формуються добові координатні розв'язки станцій у системі ITRF2014, приведені до епохи 2024 (частину результатів, для прикладу, наведено в табл. 2). Узгодженість результатів у глобальній системі відліку є необхідною умовою коректного порівняння координатних часових рядів і швидкостей у межах регіону та між різними часовими інтервалами [9]. Для коректного визначення параметрів деформацій координати перетворено в ETRF2014 на епоху 2024 (табл. 3). Перетворення виконано за допомогою онлайн-інструмента EPN CB ETRF/ITRF Coordinate Transformation Tool (https://www.epncb.oma.be/_productsservices/coord_trans/), який підтримує трансформацію координат та швидкостей руху між реалізаціями ITRF та ETRF з урахуванням епохи [11].

Таблиця 2 – Координати та швидкості руху референцних ГНСС станцій у системі ITRF2014 (епоха 2024)

Станція	X, м	Y, м	Z, м	Vx, м/рік	Vy, м/рік	Vz, м/рік
ANTN	3679010	1863895	4849448	0.0219	0.0135	-0.0036
BAIA	3945839	1720429	4691083	0.0228	0.0151	0.0028
BLZT	3789086	1838002	4774355	0.0236	0.0135	-0.0040
BRGN	3766420	1752408	4824043	0.0223	0.0140	-0.0006
BRZD	3621398	1854955	4895618	0.0216	0.0143	-0.0030
BYCH	3783671	1795776	4794768	0.0225	0.0134	-0.0023

Джерело: сформовано за результатами опрацювання.

Для забезпечення відтворюваності опрацювання доцільно зберігати такі проміжні продукти: а) добові координатні розв'язки з оцінками невизначеностей; б) узгоджені часові ряди координат у локальній системі (East–North–Up) та параметри їх трендів; в) оцінені модельні параметри (зокрема тропосферні складові) і файли налаштувань/журнали виконання, що дозволяють відтворити конфігурацію запуску, (г) результати трансформації ITRF2014→ETRF2014 із зазначенням епохи. Такий набір проміжних продуктів спрощує контроль якості, інтерпретацію аномалій часових рядів і подальше визначення деформацій на елементарних ділянках (трикутниках) [10; 11; 13].

Таблиця 3 – Координати та швидкості руху референцних ГНСС станцій у системі ETRF2014 (епоха 2024)

Станція	X, м	Y, м	Z, м	Vx, м/рік	Vy, м/рік	Vz, м/рік
ANTN	3679010.89	1863894.3	4849447.5	0.0435	0.0125	0.0101
BAIA	3945840.09	1720428	4691082.6	0.0241	-0.0092	0.0142
BLZT	3789086.35	1838001.2	4774354.6	0.0379	0.0073	0.0788
BRGN	3766420.82	1752407	4824043	0.0276	-0.004	0.0289
BRZD	3621399	1854954.8	4895617.8	0.0472	0.0203	0.1181
BYCH	3783671.94	1795775.2	4794768	0.0366	0.0056	0.0721

Джерело: сформовано за результатами опрацювання.

Після приведення координат до ETRF2014 (епоха 2024) формуються узгоджені часові ряди координат у топоцентричній системі (East–North–Up), для яких оцінюються лінійні тренди та їх невизначеності, що визначають швидкості зміщення станцій. Далі дискретні швидкості пунктів використовуються для побудови просторового деформаційного поля шляхом формування елементарних ділянок за тріангуляцією Делоне та обчислення параметрів деформації для кожного трикутника [7; 8].

4. Тріангуляція Делоне та розрахунок параметрів деформації.

Для переходу від точкових швидкостей до площинного подання деформацій застосовується тріангуляція Делоне, яка формує розбиття мережі станцій на трикутники з властивістю «порожнього описаного кола» та зазвичай мінімізує появу надто витягнутих елементів. Кожен трикутник розглядається як елементарна ділянка, у межах якої поле швидкостей вважається лінійним, що дозволяє локально апроксимувати поле швидкостей лінійною моделлю та обчислювати основні параметри деформацій (дилатацію, зсув, обертання) у центрах трикутників. У прикладних роботах трикутне моделювання широко використовується для локального деформаційного аналізу, але водночас потребує контролю надійності, оскільки чутливе до похибок швидкостей і геометрії мережі; саме тому воно найкраще працює в парі з фільтрацією нестабільних станцій і коректними оцінками невизначеностей швидкостей.

Така геометрія є доцільною для локального деформаційного аналізу на нерегулярній мережі пунктів, оскільки забезпечує природну топологію сусідства між станціями та прозору інтерпретацію результатів у межах елементарних ділянок [7,8]. На рис.2 наведена схема тріангуляції Делоне, сформована за координатами 44 референцних ГНСС-станцій мережі GeoTerrace.

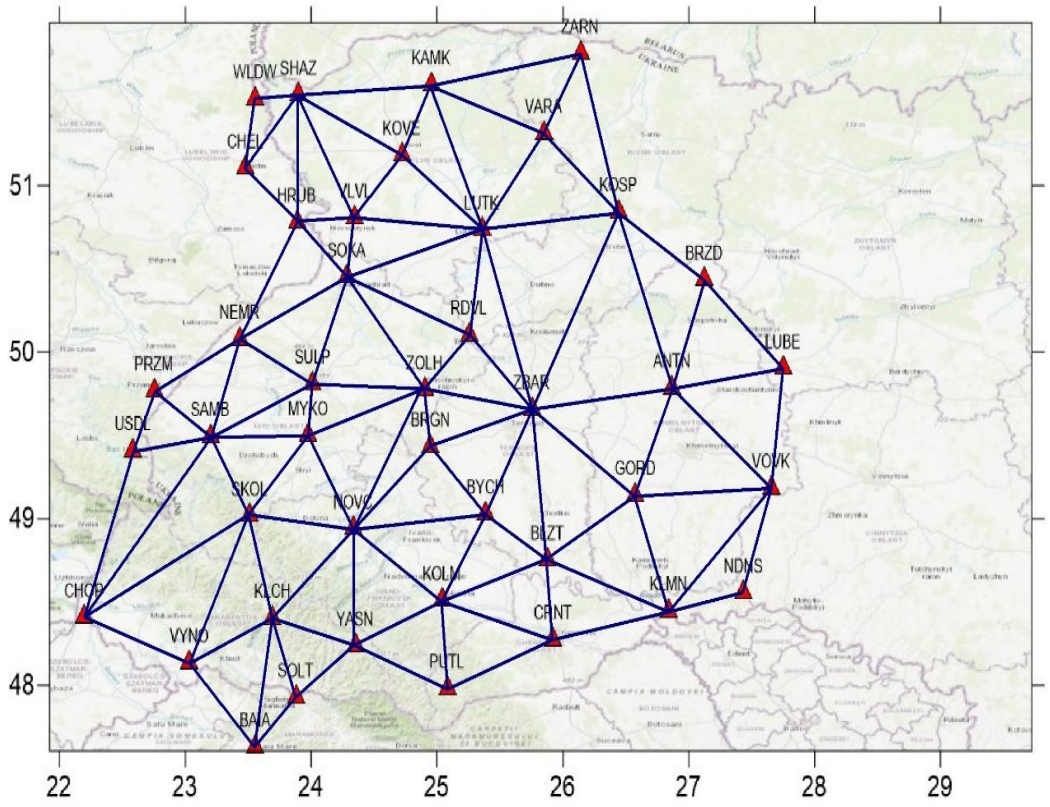


Рис. 2. Тріангуляційна мережа Делоне, сформована за референцними ГНСС-станціями мережі GeoTerrace

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 3, для прикладу, наведено один із трикутників утвореної мережі – трикутник FOLM–PUTL–YASN, який ілюструє елементарну ділянку, для центру якої визначаються параметри деформацій.

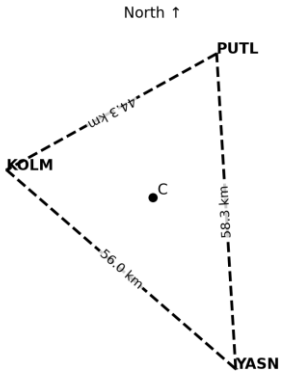


Рис. 3. Приклад елементарного трикутника тріангуляції Делоне (трикутник FOLM–PUTL–YASN) та його центру ***C.***

Джерело: розроблено авторами.

Для кожного трикутника Делоне побудовано окрему геометричну схему, на якій відображено конфігурацію мережі, довжини сторін, орієнтацію відносно півночі та вектори горизонтальних швидкостей ГНСС-станцій (рис. 3). Такі схеми використано для візуального контролю коректності деформаційних розрахунків.

Для кожного трикутника Делоне з вершинами i = 1,2,3 за відомими координатами вершин (Xi, Yi) (у системі (East–North) та горизонтальними швидкостями (Vxi, Vyi , де Vx відповідає складовій на схід (E), а Vy – на північ (N)) обчислено параметри горизонтальних деформації, які належить до обчисленого центру трикутника: відносний зсув γ_1, γ_2, по осях координат X, Y; γ - загальний відносний зсув; дилатація Δ; максимальний і мінімальний стиск, або розтяг E1, E2, (Θ - азимут головної осі деформації E1). Для обчислень γ_1, γ_2, Δ, ω використовуються формули:

$$\gamma_1 = \frac{x_j v_k + y_j u_k - x_k v_j - y_k u_j}{x_j y_k - x_k y_j};$$

$$\gamma_2 = \frac{x_j u_k - y_j v_k - x_k u_j + y_k v_j}{x_j y_k - x_k y_j};$$

$$\Delta = \frac{x_j v_k - y_j u_k - x_k v_j + y_k u_j}{x_j y_k - x_k y_j};$$

$$\omega = \frac{-x_j u_k - y_j v_k + x_k u_j + y_k v_j}{2(x_j y_k - x_k y_j)};$$

$$\gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2};$$

$$\left.\begin{matrix} E_1 \\ E_2 \end{matrix}\right\} = \frac{1}{2}\left[\Delta \pm \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}\right].$$

У написаних рівняннях величини x_j і y_j є приростками координат вершин трикутників 2 і 3 відносно вершини 1, тобто $x_j = X_j - X_i$, $y_j = Y_j - Y_i$ і т. д. Аналогічно: $u_j = Vx_j - Vx_i$, $v_j = Vy_i - Vy_i$...

Азимути напрямків осей головних деформацій визначаються за формулою:

$$tg2\theta_0 = -\frac{\gamma_2}{\gamma_1}.$$

Обчислені швидкості деформацій для кожного з трикутників, відносяться до їх центрів ваги і є безрозмірними величинами, що забезпечує єдину просторову прив'язку результатів і дозволяє надалі будувати карти дилатації/зсуву в центрах елементарних трикутників. Для прикладу в таблиці 4 наведено визначені параметри деформацій для частини трикутників мережі.

Таблиця 4 – Приклад визначених параметрів деформацій за трикутниками Делоне

Трикутник	центр тр. X (м)	центр тр. Y (м)	γ_1 $\cdot 10^{-10}$ /рік	$\gamma_2 \cdot$ 10^{-10} /рік	$\gamma \cdot$ 10^{-10} /рік	$\Delta \cdot$ 10^{-10} /рік	$E_1 \cdot$ 10^{-10} /рік	E_2 $\cdot 10^{-10}$ /рік	E $\cdot 10^{-10}$ /рік	Θ °	$\omega \cdot 10^{-10}$ рад/рік
KOSP–ANTN–BRZD	3637302	1838278	-0.86	1.94	-0.14	1.08	1.95	-0.86	2.81	177.21	-1.5
ANTN–LUBE–BRZD	3647184	1878151	-1.09	2.03	0.60	0.94	2.14	-1.20	3.34	190.60	-2.3
SOLT–VYNO–BAIA	3927409	1706993	-2.77	-0.69	-1.89	-3.47	0.43	-3.89	4.32	149.38	-1.4
VOVK–LUBE–ANTN	3672811	1905795	-3.71	1.15	-0.96	-2.56	1.33	-3.90	5.23	169.28	-1.9
VYNO–KOST–CHOP	3907986	1627544	-0.31	0.51	0.09	0.20	0.52	-0.32	0.84	185.92	-4.9

Джерело: розроблено авторами.

За результатами спостережень швидкостей перманентних ГНСС-станцій мережі GeoTerrace побудовано тріангуляційну схему, яка складається з 47 трикутників Делоне**.** Для центру кожного трикутника визначено параметри деформацій, зокрема відносний зсув γ_1, γ_2; □□- загальний відносний зсув; дилатація □; максимальний і мінімальний стиск, або розтяг E_1, E_2 та параметр обертання ω. Отриманий масив значень формує основу для подальшого аналізу просторової неоднорідності деформацій земної поверхні та їх інтерпретації в контексті сучасних геодинамічних процесів.

Висновки. Запропонована методика забезпечує послідовний і відтворюваний перехід від добових RINEX-даних референцних ГНСС-станцій до кількісних параметрів деформацій земної поверхні на основі контролю повноти, точності та стабільності спостережень.

Дані ГНСС-спостережень опрацьовані у програмному комплексі GipsyX методом точного позиціонування (PPP), що забезпечило формування однорідних координатних розв'язків. Формування координатних часових рядів і векторів швидкостей для 44 станцій за період 01.01.2017–16.03.2024 створило вихідну основу для просторового деформаційного аналізу. Створено мережу із 47 трикутників за принципом Делоне, яка забезпечує локальне подання поля швидкостей, та визначено для цих центрів трикутників дилатацію, відносний зсув, максимальний стиск або розтяг і параметр обертання. Визначені параметри горизонтальних деформацій формують якісну основу для аналізу просторової неоднорідності деформацій земної поверхні та будуть використані для подальшої геодинамічної інтерпретації.

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

Під час підготовки цього матеріалу автор використовув ChatGPT для мовного редагування та структурування викладу. Автор перевірив і відредагував зміст та бере на себе повну відповідальність за результати та інтерпретації, наведені у статті.

Список використаних джерел

1. Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., & Webb, F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102*(B3), 5005–5017. https://doi.org/10.1029/96JB03860.

2. Rebischung, P., Altamimi, Z., Ray, J., & Garayt, B. (2016). The IGS contribution to ITRF2014. *Journal of Geodesy, 90*(7), 611–630. https://doi.org/10.1007/s00190-016-0897-6.

3. Petit, G., & Luzum, B. (Eds.). (2010). *IERS conventions (2010) (IERS Technical Note No. 36).* Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie.

4. Böhm, J., Werl, B., & Schuh, H. (2006). Troposphere mapping functions for GPS and VLBI from ECMWF operational analysis data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 111*, B02406. https://doi.org/10.1029/2005JB003629.

5. Williams, S. D. P. (2004). Error analysis of continuous GPS position time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 109*, B03412. https://doi.org/10.1029/2003JB002741.

6. Bos, M. S., Fernandes, R. M. S., Williams, S. D. P., & Bastos, L. (2013). Fast error analysis of continuous GNSS coordinate time series. *Journal of Geodesy, 87*(4), 351–360. https://doi.org/10.1007/s00190-012-0600-4.

7. Wu, Y., & Jiang, Z. (2011). Comparison of GPS strain rate computing methods and their reliability. *Geophysical Journal International, 185*(2), 703–717. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.04976.x.

8. Bogusz, J., Kłos, A., Figurski, M., Jarosiński, M., & Kontny, B. (2013). Investigation of the reliability of local strain analysis by means of the triangle modelling. *Acta Geodynamica et Geomaterialia, 10*(3), 293–305. https://doi.org/10.13168/AGG.2013.0029.

9. Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., & Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121*(8), 6109–6131. https://doi.org/10.1002/2016JB013098.

10. Bertiger, W., Bar-Sever, Y., Dorsey, A., Haines, B., Harvey, N., Hemberger, D., et al. (2020). GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research. *Advances in Space Research, 66*(3), 469–489. https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.015.

11. EPN CB. (n.d.). *ETRF/ITRF Coordinate Transformation Tool (ECTT).* Royal Observatory of Belgium. Retrieved March 15, 2026, from https://www.epncb.oma.be/_productsservices/coord_trans/.

12. Doskich, S., & Serant, O.-M. (2024). Verification of GNSS stations from the GeoTerrace network for further geodynamic studies using PS-NETM software. *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024"*, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510008.

13. Доскіч, С., Серант, О.-М., & Серант, О. (2025). Опрацювання спостережень ГНСС мережі «GeoTerrace» методом точного позиціонування для дослідження сучасних горизонтальних рухів земної кори Західної України. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, I(49), 84–90. https://doi.org/10.33841/1819-1339-1-49-84-90.

References

1. Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., & Webb, F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102*(B3), 5005–5017. https://doi.org/10.1029/96JB03860.

2. Rebischung, P., Altamimi, Z., Ray, J., & Garayt, B. (2016). The IGS contribution to ITRF2014. *Journal of Geodesy, 90*(7), 611–630. https://doi.org/10.1007/s00190-016-0897-6.

3. Petit, G., & Luzum, B. (Eds.). (2010). *IERS conventions (2010) (IERS Technical Note No. 36).* Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie.

4. Böhm, J., Werl, B., & Schuh, H. (2006). Troposphere mapping functions for GPS and VLBI from ECMWF operational analysis data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 111*, B02406. https://doi.org/10.1029/2005JB003629.

5. Williams, S. D. P. (2004). Error analysis of continuous GPS position time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 109*, B03412. https://doi.org/10.1029/2003JB002741.

6. Bos, M. S., Fernandes, R. M. S., Williams, S. D. P., & Bastos, L. (2013). Fast error analysis of continuous GNSS coordinate time series. *Journal of Geodesy, 87*(4), 351–360. https://doi.org/10.1007/s00190-012-0600-4.

7. Wu, Y., & Jiang, Z. (2011). Comparison of GPS strain rate computing methods and their reliability. *Geophysical Journal International, 185*(2), 703–717. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.04976.x.

8. Bogusz, J., Kłos, A., Figurski, M., Jarosiński, M., & Kontny, B. (2013). Investigation of the reliability of local strain analysis by means of the triangle modelling. *Acta Geodynamica et Geomaterialia, 10*(3), 293–305. https://doi.org/10.13168/AGG.2013.0029.

9. Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., & Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121*(8), 6109–6131. https://doi.org/10.1002/2016JB013098.

10. Bertiger, W., Bar-Sever, Y., Dorsey, A., Haines, B., Harvey, N., Hemberger, D., et al. (2020). GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research. *Advances in Space Research, 66*(3), 469–489. https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.015.

11. EPN CB. (n.d.). *ETRF/ITRF Coordinate Transformation Tool (ECTT)*. Royal Observatory of Belgium. Retrieved March 15, 2026, from https://www.epncb.oma.be/_productsservices/coord_trans/.

12. Doskich, S., & Serant, O.-M. (2024). Verification of GNSS stations from the GeoTerrace network for further geodynamic studies using PS-NETM software. *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024"*, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510008.

13. Doskich, S., Serant, O.-M., & Serant, O. (2025). *Opratsiuvannia sposterezhen HNSS merezhi "GeoTerrace" metodom tochnoho pozytsionuvannia dlia doslidzhennia suchasnykh horyzontalnykh rukhiv zemnoi kory Zakhidnoi Ukrainy* [Processing GNSS observations of the "GeoTerrace" network by precise positioning to study modern horizontal crustal movements of Western Ukraine]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Recent advances in surveying science and technology,* I(49), 84–90. https://doi.org/10.33841/1819-1339-1-49-84-90.

Дата першого надходження статті до видання: 20.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.03.2026

UDC 528. 481; 528.06

Ostap-Mykhailo Serant
Department of Higher Geodesy and Astronomy
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)
E-mail: ostap-mykhailo.v.serant@lpnu.ua. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-6150-3280

METHODOLOGY FOR PREPARING OBSERVATION DATA FROM REFERENCE GNSS STATIONS FOR EARTH SURFACE DEFORMATION ANALYSIS

This paper presents a methodology for the preparation, structuring, and processing of daily RINEX data from reference GNSS stations in order to derive quantitative parameters of Earth surface deformation. The study uses observations from 44 reference stations of the GeoTerrace network collected over the period 01.01.2017–16.03.2024. The input data undergo quality control focused on completeness, accuracy, and stability of observations, including the identification of gaps and anomalous daily solutions that may affect the reliability of coordinate time series. The processing stage is performed in the GipsyX software suite using the Precise Point Positioning (PPP) approach, which provides homogeneous daily coordinate solutions suitable for long-term velocity estimation. As an output of PPP processing, station coordinates are obtained in ITRF2014 (epoch 2024) and subsequently transformed to the ETRF2014 system to support regional interpretation within the European reference-frame context. Based on the station coordinates, a Delaunay triangulation is constructed for the selected network (47 triangles). For the centroid of each triangle, deformation parameters are computed from the locally linear approximation of the horizontal velocity field, including dilatation, relative shear, maximum compression or extension (principal strain), and rotation. The resulting set of deformation characteristics provides a consistent basis for analysing spatial heterogeneity of surface deformation and supports further geodynamic interpretation within the study region.

Keywords: *GNSS observations; GipsyX; ITRF2014; ETRF2014; coordinate time series; velocity vectors; Precise Point Positioning (PPP); Delaunay triangulation; crustal deformation; strain parameters.*

Fig.: 3. Table: 4. References:13.

Серант О.-М. В. Методика формування даних спостережень референцних ГНСС станцій для аналізу деформацій земної поверхні. *Технічні науки та технології*, 2026. № 2(44). С. 621-629. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-621-629.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-630-640
УДК 624.05

Кирило Олександрович Сіренок[1], Анна Артемівна Курбатова[2]

[1]аспірант кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій
Український державний університет науки і технологій
Навчально-науковий інститут Придніпровська державна академія будівництва та архітектури (Дніпро, Україна)
E-mail: sirenok.kyrylo@365.pdaba.edu.ua.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0003-1231-2338

[2]студентка
Український державний університет науки і технологій
Навчально-науковий інститут Придніпровська державна академія будівництва та архітектури (Дніпро, Україна)
E-mail: annakurbatuvaa45@gmail.com

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ ДЛЯ ПІСЛЯВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ

У статті розглянуто особливості застосування технології будівельного 3D-друку як одного з перспективних напрямів розвитку будівельної галузі. Проаналізовано принципи адитивного формування конструкцій, основні типи будівельних 3D-принтерів та матеріали, що використовуються для пошарової екструзії. Наведено приклади практичного застосування технології у світовій практиці та в Україні. Особливу увагу приділено потенціалу використання 3D-друку в умовах відбудови житлового фонду, зокрема з урахуванням кадрового дефіциту та потреби скорочення тривалості будівництва. Визначено основні технологічні та організаційні обмеження, що стримують широке впровадження адитивних технологій у будівельну практику.

Ключові слова: *3D-друк у будівництві; адитивні технології; автоматизація будівництва; відбудова житлового фонду; інноваційні будівельні технології; цифрове будівництво.*

Рис.: 6. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Повномасштабна агресія російської федерації спричинила масштабні руйнування житлового та громадського фонду України, що створює значні виклики для будівельної галузі у процесі відбудови. Значні обсяги пошкоджених будівель потребують швидкого та ефективного відновлення за умов обмежених часових, трудових та матеріальних ресурсів. Традиційні методи будівництва не завжди здатні забезпечити необхідні темпи відновлювальних робіт, що зумовлює потребу у впровадженні інноваційних технологій. Одним із перспективних напрямів є застосування технології будівельного 3D-друку, яка дозволяє автоматизувати процес зведення конструкцій, скоротити трудові витрати та підвищити ефективність використання матеріальних ресурсів. Ефективність такої технології підтверджується світовою практикою будівництва, де застосування будівельного 3D-друку дає змогу зводити окремі будівельні конструкції та малоповерхові житлові об'єкти упродовж лічених діб або навіть годин. Така швидкість будівництва може відіграти важливу роль у забезпеченні житлом значної кількості внутрішньо переміщених осіб та людей, які втратили власне житло внаслідок бойових дій.

Постановка проблеми. Незважаючи на активний розвиток адитивних технологій у світовій будівельній практиці, їх широке впровадження в масове будівництво залишається обмеженим. Особливою ця проблема постає для України в умовах необхідності відбудови значної кількості зруйнованих об'єктів житлового фонду. Технологія будівельного 3D-друку має потенціал суттєво скоротити тривалість будівництва та зменшити потребу у трудових ресурсах, однак її практичне застосування супроводжується рядом технологічних та організаційних обмежень. Відсутність сформованої нормативної бази, технологічні особливості формування конструкцій методом пошарового друку, а також організаційні складнощі, пов'язані із застосуванням спеціалізованого обладнання та матеріалів, ускладнюють широке впровадження цієї технології в будівельну практику. У зв'язку з цим виникає необхідність аналізу сучасного стану розвитку технології будівельного 3D-друку та визначення основних факторів, що стримують її застосування в будівництві.

© К. О. Сіренок, А. А. Курбатова, 2026

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних наукових досліджень свідчить про активний розвиток технології будівельного 3D-друку та зростання інтересу до її застосування в контексті сталого розвитку та відновлення будівельних об'єктів.

У фундаментальному оглядовому дослідженні [1] визначено сучасний стан розвитку адитивного будівництва, його ключові переваги та обмеження. Зокрема, відзначено значний потенціал технології у скороченні тривалості будівництва, автоматизації процесів та зменшенні залежності від трудових ресурсів, що є критично важливим для відновлення будівель після масштабних руйнувань.

Дослідження [2] розкриває концепцію «цифрового бетону» та підкреслює роль 3D-друку як інструменту оптимізації будівельних процесів. Автори зазначають, що адитивні технології дозволяють значно зменшити витрати матеріалів і будівельні відходи, а також забезпечити гнучкість проєктування, що є важливим при реконструкції та відновленні пошкоджених об'єктів.

Таким чином, результати проаналізованих досліджень підтверджують доцільність використання технології будівельного 3D-друку як ефективного інструменту не лише для нового будівництва, але й для відновлення будівельного фонду.

Мета дослідження. Метою дослідження є аналіз сучасного стану технології будівельного 3D-друку, дослідження особливостей її застосування, визначення технічних, економічних та організаційних переваг, а також виявлення основних факторів, що обмежують широке впровадження адитивних технологій у практику сучасного будівництва, зокрема в контексті відбудови житлового фонду України, який зазнав значних руйнувань унаслідок збройної агресії російської федерації.

Виклад матеріалу. Будівельний 3D-друк належить до адитивних технологій, принцип яких полягає у створенні об'єкта шляхом пошарового нанесення матеріалу відповідно до цифрової моделі. На відміну від традиційних методів будівництва, що передбачають монтаж окремих елементів або механічну обробку матеріалів, адитивне виробництво ґрунтується на формоутворенні конструкцій безпосередньо в процесі їх поетапного нарощування. Такий підхід забезпечує високу ступінь автоматизації процесу, зменшення трудомісткості робіт та можливість реалізації складних архітектурних форм.

Серед адитивних технологій, що застосовуються у сфері зведення будівельних об'єктів, ключове місце займає метод Contour Crafting (контурне будівництво). Технологічний процес базується на екструзії дрібнозернистої бетонної суміші через сопло будівельного 3D-принтера з подальшим формуванням конструкцій шляхом пошарового нанесення матеріалу. Геометрія об'єкта визначається цифровою тривимірною моделлю, яка трансформується в систему керуючих команд (G-code) для друкувального обладнання.

Основним робочим обладнанням технології будівельного 3D-друку є 3D-принтери, які залежно від конструктивної схеми та принципу переміщення друкувальної головки поділяються на портальні системи, роботизовані маніпулятори та установки дельта-типу. Портальні принтери являють собою просторову раму, по якій здійснюється переміщення друкувальної головки вздовж координатних осей за допомогою електромеханічних приводів. Такі системи забезпечують високу точність позиціонування та стабільність процесу друку. Вони можуть застосовуватися як для виготовлення окремих конструктивних елементів у виробничих умовах, так і безпосередньо на будівельному майданчику для зведення будівель у межах робочої зони принтера.

Роботизовані принтери-маніпулятори базуються на використанні промислових роботів, оснащених екструзійними головками та системами комп'ютерного керування. Їхньою характерною особливістю є підвищена мобільність і можливість роботи в умовах обмеженого простору або складної конфігурації майданчика. Окремим різновидом є системи з полярною схемою роботи, які розташовуються всередині контуру споруджуваної будівлі.

Принтери типу «дельта» функціонують за рахунок кінематичної схеми з важільними підвісами друкувальної головки, закріпленими на вертикальних напрямних. Така конструкція забезпечує високу швидкість переміщення та можливість формування складних геометричних форм, однак масштабування установок для великогабаритного будівництва може бути пов’язане з конструктивними обмеженнями.



а



б



в

Рис. 1. Типи будівельних 3D-принтерів:
а – портальний принтер (джерело: https://ucat3d.com/en); б – дельта-принтер(джерело: https://www.3dwasp.com/en/), в – роботизований принтер-маніпулятор (джерело: https://www.apis-cor.com/technologies)

Аналіз технічних характеристик різних типів обладнання свідчить, що для потреб масового житлового будівництва найбільш доцільним є використання портальних систем. Жорсткість їхньої конструкції, стабільність позиціонування та можливість збільшення габаритів робочої зони дозволяють забезпечити потокове зведення типових будівель і формування житлових кварталів. Водночас роботизовані маніпулятори можуть ефективно застосовуватися для локального відновлення пошкоджених об’єктів у щільній міській забудові або в умовах обмеженої доступності будівельного майданчика. Таким чином, раціональна організація процесу передбачає комбіноване використання різних типів обладнання з урахуванням масштабів і умов виконання будівельних робіт.

Важливою складовою технології будівельного 3D-друку поряд з обладнанням є матеріали, фізико-механічні та реологічні властивості яких забезпечують можливість реалізації процесу екструзії.

Застосування традиційних бетонних сумішей у технології 3D-друку є обмеженим. У класичному бетоні, окрім цементу та піску, обов'язковим компонентом є крупний заповнювач (щебінь), фракційний склад якого може досягати 10–20 мм і більше. Наявність крупної фракції унеможливлює стабільну екструзію через сопло друкувальної головки, оскільки частинки щебеню можуть спричиняти її засмічення, нерівномірність подачі суміші та порушення геометрії шару. Крім того, традиційна бетонна суміш не здатна забезпечити необхідну формостійкість без підтримуючої опалубки, що призводить до пластичних деформацій під дією власної ваги.

Технологічний процес будівельного 3D-друку вимагає застосування спеціально розроблених дрібнозернистих композиційних матеріалів, у яких відсутній крупний заповнювач, а максимальний розмір частинок обмежується вимогами до діаметра екструзійного сопла. Основою таких сумішей зазвичай є портландцемент або альтернативні в'яжучі, мінеральні наповнювачі (кварцовий пісок, мікрокремнезем), хімічні модифікатори та дисперсне армування.

Ключовою реологічною характеристикою матеріалів для 3D-друку є тиксотропія — здатність суміші зменшувати в'язкість під дією напруги зсуву (під час перекачування магістраллю та екструзії через сопло) і швидко відновлювати структурну міцність у стані спокою. Завдяки цьому забезпечується одночасно прокачуваність, екструзійна здатність та формостійкість матеріалу. Швидкий набір початкової структурної міцності дозволяє свіжоукладеному шару витримувати навантаження від наступних шарів без втрати геометричної стабільності та без значних деформацій.

До складу друкованих сумішей вводять суперпластифікатори для регулювання водоцементного відношення, прискорювачі або сповільнювачі тужавіння для контролю часу відкритої витримки, а також фіброволокно (полімерне, скляне або базальтове) з метою підвищення тріщиностійкості та зменшення анізотропії міцності між шарами. Оптимізація складу матеріалу здійснюється з урахуванням сумісності з конкретним типом обладнання, швидкості друку та умов навколишнього середовища.

Перспективним напрямом розвитку є використання геополімерних композицій, у яких замість традиційного цементу застосовуються зола-винос, доменні шлаки або інші промислові відходи. Такі матеріали дозволяють знизити вуглецевий слід виробництва та підвищити хімічну стійкість конструкцій, що особливо актуально в контексті сталого розвитку будівельної галузі.

Важливо зазначити, що ефективність поєднання спеціалізованих матеріалів та відповідного обладнання підтверджена практичними реалізаціями у світовій будівельній галузі. Будівельний 3D-друк вже вийшов за межі експериментальних лабораторій і використовується для зведення повноцінних житлових та громадських об'єктів.

У місті Беккум (Німеччина) компанією PERI було збудовано двоповерховий житловий будинок методом 3D-друку, який введений в експлуатацію та використовується за призначенням [3]. Об'єкт відповідає вимогам німецьких будівельних норм, що свідчить про можливість інтеграції адитивної технології в систему жорсткого нормативного регулювання.

У Мексиці компанія ICON спільно з некомерційною організацією New Story реалізувала проєкт зі зведення житлового кварталу для малозабезпечених сімей [4]**.** Використання принтера Vulcan дозволило суттєво скоротити тривалість будівництва індивідуального житлового будинку, що демонструє потенціал технології для вирішення соціальних житлових програм.

Серед інших прикладів можна відзначити зведення адміністративної будівлі в Об'єднаних Арабських Еміратах, де технологія 3D-друку була застосована для будівництва офісного об'єкта, а також реалізацію малоповерхових житлових будинків у Китаї із ви-

користанням великогабаритних портальних систем. У низці країн технологія застосовується для друку малих архітектурних форм, елементів інфраструктури та експериментальних мостових конструкцій.

Варто також відзначити окремі приклади практичного застосування технології будівельного 3D-друку в Україні. Зокрема, у місті Ірпінь реалізовано проєкт будівництва індивідуального житлового будинку методом 3D-друку для родини, яка втратила своє житло внаслідок бойових дій. Крім того, у місті Львів реалізований проєкт будівництва навчального закладу із застосуванням технології 3D-друку. Реалізація даних проєктів демонструє можливість застосування технології 3D-друку як для зведення об'єктів житлового будівництва так і для зведення об'єктів громадського призначення.



а



б



в

Рис. 2. Приклади зведення будівель з використанням технології 3D-друку: а – житловий будинок у м. Беккум, Німеччина (джерело: https://interestingengineering.com/science/germanys-first-3d-printed-residential-building-is-near-completion); б – будівлі житлового кварталу в Накахуку, Мексика (джерело: https://www.iconbuild.com/newsroom/icon-new-story-echale-unveil-first-homes-in-3d-printed-community); в – індивідуальний житловий будинок в м. Ірпінь, Україна (джерело: https://forbes.ua/news/na-kiivshchini-zbuduvali-zhitloviy-budinok-za-dopomogoyu-3d-printera-foto-19072024-22514)

Наведені приклади свідчать про те, що будівельний 3D-друк є не перспективною концепцією, а технологією, яка вже впроваджується у практику в різних кліматичних та нормативних умовах. Це підтверджує технічну реалізованість методу та його адаптивність до різних регіонів. Основними чинниками, що визначають доцільність широкого впровадження технології в Україні, залишаються економічна складова, доступність спеціалізованих матеріалів, організація логістики та формування нормативно-правової бази.

Світовий досвід застосування будівельного 3D-друку демонструє технічну реалізованість технології, однак особливої актуальності її впровадження набуває в умовах необхідності масштабної відбудови зруйнованого житлового фонду України.

Під час пошуку офіційної статистики важко навіть уявити масштаб руйнувань: цифри постійно зростають унаслідок триваючої війни. В межах проєкту «Russia Will Pay» аналітики KSE Institute наводять оцінку обсягів матеріальних збитків, завданих Україні внаслідок повномасштабної агресії. Станом на листопад 2024 року загальні прямі збитки інфраструктури перевищили 170 млрд дол. США**,** причому найбільшу частку становлять втрати житлового сектору — понад 236 000 пошкоджених або зруйнованих житлових будівель, зокрема понад 209 000 приватних будинків та близько 27 000 багатоквартирних будинків [5]. Така кількість об'єктів житлового фонду відповідає мільйонам квадратних метрів житлової площі, яка внаслідок бойових дій стала непридатною для проживання, що створює величезні виклики для відбудови та забезпечення населення житлом.

Масштаби руйнувань житлового та громадського фонду України внаслідок воєнних дій мають безпрецедентний характер. Такий обсяг робіт формує надзвичайно високий попит на будівельні ресурси, що перевищує наявні виробничі можливості галузі в її довоєнному стані.

Одним із ключових обмежувальних чинників є кадровий дефіцит. Будівельна галузь традиційно належить до трудомістких сфер економіки, де значна частка процесів виконується вручну та потребує залучення кваліфікованих робітників. Водночас ринок праці зазнав суттєвих структурних змін: частина працездатного населення мобілізована, значна кількість фахівців виїхала за межі країни або змінила місце проживання. Професійні об'єднання роботодавців та галузеві асоціації вже фіксують системний дефіцит робітничих кадрів у будівництві [6]. З огляду на тривалість підготовки кваліфікованих працівників оперативне нарощування кадрового потенціалу є обмеженим у часі. За таких умов збереження виключно традиційних підходів до зведення будівель може призвести до дисбалансу між обсягами відновлювальних робіт і реальними трудовими ресурсами.

Не менш вагомим є часовий фактор. Значна кількість внутрішньо переміщених осіб потребує забезпечення постійним або тимчасовим житлом, що вимагає скорочення тривалості будівельного циклу. При використанні традиційної технології зведення багатоповерхових житлових будинків повний цикл будівництва може тривати від одного до двох років і більше, залежно від поверховості та складності об'єкта. У масштабах програми відновлення така тривалість будівництва може стати стримувальним фактором.

Окремої уваги потребує логістичний аспект. Традиційне будівництво передбачає транспортування значних обсягів штучних та великогабаритних матеріалів — цегли, блоків, збірних залізобетонних елементів. У регіонах із пошкодженою транспортною інфраструктурою це ускладнює організацію постачання та підвищує собівартість робіт. Крім того, прогнозується зростання вартості енергоносіїв і транспортних послуг, що додатково впливає на економіку відновлення.

У цьому контексті адитивні технології будівництва розглядаються як один із перспективних інструментів оптимізації виробничих процесів. Будівельний 3D-друк дозволяє автоматизувати процес зведення огороджувальних конструкцій, зменшити потребу у великій кількості робітників та скоротити тривалість виконання основних етапів будівництва.

Використання технології будівельного 3D-друку в будівництві супроводжується значними початковими інвестиціями у спеціалізоване обладнання та матеріали. Зокрема, вартість будівельних 3D-принтерів може становити десятки або навіть сотні тисяч доларів, а суміші для екструзійного друку зазвичай є дорожчими порівняно з традиційними будівельними сумішами. Однак економічна ефективність даної технології визначається не стільки зниженням вартості матеріалів, скільки оптимізацією організаційно-технологічних процесів будівництва.

Однією з ключових переваг адитивного будівництва є можливість зведення конструктивних елементів без застосування традиційних опалубних систем. У технології 3D-друку бетонна суміш подається методом пошарової екструзії, утворюючи конструкцію безпосередньо у проєктному положенні. Це дозволяє виключити витрати на виготовлення, монтаж і демонтаж опалубки, які у традиційному монолітному будівництві можуть становити значну частку вартості робіт. Так, за даними дослідження [7] виключення опалубки з будівельного процесу може забезпечити економію близько 10 % від загальної вартості будівництва.

Крім того, застосування автоматизованих систем друку дозволяє значно зменшити потребу у робочій силі на будівельному майданчику. За результатами досліджень, впровадження технології будівельного 3D-друку може забезпечити скорочення трудових витрат до 50–80 % у порівнянні з традиційними методами будівництва [1]. Додатковою перевагою є більш раціональне використання матеріалів, оскільки адитивна технологія передбачає подачу матеріалу лише у необхідному обсязі відповідно до цифрової моделі конструкції.

Також важливо підмітити, що результати практичних досліджень свідчать про суттєвий потенціал технології будівельного 3D-друку в напрямку зниження витрат матеріалів. Так, експериментальні дослідження показали можливість зменшення витрат матеріалів до 30 % у порівнянні з традиційними методами будівництва [8]. Це пояснюється особливостями адитивної технології, відповідно до якої матеріал подається пошарово та використовується майже у тому обсязі, який безпосередньо необхідний для формування конструкції.

Цей підхід також сприяє зменшенню кількості будівельних відходів. Завдяки точному цифровому керуванню процесом друку та оптимізації геометрії конструкцій, втрати матеріалу можуть бути знижені до 60 %, що дозволяє скоротити витрати, пов’язані з утилізацією та перевитратою будівельних ресурсів [9].

Але поряд із зазначеними економічними перевагами, технологія будівельного 3D-друку має і певні особливості структури витрат. Зокрема, значну частку витрат у таких проєктах становить експлуатація спеціалізованого обладнання — будівельних 3D-принтерів, роботизованих систем подачі матеріалу та допоміжної техніки. За результатами економічного аналізу, витрати на експлуатацію обладнання можуть становити близько 37 % від загальної вартості будівництва [10].

Таким чином, аналіз економічних аспектів застосування будівельного 3D-друку свідчить про наявність значного потенціалу цієї технології. Використання адитивних методів дозволяє скоротити трудові витрати, оптимізувати використання матеріалів, зменшити обсяги будівельних відходів та виключити необхідність застосування опалубних систем. У сукупності ці переваги формують передумови для підвищення продуктивності будівництва та зниження загальної вартості реалізації будівельних проєктів, що є безперечним позитивним фактором при створенні та відновленні об’єктів житлового сектору.

Попри значний потенціал технології будівельного 3D-друку та наявність низки економічних і технологічних переваг, її широке впровадження у практику масового будівництва поки що залишається обмеженим. Це пов’язано з низкою проблем, що охоплюють нормативно-правові, технологічні та організаційні аспекти застосування адитивних технологій у будівельній галузі.

Однією з ключових проблем впровадження технології будівельного 3D-друку в Україні є відсутність відповідної нормативно-правової бази. Чинні державні будівельні норми та стандарти переважно орієнтовані на традиційні технології зведення будівель і не містять положень, що регламентують проєктування, виготовлення та зведення будівельних конструкцій із застосуванням адитивних технологій. Унаслідок цього виникають труднощі з визначенням вимог до матеріалів, методів контролю якості, а також до перевірки надійності та довговічності надрукованих конструкцій.

Поряд із нормативними обмеженнями існує також низка технологічних проблем, пов'язаних з особливостями формування конструкцій методом пошарової екструзії бетонних сумішей. Ці фактори значною мірою визначають сучасний рівень розвитку технології та потребують подальших досліджень і вдосконалення.

Однією з ключових проблем є інтеграція армування у процес адитивного виготовлення конструкцій. Бетон характеризується високою міцністю на стиск і відносно низькою міцністю на розтяг, тому у традиційному будівництві для сприйняття розтягувальних зусиль застосовуються арматура та арматурні вироби. У технології будівельного 3D-друку формування конструкції відбувається шляхом безперервного нанесення шарів бетонної суміші, що значно ускладнює встановлення армуючих елементів. У більшості випадків інтеграція арматури потребує ручного втручання та зупинки процесу друку, що порушує безперервність технологічного циклу та знижує ефективність виконання робіт.

Найбільшою мірою зазначена проблема проявляється при формуванні горизонтальних конструктивних елементів, зокрема плит і балок перекриття, а також перемичок. У таких елементах виникають значні розтягувальні напруження, що потребує ефективного армування та забезпечення достатньої жорсткості конструкції. У зв'язку з цим у багатьох реалізованих проєктах будівельного 3D-друку зведення стінових конструкцій поєднується з використанням традиційних технологій улаштування перекриттів — збірних або монолітних. Такий підхід ускладнює організацію будівельного процесу та частково знижує технологічні переваги адитивного будівництва.

Важливим технологічним параметром також є забезпечення належної адгезії між послідовними шарами бетонної суміші. Якщо інтервал часу між нанесенням шарів є надто великим, попередній шар втрачає необхідну пластичність, що призводить до погіршення зчеплення з наступним шаром. У результаті можуть утворюватися так звані «холодні шви» — зони потенційного ослаблення конструкції, у яких знижується міцність та підвищується ризик розшарування матеріалу [2]. Запобігання цьому явищу потребує точного підбору складу суміші, контролю її реологічних властивостей, а також оптимізації швидкості та режимів друку.

Також необхідно відзначити низку організаційних факторів, що ускладнюють широке впровадження технології будівельного 3D-друку у будівельну практику. Зокрема, застосування будівельних 3D-принтерів потребує спеціалізованого обладнання, підготовки кваліфікованого персоналу та адаптації існуючих технологічних схем організації будівельних робіт. Додаткові складнощі виникають у питаннях логістики матеріалів, оскільки для забезпечення стабільного процесу друку необхідне безперервне постачання сумішей із заданими реологічними характеристиками, що, у свою чергу, потребує розвитку відповідної інфраструктури для їх виготовлення та постачання. Крім того, впровадження технології передбачає інтеграцію цифрових інструментів проєктування та керування будівельним процесом, що включає використання спеціалізованого програмного забезпечення та цифрових моделей об'єктів. Сукупність зазначених факторів ускладнює практичну реалізацію технології у масштабах масового будівництва та потребує подальшого розвитку організаційних підходів до її застосування.

Висновок. Підсумовуючи, можна зазначити, що технологія будівельного 3D-друку є перспективним напрямом розвитку будівельної галузі та може розглядатися як один із можливих інструментів для відновлення зруйнованих об'єктів житлового фонду. У роботі були розглянуті основні типи обладнання та матеріалів, що застосовуються в адитивному будівництві, а також наведені приклади реалізованих об'єктів у світовій практиці, які підтверджують технічну спроможність і практичну реалізованість даної технології.

Аналіз сучасного стану будівельної галузі показує, що традиційні методи зведення будівель у процесі масштабного відновлення можуть стикатися з рядом обмежень, зокрема значною тривалістю будівельного циклу, дефіцитом трудових ресурсів та складністю організації логістики великогабаритних будівельних матеріалів. У цьому контексті застосування технології будівельного 3D-друку має ряд переваг, серед яких скорочення трудових витрат до 50–80 %, зменшення витрат матеріалів до 30 %, зниження обсягів будівельних відходів до 60 %, а також можливість виключення опалубних систем із технологічного процесу, що може забезпечити економію близько 10 % вартості будівництва.

Разом із тим, поряд із зазначеними перевагами, необхідно враховувати і низку факторів, що ускладнюють широке впровадження технології будівельного 3D-друку. До них належать відсутність сформованої нормативно-правової бази, технологічні особливості інтеграції армування у процес пошарового формування конструкцій, складність створення горизонтальних несучих елементів, а також необхідність забезпечення стабільної адгезії між шарами бетонної суміші. Сукупність зазначених факторів визначає необхідність подальших досліджень та вдосконалення технологічних і організаційних підходів до застосування адитивних технологій у будівництві.

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. Labonnote, N., Rønnquist, A., Manum, B., & Rüther, P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction, 72*, 347–366. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026.

2. Wangler, T., Roussel, N., Bos, F. P., Salet, T. A. M., & Flatt, R. J. (2019). Digital concrete: A review. *Cement and Concrete Research, 123*, 105780. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105780.

3. Viessmann. (n.d.). *Germany's first 3D-printed home*. https://www.viessmann.co.uk/en/latest-news/germanys-first-3d-printed-home.html.

4. ICON. (n.d.). *ICON, New Story and Échale unveil first homes in 3D-printed community*. https://www.iconbuild.com/newsroom/icon-new-story-echale-unveil-first-homes-in-3d-printed-community.

5. Андрієнко, Д., Горюнов, Д., Грудова, В., Маркуц, Ю., Маршалок, Т., Нейтер, Р., Піддубний, І., Студеннікова, І., & Топольськов, Д. (2025). *Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України станом на листопад 2024 року*. KSE Institute.

6. Яценко, Л. (2025). *Дефіцит робочої сили в Україні та внутрішні резерви його скорочення*. Національний інститут стратегічних досліджень. https://niss.gov.ua/sites/default/files/2025-05/az_deficit-kadriv_ukr_12052025.pdf.

7. Al-Noaimat, Y. A., Ghaffar, S. H., Chougan, M., & Al-Kheetan, M. J. (2023). A review of 3D printing low-carbon concrete with one-part geopolymer: Engineering, environmental and economic feasibility. *Case Studies in Construction Materials, 18*, e01818. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01818.

8. TechXplore. (2026). *Researchers advance sustainable 3D concrete printing for the construction industry*. https://techxplore.com/news/2026-02-advance-sustainable-3d-concrete-industry.html.

9. Paul, S. C., Tay, Y. W. D., Panda, B., & Tan, M. J. (2020). Sustainable concrete 3D printing: Reducing material waste. *Energies, 13*(23), 6351. https://doi.org/10.3390/en13236351.

10. Fazal, M. U., & Batikha, M. (2021). *3D concrete printing for sustainable and affordable housing construction: Comparative study*. In *ZEMCH 2021 International Conference Proceedings* (pp. 423–436). ZEMCH Network.

11. Raza, M. H., Besklubova, S., Kravchenko, E., & Zhong, R. Y. (2025). *Economic viability of 3D concrete printing: A comparative study with traditional construction method*. In *Proceedings of the 42nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2025)* (pp. 797–804).

12. Konoplianyk, O., Sopilnyak, A., Sirenok, K., Sereda, S., & Yarova, T. (2024). Constituent components of 3D printing in construction: Mixture, reinforcement and their main characteristics. *E3S Web of Conferences*, *534*, 01009. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453401009.

References

1. Labonnote, N., Rønnquist, A., Manum, B., & Rüther, P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction, 72*, 347–366. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026.

2. Wangler, T., Roussel, N., Bos, F. P., Salet, T. A. M., & Flatt, R. J. (2019). Digital concrete: A review. *Cement and Concrete Research, 123*, 105780. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105780.

3. Viessmann. (n.d.). *Germany's first 3D-printed home*. https://www.viessmann.co.uk/en/latest-news/germanys-first-3d-printed-home.html.

4. ICON. (n.d.). *ICON, New Story and Échale unveil first homes in 3D-printed community*. https://www.iconbuild.com/newsroom/icon-new-story-echale-unveil-first-homes-in-3d-printed-community.

5. Andriienko, D., Horiunov, D., Hrudova, V., Markuts, Y., Marshalok, T., Neiter, R., Piddubnyi, I., Studennikova, I., & Topolskov, D. (2025). Zvit pro priami zbytky infrastruktury vid ruinuvan vnaslidok viiskovoi ahresii Rosii proty Ukrainy stanom na lystopad 2024 roku [Report on direct infrastructure damage from destruction caused by Russia's military aggression against Ukraine as of November 2024]. KSE Institute.

6. Yatsenko, L. (2025). Defitsyt robochoi syly v Ukraini ta vnutrishni rezervy yoho skorochennia [Deficit of labor force in Ukraine and internal reserves for its reduction]. *Natsionalnyi instytut stratehichnykh doslidzhen – National Institute for Strategic Studies.* https://niss.gov.ua/sites/default/files/2025-05/az_deficit-kadriv_ukr_12052025.pdf.

7. Al-Noaimat, Y. A., Ghaffar, S. H., Chougan, M., & Al-Kheetan, M. J. (2023). A review of 3D printing low-carbon concrete with one-part geopolymer: Engineering, environmental and economic feasibility. *Case Studies in Construction Materials, 18*, e01818. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01818.

8. TechXplore. (2026). *Researchers advance sustainable 3D concrete printing for the construction industry*. https://techxplore.com/news/2026-02-advance-sustainable-3d-concrete-industry.html.

9. Paul, S. C., Tay, Y. W. D., Panda, B., & Tan, M. J. (2020). Sustainable concrete 3D printing: Reducing material waste. *Energies, 13*(23), 6351. https://doi.org/10.3390/en13236351.

10. Fazal, M. U., & Batikha, M. (2021). *3D concrete printing for sustainable and affordable housing construction: Comparative study*. In *ZEMCH 2021 International Conference Proceedings* (pp. 423–436). ZEMCH Network.

11. Raza, M. H., Besklubova, S., Kravchenko, E., & Zhong, R. Y. (2025). *Economic viability of 3D concrete printing: A comparative study with traditional construction method*. In *Proceedings of the 42nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2025)* (pp. 797–804).

12. Konoplianyk, O., Sopilnyak, A., Sirenok, K., Sereda, S., & Yarova, T. (2024). Constituent components of 3D printing in construction: Mixture, reinforcement and their main characteristics. *E3S Web of Conferences*, *534*, 01009. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453401009.

Дата першого надходження статті до видання: 25.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.03.2026

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

UDC 624.05

Kyrylo Sirenok[1], Anna Kurbatova[2]

[1]PhD student of the Department of Reinforced-Concrete and Masonry Structures
Ukrainian State University of Science and Technology
Educational and Scientific Institute of Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture (Dnipro, Ukraine)
E-mail: sirenok.kyrylo@365.pdaba.edu.ua.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0003-1231-2338

[2]Student
Ukrainian State University of Science and Technology
Educational and Scientific Institute of Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture (Dnipro, Ukraine)
E-mail: annakurbatuvaa45@gmail.com

THE USE OF 3D PRINTING TECHNOLOGY FOR POST-WAR RECONSTRUCTION OF BUILDINGS

The destruction of Ukraine's residential and public infrastructure due to the russian federation's armed aggression necessitates the search for effective and rapid solutions to restore facilities in the construction sector, highlighting the relevance of innovative technologies, particularly 3D construction printing. Traditional construction methods do not ensure the necessary pace of reconstruction given limited labor, material, and time resources, which creates a need for alternative technological approaches.

The aim of this study is to analyze the current state of 3D printing technology in construction, identify its advantages, application characteristics, and factors limiting its implementation in the reconstruction of the housing stock.

The paper examines the essence of additive construction and analyzes the main types of construction 3D printers and materials that enable the extrusion process. Examples of the successful application of the technology in global and domestic practice are provided, confirming its technical feasibility.

It has been demonstrated that the use of 3D printing in construction can significantly reduce construction time, labor costs, material consumption, and the volume of construction waste. At the same time, key challenges have been identified, including the lack of regulatory frameworks, the complexity of integrating reinforcement, ensuring adhesion between layers, and organizational aspects of technology implementation. As a result, it is concluded that 3D printing in construction has significant potential for the restoration of Ukraine's damaged housing stock; however, it requires further development of technological and organizational solutions for its widespread implementation.

Keywords: *3D printing in construction; additive technologies; construction automation; housing stock reconstruction; innovative construction technologies; digital construction.*

Fig.: 6. References: 12.

Сіренок К. О., Курбатова А. А. Застосування технології 3D-друку для післявоєнного відновлення будівельних об'єктів. *Технічні науки та технології,* 2026. № 2(44). С. 630-640. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-630-640.

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 (співавторами) 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:

- **140 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам потрібна паперова версія журналу);
- **110 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам достатньо електронної версії журналу).

Остаточна вартість публікації формується після готовності електронного макета 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

№ 2(44)

Технічний редактор, відповідальна за випуск Н. В. Мороз
Комп'ютерна верстка 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 31.03.2026. Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. – 74,63.
Тираж 100 пр. Замовлення № 12/26.

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.