

РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-325-337](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-325-337)

УДК 664.681:620.182.5

**Дмитро Олександрович Жигунов¹, Михайло Олександрович Ковальов²,
Наталія Василівна Хоренжий³, Васирина Петрівна Ковальова⁴**

¹доктор технічних наук, завідувач кафедри технології зернових продуктів, хліба і кондитерських виробів
Одеський національний технологічний університет (Одеса, Україна)

E-mail: dimius75@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9435-2266>. **ResearcherID:** D-1372-2015

²кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології зернових продуктів, хліба і кондитерських виробів
Одеський національний технологічний університет (Одеса, Україна)

E-mail: mak2111@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3785-9428>. **ResearcherID:** KIH-4164-2024

³кандидат технічних наук, доцент кафедри технології зернових продуктів, хліба і кондитерських виробів
Одеський національний технологічний університет (Одеса, Україна)

E-mail: natalka.onaft@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7912-4791>. **ResearcherID:** B-3897-2016

⁴кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології зернових продуктів, хліба і кондитерських виробів
Одеський національний технологічний університет (Одеса, Україна)

E-mail: k.vasilisa@ukr.net **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2270-1337>. **ResearcherID:** D-7510-2016

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗМІШУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДОБАВОК З ПШЕНИЧНИМ БОРОШНОМ

У статті досліджено доцільність змішування технологічних добавок з пшеничним борошном для коригування його хлібопекарських властивостей безпосередньо на борошномельних підприємствах. Обґрунтовано переваги такого підходу для стабілізації якості борошна. Встановлено оптимальні параметри процесу змішування технологічних добавок з пшеничним борошном у лабораторних та виробничих умовах. Розглянуто вплив ферментних препаратів різного принципу дії на хлібопекарські властивості. Результати підтверджують покращення однорідності суміші, збільшення об'єму і пористості хліба. Отримані дані можуть бути корисними для фахівців борошномельної галузі та виробників хлібопекарської продукції.

Ключові слова: пшеничне борошно; технологічна добавка; дозування і змішування; борошномельний завод; ферментні препарати; оптимізація якості.

Рис.: 5. Бібл.: 20.

Актуальність теми дослідження. З кожним роком спостерігається зміна якості зерна, що безпосередньо впливає на властивості пшеничного борошна. Кліматичні умови, сорти зерна та технологічні процеси обробки відіграють важливу роль у формуванні фізико-хімічних характеристик зернової сировини.

Для забезпечення стабільності якості борошна доцільно використовувати технологічні добавки. Вони дозволяють не лише компенсувати недоліки сировини, а й підвищити функціональність кінцевого продукту. Застосування таких добавок сприяє стандартизації властивостей борошна, що є важливим аспектом для хлібопекарської, кондитерської та інших галузей харчової промисловості, орієнтованих на якісний і стабільний випуск продукції [1].

Постановка проблеми. Використання технологічних добавок саме на борошномельних заводах приносить низку важливих переваг, які позитивно впливають як на сам виробничий процес, так і на якість кінцевої продукції.

По-перше, технологічні добавки дозволяють стабілізувати якість борошна, незалежно від змін у властивостях зернової сировини. Вони компенсують недоліки борошна, спричинені варіаціями у складі білків, клейковини чи вологості зерна. Це особливо важливо для харчових виробництв, які вимагають стандартизованої сировини для забезпечення високої якості кінцевого продукту [2].

По-друге, добавки підвищують функціональні технологічні властивості борошна. Вони можуть покращувати пружність тіста, його підйомні властивості або здатність до утримання вологості. Це розширює можливості використання борошна в різних типах хлібопекарських і кондитерських виробів [3].

По-третє, централізоване додавання технологічних добавок на етапі виробництва на борошномельному заводі є економічно вигідним рішенням. Воно дозволяє зменшити втрати та підвищити ефективність технологічного процесу, а також мінімізує ризик помилкового дозування при використанні добавок на інших стадіях. Автоматизація цих процесів сприяє підвищенню продуктивності та зменшенню трудовитрат [2].

Використання сучасних технологічних добавок сприяє підвищенню конкурентоспроможності продукції. Завдяки покращенню якості борошна виробники можуть відповідати суворішим вимогам харчової промисловості та задовольняти зростаючі потреби ринку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження технологічного процесу перероблення зерна на борошно дозволяє виокремити три основні напрями виробництва борошна зі спеціальними властивостями або цільовим призначенням. Перший напрям полягає в отриманні пшеничного борошна з бажаними характеристиками шляхом агротехнічного впливу, зокрема через селекцію та вирощування сортів пшениці з необхідними властивостями. Другий напрям пов'язаний із технологічними прийомами на борошномельному виробництві: формування помельних партій, застосування спеціалізованих схем помелу, комбінування індивідуальних потоків тощо. Третій напрям базується на коригуванні властивостей борошна шляхом біохімічних технологій, зокрема із застосуванням функціональних добавок [4].

Агротехнічні підходи. Численні дослідження довели, що технологічні властивості зерна залежать від його виду, типу, сорту, а також від умов вирощування і географічного розташування посівів [5]. Ці фактори значною мірою визначають якість зерна й можливий вихід борошна. Наукові роботи також показали, що мікроструктурні особливості зерна пшениці суттєво впливають на його борошномельні характеристики. Зокрема, борошно з м'якозерних сортів має вищий ступінь дисперсності порівняно з борошном із твердозерної пшениці. При цьому рівень пошкодження крохмальних гранул у борошні з твердозерних сортів у 1,5–4,4 рази вищий. Також було встановлено, що з м'яких сортів пшениці можна отримати в середньому втричі більше проміжного білка, ніж із твердозерної [6].

Ці значні відмінності в технологічних параметрах пшениці свідчать про доцільність окремого підходу до її використання залежно від цільового призначення борошна. Системна селекція та вирощування сортів із певними технологічними властивостями відкривають можливості для більш ефективного використання сільськогосподарських і виробничих ресурсів у виробництві борошна спеціального призначення [7].

Водночас в Україні наразі вирощування пшениці цільового призначення здійснюється в обмеженій кількості, що зумовлює брак відповідних технологічних рішень для її перероблення.

Борошномельні прийоми. Підготовка зерна до помелу на борошномельних підприємствах здійснюється відповідно до чинних нормативів, зокрема «Правил ведення технологічного процесу на борошномельних підприємствах», які містять рекомендовані режими водно-теплової обробки, очищення зерна від домішок, видалення оболонки та зародка залежно від типу зерна і його склоподібності. Як зазначено в низці досліджень [8], за допомогою правильного формування помельних партій, а також завдяки варіюванню режимів кондиціонування, можна цілеспрямовано змінювати технологічні властивості зерна перед подрібненням.

Показано, що характеристики подрібнення, форма і стан робочих поверхонь обладнання, навантаження та режими помелу мають суттєвий вплив на якість і вихід готового борошна [9]. Основним подрібнюючим обладнанням на борошномельних підприємствах

є вальцові верстати, які дозволяють гнучко змінювати технологічні параметри. Наприклад, зменшення зазору між вальцями на перших системах подрібнення (драного і розмелювального процесів) сприяє підвищенню виходу борошна без погіршення його якості, хоча зменшується середній розмір частинок. Водночас збільшення вилучення борошна на системах другої якості може спричинити зростання зольності і крупності частинок. Також встановлено, що при однакових зазорах і кількості рифлів, збільшення діаметра валків від 150 до 300 мм сприяє ефективнішому подрібненню [8].

Крім того, на рифлених вальцях інтенсивність пошкодження крохмальних гранул вища, ніж на мікрошорстких поверхнях. Підвищення кута нахилу рифлів посилює інтенсивність подрібнення за інших рівних умов. Зі збільшенням кількості рифлів на один сантиметр довжини валка спостерігається зростання виходу крупнодунстових фракцій та загального вилучення [10].

Сучасні технологічні схеми перероблення зерна на борошномельних підприємствах характеризуються багатоступінчастістю та безперервністю процесу, з чіткою поетапною побудовою та складною взаємодією між окремими системами, при цьому процеси відбуваються на високій швидкості [9].

Класичні хлібопекарські сортові помели з розгорнутою системою збагачення включають шість ключових етапів: початкове подрібнення зерна (драний процес), сортування утворених фракцій, очищення проміжних продуктів на ситовіальних та шліфувальних системах, тонке подрібнення (розмельний процес) та контроль готового борошна. Кожен етап, своєю чергою, поділяється на декілька підетапів залежно від якості проміжних продуктів [11].

Для формування спеціалізованих сортів борошна важливо, щоб у відділення готової продукції надходили окремі потоки з чітко вираженими властивостями. Такий підхід дозволяє задовольнити потреби різних харчових галузей та забезпечити ефективне й економічно обґрунтоване використання зернових ресурсів [8].

Біохімічні прийоми. Крім агротехнічних і борошномельних методів, для виготовлення борошна спеціального призначення або з конкретними технологічними характеристиками застосовуються також біохімічні прийоми. Ці методи ґрунтуються на використанні спеціальних технологічних добавок. На сьогодні відомо кілька основних груп таких добавок, що впливають на властивості пшеничного борошна: зокрема, це поліпшувачі окисної та відновлювальної дії, ферментні препарати, поверхнево-активні речовини, суха пшенична клейковина та інші [13].

Технологічні добавки, представлені на ринку, включають як макро-, так і мікронутрієнти. Вони виконують роль допоміжних речовин, особливо при переробці пшениці з низькими якісними показниками (табл. 1) [14].

Таблиця 1 – Основні напрями використання технологічних добавок на борошномельних підприємствах

Властивість борошна, що потребує коригування	Вид технологічної добавки
Вміст клейковини	Суха пшенична клейковина
Індекс деформації клейковини (якість клейковини)	Ферментні препарати ксиланазної, геміцелюлазної, ліпоксигеназної дії, суха пшенична клейковина
Амілолітична активність занижена	Ферментні препарати амілолітичної дії
Амілолітична активність завищена	Регулятори кислотності – солі органічних кислот
Харчова цінність занижена	Суха пшенична клейковина, БАДи, в тому числі з нетрадиційної сировини, вітамінно-мінеральна суміш

У багатьох країнах світу, зокрема й у європейських, технологічні добавки до борошна вводять безпосередньо на борошномельних підприємствах. Такий підхід дозволяє досягти значного економічного ефекту, зокрема завдяки можливості виготовлення високоякісного борошна з менш цінної зернової сировини.

Зазвичай більшість поліпшувачів і добавок не мають харчової цінності: одні є повністю безпечними, інші можуть становити ризик для здоров'я. Тому їх використання суворо контролюється відповідними медико-біологічними вимогами та санітарними нормами до продовольчої сировини і харчових продуктів.

Борошномельна промисловість висуває низку вимог до технологічних добавок.

По-перше, вони не повинні погіршувати органолептичні чи технологічні властивості борошна. З цією метою добавки мають бути у вигляді сухих, дрібнодисперсних порошків, що не змінюють вологість, зольність чи інші ключові характеристики борошна і не мають сторонніх запахів або присмаків [14].

По-друге, під час виробництва борошна необхідно забезпечити точне дозування та рівномірне змішування добавок у короткі строки. Через це часто застосовують премікси — попередні суміші. Також має бути доступна інформація про можливі алергічні чи шкідливі впливи на персонал [15].

Третьою важливою особливістю є те, що технологічні добавки виявляють свою дію лише у вологому середовищі, тому вони не змінюють властивості сухого борошна. Через це для оцінки їхньої ефективності бажано проводити лабораторну випічку, оскільки стандартні показники якості можуть не виявити реальних змін у хлібопекарських властивостях [16].

Також добавки повинні мати низьку вологість, бути слабо гігроскопічними та мати тривалий термін зберігання, оскільки борошно також зберігається тривалий час.

До того ж важливо досліджувати оптимальні способи введення добавок на різних етапах виробництва, зокрема під час розмелу або вже у процесі безтарного зберігання, адже щойно змелене борошно проходить стадію дозрівання і з часом може змінювати свої властивості [14].

Найголовніша вимога до будь-якого поліпшувача — його безпечність і відсутність негативного впливу на здоров'я людини.

Пшеничне борошно містить ферменти, такі як α - і β -амілази, протеази, ліпази, фосфатази та оксидази. Якщо зерно непророщене, рівень цих ферментів залишається низьким, і вони не активуються під час зберігання за умови підтримки низької вологості та температури. Характеристики ферментів у пшениці залежать від їхнього походження, яке можна поділити на три основні групи [16]:

Індогенні ферменти — природні компоненти зерна, що присутні під час збору врожаю (наприклад, амілази).

Ендогенні ферменти — синтезовані мікроорганізмами, які можуть бути природними забруднювачами або спеціально доданими культурами.

Екзогенні ферменти — ферменти, які додають у процесі виробництва [17].

Саме амілази відіграють ключову роль у процесі випікання хліба, однак пророщування пшениці до збору врожаю може негативно вплинути на якість хліба, тому для збереження бажаних властивостей рекомендується збирати зерно при низькій її активності. Використання амілази є доцільним, а в деяких випадках і необхідним рішенням для забезпечення газоутворюючих та газотримуючих процесів у тісті. Таким чином, оптимальне дозування амілази є важливим для отримання якісного кінцевого продукту.

Більшість доданих амілаз у хлібопекарській промисловості мають бактеріальне або грибкове походження, тому мають різні фізичні характеристики, зокрема термічну стабільність: бактеріальна α -амілаза демонструє вищу термостійкість порівняно з амілазами, що містяться в зернових, тоді як грибкова амілаза має нижчу термостійкість.

Протеази, що містяться в пшеничному борошні, переважно мають ендогенне походження і незначною мірою впливають на білки борошна під час випікання [18]. У хлібопекарському виробництві додавання протеази зазвичай не є необхідним для підвищення еластичності тіста із зерна пшениці нормальної якості. Однак ці ферменти можуть бути корисними у виробництві борошна для печива або вафель, де потрібна слабша структура тіста.

З огляду на всі вимоги, найефективнішими для покращення хлібопекарських характеристик на борошномельних підприємствах визнано ферментні препарати грибного походження. Вони інактивуються під час термічної обробки (випікання хліба) і не мають шкідливого впливу на організм людини.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Дослідженню технологічних добавок присвячено роботи багатьох українських та європейських учених. Науковці встановили доцільність використання технологічних добавок для коригування та надання спеціальних властивостей пшеничному борошну. Проте процес дозування та змішування технологічних добавок із борошном безпосередньо на борошномельних заводах є недостатньо вивченим.

Мета статті. Мета дослідження – дослідити режими процесу змішування технологічних добавок із борошном.

Виклад основного матеріалу. Для реалізації дослідження проаналізовано технологічну схему борошномельного заводу продуктивності 150 т/д, проведено аналіз якості борошна, згідно з ГСТУ 46.004-99 [19], що виробляється на даному заводі. Оцінювання хлібопекарських властивостей проводили за пробною лабораторною випічкою хліба зразків борошна контрольного зразка та з технологічною добавкою. Для оцінки ефективності змішування технологічних добавок із борошном на першому етапі було знайдено оптимальне дозування технологічної добавки шляхом оцінки процесу змішування вітаміну В₂ з борошном в лабораторних умовах, а на другому етапі – з технологічними добавками за пробною лабораторною випічкою у виробничих умовах.

Визначення вітаміну В₂ проводять за методикою, описаною в літературному джерелі [20]. В основу цієї методики покладена зміна інтенсивності забарвлення вітаміну В₂ (рибофлавіну) залежно від його концентрації в розчині. Для цього вітамін В₂ масою 100 мг вносять у мірну колбу місткістю 100 см³ і розчиняють спочатку в невеликому об'ємі води, а потім доводять до мітки. 1 см³ такого розчину містить $10 \cdot 10^{-5}$ вітаміну В₂. З цього розчину готують шкалу стандартних розчинів. У 10 мірних колб місткістю 100 см³ вносять, відповідно, від одного до десяти см³ стандартного розчину і доводять дистильованою водою до мітки. Колориметрування проводили при довжині хвилі 440 нм, із використанням синього світлофільтра №4, в кюветі 5 см. За результатами будують калібрувальний графік, за яким вираховують зміст введенного вітаміну В₂.

Для оцінювання ефективності змішування технологічної добавки з пшеничним борошном проводили пробне лабораторне випікання формового хліба згідно з методикою галузевого стандарту [19] у перерахунку на 100 г борошна. Виходячи з вологості борошна, визначали кількість необхідної води для замісу тіста. Згідно з рецептурою додавали дріжджі (3 г), цукор (4 г) та соль (1,3 г). Замішували і формували тісто вручну. Бродіння тіста відбувалось у термостаті при температурі (31 ± 1) °С протягом 180 хв. Хліб випікали в лабораторній печі при температурі 220-230 °С зі зволоженням пекарної камери. Тривалість випікання хліба становила 20-25 хв.

Сортові помели пшениці за скороченою схемою технологічного процесу використовують на борошномельних заводах відносно невеликої продуктивності (100-130 т/доб.), які розташовані в малонаселених центрах. Такі млини, як правило, виробляють два-три сорти пшеничного борошна із загальним виходом 72–75 %, що повністю забезпечує потреби місцевих споживачів [9].

За принципово схожою схемою працює борошномельний завод, на якому проводилося дослідження. У цьому варіанті схеми відсутній етап збагачення проміжних продуктів.

Технологічна схема включає:

– чотири драні системи (В1 – В4), з яких III і IV драні системи діляться на крупну і дрібну;

- три сортувальні системи (Div.1 – Div.3);
- п'ять вимельних систем (BF1 – BF5);
- дві шліфувальні системи (Siz. 1 – Siz. 2);
- п'ять розмелювальних систем (R1 – R5), з яких 1-ша і 2-га розмелювальні системи поділяються на крупну і дрібну;
- одна сходова система (C1).

Згідно зі схемою технологічного процесу передбачено можливість відбору двох сортів борошна з подальшим їх контролем. Завод може працювати за двома схемами: 72-ти % односортний помел (вищий сорт) та 75-ти % двосортний помел (55 % – вищого сорту та 20 % – першого сорту).

Аналіз схеми технологічного процесу дозволяє зробити висновок, що на заводі є можливість встановлення дозуючого пристрою для змішування борошна з технологічною добавкою.

Змішування є механічним процесом, під час якого обробляються вихідні матеріали без зміни їхніх хімічних властивостей чи агрегатного стану. У ході цього процесу частинки змінюють своє просторове розташування відносно одна одної, внаслідок чого утворюється однорідна суміш [10].

Результати досліджень. Характер і ефективність змішування залежать від типу змішувального обладнання та його конструктивних елементів, технологічного режиму роботи, а також від властивостей компонентів суміші. Часто вихідні матеріали мають різні фізико-механічні характеристики й співвідношення у складі. Тверді частинки можуть відрізнятися за розмірами, твердістю, щільністю, поверхневими властивостями та вологістю. Повноцінна дія комплексної добавки можлива при її рівномірному розподіленні в борошні, що забезпечується за рахунок ефективного змішування.

Змішувач, на якому проводили експериментальні дослідження, є горизонтальним, лопатевим, періодичної дії. Місткість ванни змішувача 5 кг, коефіцієнт заповнення робочої ванни для всіх експериментів дорівнює 70 %, що є оптимальним. Частоту робочих органів змінювали в діапазоні: $1,0 \text{ с}^{-1}$ (60 об/хв); $1,33 \text{ с}^{-1}$ (80 об/хв); $1,67 \text{ с}^{-1}$ (100 об/хв).

Як ключовий компонент, за концентрацією якого судили про ефективність змішування, був узятий вітамін B₂, фізичні властивості якого близькі до властивостей ферментних препаратів. Оцінювання ефективності процесу змішування проводили шляхом визначення якісного показника, за яким був обраний коефіцієнт варіації або неоднорідності.

Проведення досліджень з вивчення характеру протікання процесу змішування передбачало зміну такого фактору, як тривалість змішування. Частота обертів робочого органа змішувача залишалася незмінною – на максимальному для цього пристрою рівні $1,67 \text{ с}^{-1}$, коефіцієнт завантаження ванни змішувача становив 70 %. При отриманні суміші необхідно домогтися рівномірного розподілу вихідних компонентів по його об'єму.

Щоб оцінити якість змішування однієї випадковою величиною, суміш умовно вважають двокомпонентною. Для чого із суміші виділяють один компонент, званий умовно основним (ключовим), ключовий компонент у цьому дослідженні – вітамінний препарат, інший – борошно.

Якість змішування визначається за коефіцієнтом варіації ключового компонента суміші, тобто вітаміну B₂. Для цього в борошно вносять вітамін B₂, попередньо зважений, та змішують у змішувачі періодичної дії при певних режимах. Після чого з суміші відбирається по 10 проб, кожна з яких по 2 г.

Вміст вітаміну B₂ у модельній суміші визначали за методикою [20]. Оцінювання ефективності процесу змішування здійснювали за допомогою коефіцієнта варіації основного компонента, який використовували як головний показник якості змішування.

За результатами проведених експериментальних досліджень побудовано криві змішування – залежність коефіцієнта варіації від тривалості змішування (рис. 1, 2). Оптимальна тривалість змішування – це момент встановлення саме цієї динамічної рівноваги, яка відповідає першому мінімальному значенню коефіцієнта варіації кривої змішування.

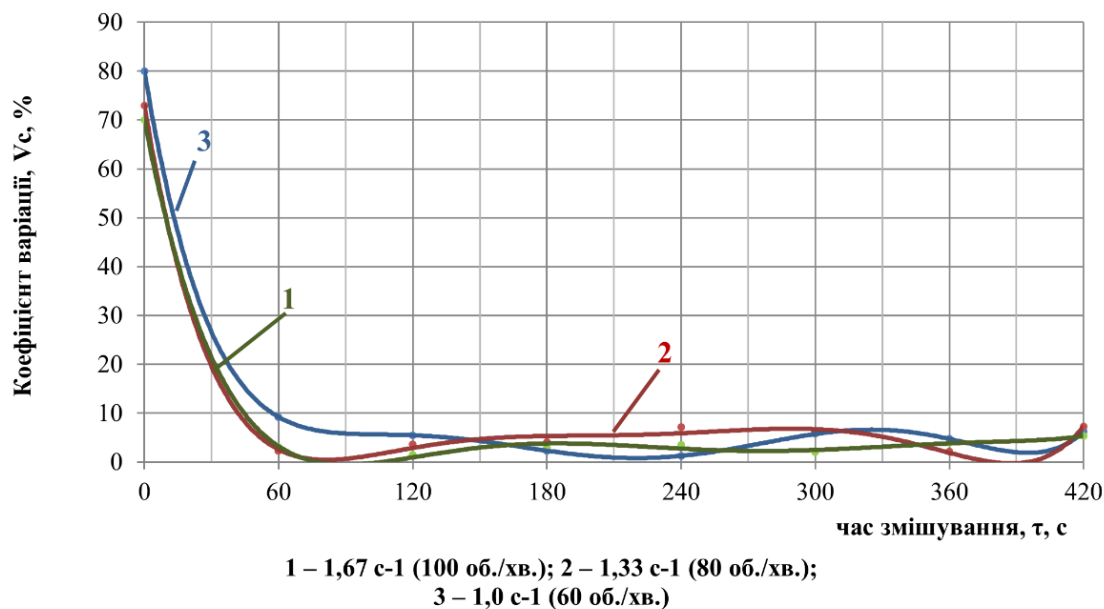


Рис. 1. Крива змішування пшеничного борошна при концентрації ключового компонента 0,010 %

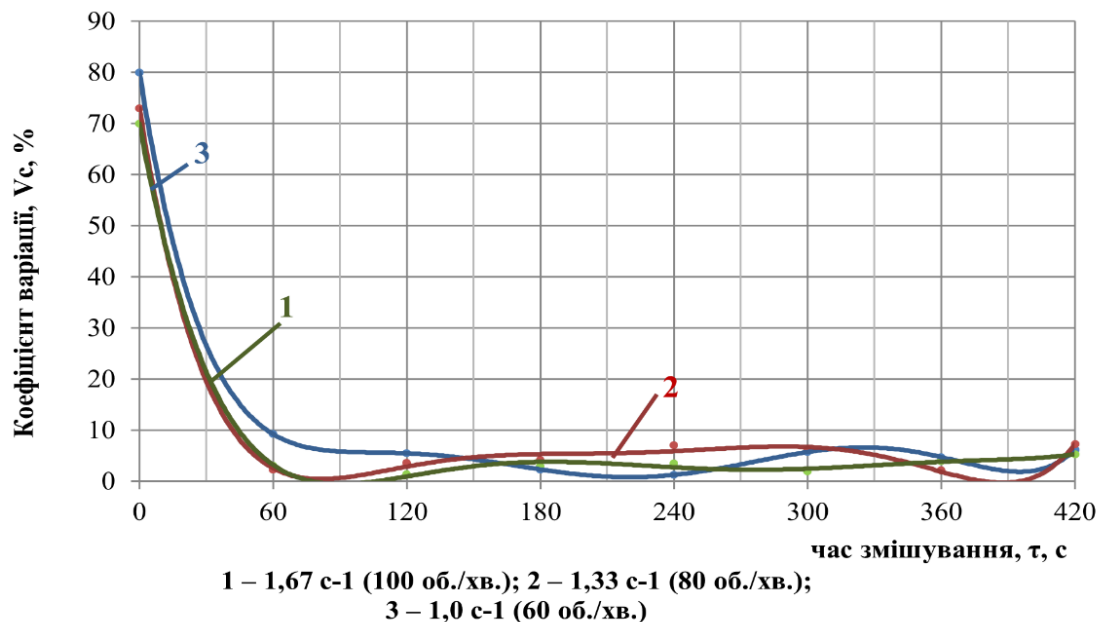


Рис. 2. Крива змішування пшеничного борошна при концентрації ключового компонента 0,013 %

Аналіз отриманих кривих свідчить, що зі збільшенням тривалості змішування однорідність суміші поступово зростає незалежно від концентрації ключового компонента. На кривих чітко виділяються три етапи змішування: I (0-60 с) – зона інтенсивного змішування; II (60-120 с) – зона уповільненого змішування та III (120-180с) – зона сегрегації.

За результатами досліджень встановлено, що мінімального значення коефіцієнта варіації швидше досягає зразок борошна із більшою концентрацією ключового компонента 0,013 % – через 90 с, тобто підвищення концентрації ключового компонента покращує ефективність процесу змішування. Підвищення частоти обертання робочого органу змішувача з 1,0 до 1,67 с^{-1} , тобто з 60 до 100 об./хв, також сприяє покращенню процесу змішування і зменшенню коефіцієнта варіації.

На підставі проведених експериментальних досліджень встановлено оптимальні режими змішування борошна хлібопекарського з технологічною добавкою концентрацією 0,010-0,013 % у горизонтальному лопатевому змішувачі періодичної дії: частота обертання робочого органу змішувача 1,33-1,67 с^{-1} ; тривалість змішування – 90-180 с (1,5-3 хв).

За структурою ферментні препарати – це сипучі мікрогрануляти білого, світло-коричневого кольору із середнім розміром частинок 150 мікронів. Носієм ферменту є борошно, що дозволяє легко змішувати їх з борошном за допомогою закритих конвективних або барабанних змішувачів, які не дають розмелюючий ефект.

У результаті проведених досліджень виникла необхідність перевірки отриманих даних на борошномельному заводі. На заводі був встановлений дозатор над конвеєром збору борошна за рекомендаціями фірми «Mühlentechnik» (рис. 3).

EMCEtec GLD 87 – прецизійний дозуючий пристрій для сипких інгредієнтів. Дозуючий пристрій EMCEtec GLD 87 призначений для додавання мікроінгредієнтів і може бути інтегрований у будь-якому борошномельному виробництві, окремо або в групах. Він дозволяє дозувати інгредієнти, наприклад поліпшувачі борошна, такі як аскорбінова кислота, ферменти і відбілювальні речовини. За необхідністю додавання двох або більше інгредієнтів, необхідно встановлювати два дозуючі пристрої або виготовляти премікс всіх інгредієнтів.

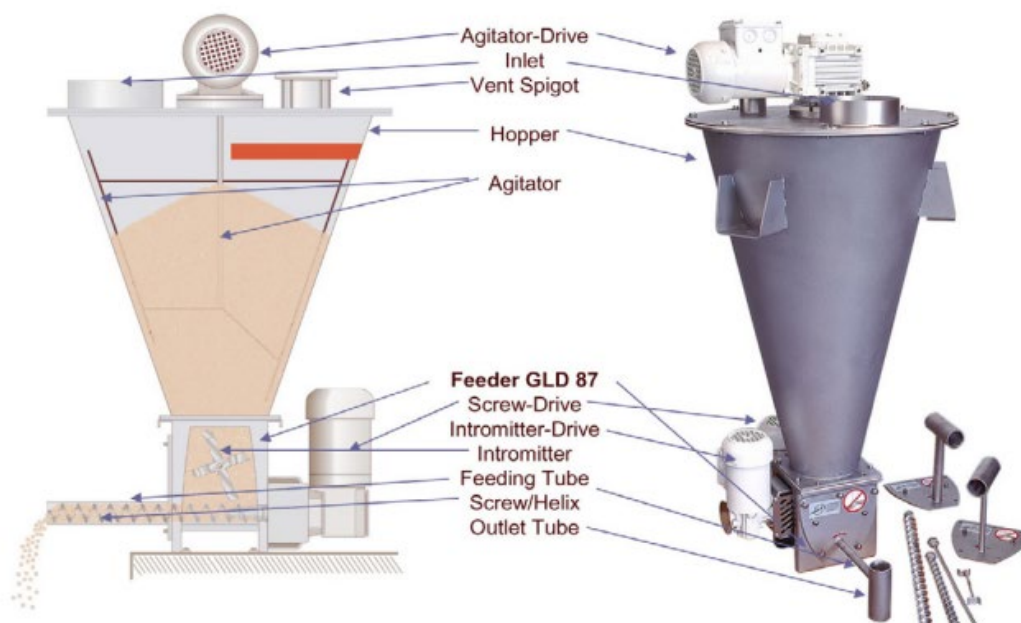


Рис. 3. Схема дозуючого пристрою EMCEtec GLD 87:

Agitator-Drive – мішалка привід; *Inlet* – вхідний отвір; *Vent Spigot* – вентиляційний кран; *Hopper* – бункер; *Agitator* – змішувач; *Feeder GLD 87* – живильник GLD 87; *Screw-Drive* – гвинтовий привід; *Intramitter-Drive* – привід підживлювального елемента (інтромітера); *Intramitter* – підживлювальний елемент (інтромітер); 10 – підживлювальна трубка; 11 – шнек/спіраль; 12 – вихідна трубка

На наступному етапі дослідження було проведено оцінювання ефективності змішування борошна з технологічною добавкою у співвідношенні 1:20. У виробничих умовах не було можливості змінювати технічні характеристики змішувача, тобто конвеєра збору

борошна. При зміні швидкості обертання робочого органу конвеєра зростало б навантаження на двигун, що призвело б до виходу з ладу основного обладнання.

Для перевірки ефективності змішування, із крайньої точки конвеєра збору борошна відібрали 10 зразків з інтервалом у 2 хвилини, після чого виконали пробну лабораторну випічку. Встановлено, що об'єм хліба варіювався в межах від 520 до 560 см³, що в 1,5-1,6 раза більше порівняно з контрольним зразком без добавки (об'єм – 355 см³). Пористість також зросла в 1,1 раза і становила 79–82 % (рис. 4). Коефіцієнт варіації дорівнював – 4,2 %, тобто змішування відбулося з оцінкою «добре».

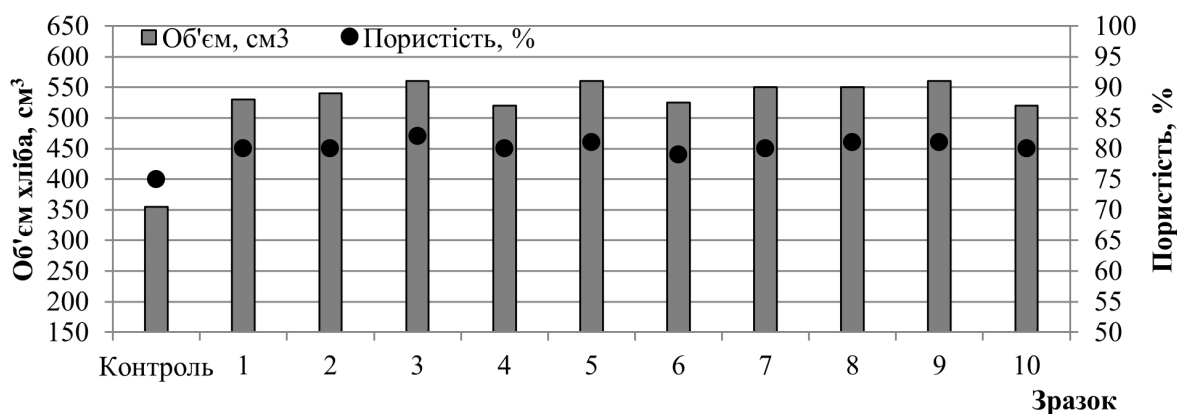


Рис. 4. Оцінка ефективності змішування борошна з технологічною добавкою за пробною лабораторною випічкою

При змішуванні борошна з ферментами необхідно уникати високої температури й вологості, тому що ці фактори сприяють інактивації ферментного препарату.

Для ефективного змішування борошна з технологічною добавкою необхідно виконувати такі рекомендації:

- для багатокомпонентної технологічної добавки слід використовувати декілька дозаторів або замовляти готову технологічну добавку у фірми-виробника;
- дозатор слід встановлювати над конвеєром збору борошна на відстані не менше 3-4-х метрів до кінця конвеєра (рис. 5);
- при додаванні технологічних добавок у мінімальному дозуванні слід готувати попередню суміш у співвідношенні 1:20.

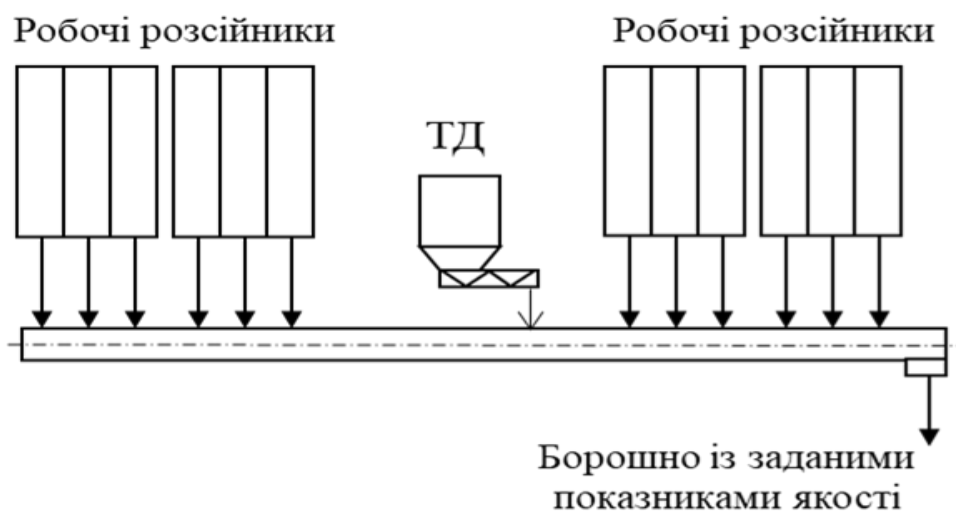


Рис. 5. Технологічна схема змішування технологічної добавки на борошномельному заводі

Висновки. На заводах середньої та малої продуктивності є технічна можливість встановлення дозуючих пристроїв для автоматичного введення технологічних добавок на етапі формування сортів борошна. Це дозволяє оперативно коригувати якісні характеристики готового продукту відповідно до заданих параметрів, не змінюючи основного процесу виробництва.

Найкращі показники рівномірності змішування досягаються при використанні горизонтального лопаткового змішувача з частотою обертання $1,33\text{--}1,67\text{ с}^{-1}$ та тривалістю процесу 90–180 секунд. Ключовим критерієм ефективності виступав коефіцієнт варіації розподілу вітаміну В₂, який зменшувався до прийняттого рівня при дотриманні зазначених параметрів.

Встановлення дозуючого пристрою безпосередньо над конвеєром збору борошна забезпечує рівномірне внесення технологічної добавки, що підтверджено низьким коефіцієнтом варіації (3,2 %) та покращеними показниками якості випеченого хліба – зростанням об'єму в 1,5–1,6 раза та пористості в 1,1 раза в порівнянні з контрольним зразком.

Для досягнення високої якості змішування необхідно уникати впливу високої температури та вологості, а також при додаванні мінімальних дозувань компонентів – використовувати попередню суміш ферментних препаратів у співвідношенні 1:20 або більше. У разі використання двох і більше компонентів доцільно застосовувати кілька дозаторів або замовляти готові суміші від надійних виробників.

Список використаних джерел

1. Жигунов, Д. О., Волошенко, О. С., & Браславцева, І. В. (2021). *Технологія та оцінка якості зернових продуктів: Монографія до 90-річ. каф. Технології переробки зерна* (Д. О. Жигунова & О. С. Волошенко, Ред.). ОЛДІ-ПЛЮС.
2. Соколова, Н. Ю., Котузаки, О. М., & Пожиткова, Л. Г. (2018). Аналіз проблем хлібопекарської галузі, стан ринку та актуальні шляхи розширення асортименту. *Grain Products and Mixed Fodder*, 18(3), 20–24. <https://doi.org/10.15673/gpmf.v18i3.1074>.
3. Toporash, I., Chervonis, M., & Voloshenko, O. (2022). The problem of assessing the baking quality of wheat with genetically different alleles of storage proteins. *Grain Products and Mixed Fodder*, 22(4), 7–11. <https://doi.org/10.15673/gpmf.v22i4.2531>.
4. Крутовий, Ж. А., Захаренко, Г. В., & Захаренко, В. О. (2014). Три принципи створення борошняних виробів. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. праць ХДУХТ*, 2, 222–230.
5. Rybalka, A. I., Morgun, B. V., & Polyshchuk, S. S. (2018). Gpc-b1 (nam-b1) gene as a new genetic resource in wheat breeding for high grain protein content and micronutrients. *Fiziologia rastenij i genetika*, 50(4), 279–298. <https://doi.org/10.15407/frg2018.04.279>.
6. Hospodarenko, G. M., Liubych, V. V., Polianetska, I. A., & Zheliezna, V. V. (2020). Yield and quality of soft wheat cereal products depending on variety. *Bulletin of Uman National University of Horticulture*, 1, 90–97. <https://doi.org/10.31395/2310-0478-2020-1-90-97>.
7. Najera S.P.G. (2014). A compositional breakage equation for first break roller milling of wheat: Thesis. Satake Centre for Grain Process Engineering, 245. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.03.001>.
8. Брославцева І. В. (2013). *Удосконалення процесу формування готової продукції в технології сортового помелу пшениці* [Автореф. дис. ... канд. техн. наук] Одеська нац. акад. харч. техн.
9. Мерко, І. Т., & Моргун, В. О. (2001). *Наукові основи і технологія переробки зерна*. Друк.
10. Мерко, І. Т. (2010). *Технологія мукомельного і круп'яного виробництва*. Друкарський дім.
11. Жигунов, Д. О., Ковальова, В. П., & Ковальов, М. О. (2019). Визначення показників якості індивідуальних потоків борошна з заводу зі скороченою схемою технологічного процесу. *Технічні науки та технології*, 1, 195–204. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2019-1\(15\)-195-203](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2019-1(15)-195-203).
12. Dubreil, L. (2002). Recherche de rôle biologique des puroindolines et mise en évidence de leurs potentialités technologiques dans la transformation des céréales. *Sciences des Aliments*, 4(98), 228–231.
13. Melim Miguel, A. S., Souza, T., Costa Figueiredo, E. V. d., Paulo Lobo, B. W., & Maria, G. (2013). Enzymes in bakery: Current and future trends. *У Food industry*. InTech. <https://doi.org/10.5772/53168>.

14. Lutz Popper (2010). *Mühlenchemie Ahrensburg. Enzymes: les meilleurs amis des farines. Sciencedes Aliments*, 2, 34-46.
15. Єгоров, Б. В. (2011). *Технологія виробництва комбікормів*. Друк. дім. <https://card-file.ontu.edu.ua/handle/123456789/3292>.
16. Ковальова, В. П. (2019). *Розробка технологія виробництва борошна із заданими показниками якості* [Автореф. дис. ... канд. техн. наук] Одеська нац. акад. харч. техн. <https://card-file.ontu.edu.ua/handle/123456789/11001>.
17. Zhygunov, D., Mardar, M., & Kovalyova, V. (2018). Use of enzyme preparations for improvement of the flour baking properties. *Food Science and Applied Biotechnology*, 1(1), 26. <https://doi.org/10.30721/fsab2018.v1.i1.21>.
18. Gänzle, M. G., Loponen, J., & Gobetti, M. (2008). Proteolysis in sourdough fermentations: Mechanisms and potential for improved bread quality. *Trends in Food Science & Technology*, 19(10), 513–521. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.04.002>
19. Держстандарт України. (1999). Борошно пшеничне. Технічні умови. (ГСТУ 46.004-99). https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71279.
20. Єгоров, Б. В., Шаповаленко, О. І., & Макаринська А. В. (2007). *Технологія виробництва преміксів*. Центр учбової літератури.

References

1. Zhygunov, D.O., Voloshenko, O.S., & Braslavytseva, I.V. (2021). *Tekhnolohiia ta otsinka yakosti zernovykh produktiv. Monohrafiia do 90-richchia kafedry Tekhnolohii pererobky zerna [Technology and quality assessment of grain products. Monograph for the 90th anniversary of the Department of Grain Processing Technology]*. Oldi plius. <https://card-file.ontu.edu.ua/items/9aa69161-2031-4859-80e2-ec7d5ea3abdf>.
2. Sokolova, N. Yu., Kotuzaki, O. M. & Pozhytkova, L. H. (2018) Analiz problem khlibopekarskoi haluzi, stan rynku ta aktualni shliakhy rozshyrennia asortymentu. [Analysis of the problems of the baking industry, the state of the market and current ways to expand the range]. *Zernovi produkty i kombi-kormy – Grain products and compound feeds*, 2(18), 20-24.
3. Toporash, I., Chervonis, M. & Voloshenko, O. (2022). The problem of assessing the baking quality of wheat with genetically different alleles of storage proteins. *Grain Products and Mixed Fodder's*, 22(4, 88), 7-11. <https://doi.org/10.15673/gpmf.v22i4.2531>.
4. Krutovyi, Zh. A., Zakharenko, H. V., Zakharenko, V. O. (2014). Try pryntsyipy stvorennia boroshnianykh vyrobiv [Three principles of creating flour products]. *Prohresyyni tekhnika ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv, restorannoho hospodarstva i torhivli: zb. nauk. prats KhDUKhT - Progressive equipment and technologies of food production, restaurant management and trade: collection of scientific works of the KhDUHT*, 2, 222-230.
5. Rybalka, O. I., Morhun, B. V. & Polishchuk S. S. (2018). GPC-B1 (NAM-B1) Hen yak novyi henetychnyi resurs u selektsii pshenytsi na pidvyshchennia vmistu bilka v zerni ta mikroelementiv [Gene as a new genetic resource in wheat breeding to increase the protein content in grain and trace elements.]. *Fiziolohiia roslyn i henetyka – Plant physiology and genetics*, 4(50), 279-293. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vaan_2018_11_18.
6. Hospodarenko, H. M. (2020) Vykhyd i yakist krupianykh produktiv iz zerna pshenytsi miakoi zalezno vid sortu [Yield and quality of cereal products from soft wheat grain depending on the variety]. *Visnyk Umanskoho NUS – Bulletin of the Uman NUH*, 1, 90-98 http://nbuv.gov.ua/UJRN/vumnuc_2020_1_20.
7. Najera S.P.G. (2014). A compositional breakage equation for first break roller milling of wheat: Thesis. *Satake Centre for Grain Process Engineering*, 245. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2016.03.001.
8. Broslavytseva I. V. (2013). Udoshkonalennia protsesu formuvannia hotovoi produktsii v tekhnolohii sortovoho pomelu pshenytsi [Improving the process of forming finished products in the technology of varietal wheat milling]. [PhD dissertation; Odesa National Academy of Food Technologies].
9. Merko, I. T., & Morhun, V. O. (2001). *Naukovi osnovy i tekhnolohiia pererobky zerna [Scientific foundations and technology of grain processing]*. Друк.
10. Merko, I. T. (2010). *Tekhnolohiia mukomelnoho i krupianoho vyrobnytstva [Technology of flour milling and cereal production]*. Drukarskyi dim.

11. Zhyhunov, D. O., Kovalova, V. P., & Kovalov M. O. (2019). Vyznachennia pokaznykiv yakosti individualnykh potokiv boroshna z zavodu zi skorocheniu skhemoiu tekhnologichnoho protsesu [Determination of quality indicators of individual flour flows from the plant with a shortened technological process diagram]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii - Technical Sciences and Technologies*, 1, 195-204. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2019-1\(15\)-195-203](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2019-1(15)-195-203).
12. Dubreil L. (2002) Recherche de rôle biologique des purindolines et mise en évidence de leurs potentialités technologiques dans la transformation des céréales. *Sciences des Aliments*, 4(98), 228-231.
13. Melim Miguel, A. (2013). Enzymes in Bakery: Current and Future Trends. *Food Industry*, 1, 287-321. DOI:10.5772/53168.
14. Lutz Popper (2010). Mühlenchemie Ahrensburg. Enzymes: les meilleurs amis des farines. *Sciences des Aliments*, 2, 34-46.
15. Yehorov, B. V. (2011). Tekhnologhiia vyrobnytstva kombikormiv [Technology of compound feed production]. Publishing House. <https://card-file.ontu.edu.ua/handle/123456789/3292>.
16. Kovalova, V. P. (2019). Rozrobka tekhnologhiia vyrobnytstva boroshna iz zadanykh pokaznykamy yakosti [Development of flour production technology with specified quality indicators]. [Doctors' thesis, Odesa National Academy of Food Technologies]. <https://card-file.ontu.edu.ua/handle/123456789/11001>.
17. Zhygunov, D., Mardar, M., & Kovalova, V. (2018). Use of enzyme preparations for improvement of the flour baking properties. *Food Science and Applied Biotechnology*, 1, 26-32. DOI:10.30721/fsab2018.v1.i1.21.
18. Ganzle, MG., Lopenen, J., & Gobetti M. (2008). Proteolysis in sourdough fermentations: mechanisms and potential for improved bread quality. *Trends in Food Science and Technology*, 19(10), 513-521. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.04.002>.
19. Derzhstandart Ukrainy. (1999). *Boroshno pshenychnye. Tekhnichni umovy* [State Statistics of Ukraine. Wheat flour. Technical conditions]. (1999). HSTU 46.004-99 from June 20, 1999. Derzhstandart Ukraine. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71279.
20. Yehorov, B. V., Shapovalenko, O. I., & Makarynska A. V. (2007). Tekhnologhiia vyrobnytstva premiksiv [Premix production technology]. Center of study literature.

Отримано 18.04.2025

UDK 664.681:620.182.5

Dmytro Zhygunov¹, Mykhailo Kovalov², Natalia Khorengy³, Vasylyna Kovalova⁴¹Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Technology of Cereal, Bread and Confectionary Products
Odesa National University of Technology (Odesa, Ukraine)E-mail: dimius75@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9435-2266>. ResearcherID: D-1372-2015²PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of Technology of Cereal, Bread and Confectionary Products
Odesa National University of Technology (Odesa, Ukraine)E-mail: mak2111@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3785-9428>. ResearcherID: KIH-4164-2024³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Technology of Cereal, Bread and Confectionary Products
Odesa National University of Technology (Odesa, Ukraine)E-mail: natalka.onaft@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7912-4791>. ResearcherID: B-3897-2016⁴PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of Technology of Cereal, Bread and Confectionary Products
Odesa National University of Technology (Odesa, Ukraine)E-mail: k.vasilisa@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2270-1337>. ResearcherID: D-7510-2016

RESEARCH ON THE PARAMETERS OF MIXING TECHNOLOGICAL ADDITIVES WITH WHEAT FLOUR

The article is devoted to studying feasibility and effectiveness of introducing technological additives directly into the production process at flour milling enterprises. The advantages of using additives to stabilize the quality of wheat flour—regardless of properties of the raw material influenced by climatic conditions or grain variety—are substantiated. Particular attention is paid to the effect of amylolytic enzyme preparations on the baking properties of flour, including improvements in dough elasticity, water absorption, and the volume of finished products. Relevance of the topic is determined by the need to adjust baking properties of wheat flour, as confirmed by numerous studies by Ukrainian and European scientists. The aim of the study is to determine optimal conditions for dosing and mixing technological additives in the production process, using wheat flour as an example.

To achieve this goal, the technological scheme of the flour mill with a capacity of 150 tons per day was analyzed, qualitative characteristics of flour were studied, and optimal mixing conditions of flour with vitamin B₂ as a model additive were experimentally determined. Key mixing parameters were established under laboratory and industrial conditions, including mixing speed, duration, and equipment loading factor.

It was found that effective mixing is achieved at the rotation speed of 1.33–1.67 s⁻¹ and the duration of 90–180 s in the laboratory mixer. The study confirmed that increasing concentration of the additive positively affects the homogeneity of the mixture. In industrial conditions, using the EMCETec GLD 87 dispenser, uniform mixing with the variation coefficient of 4.2 %—classified as “good”—was achieved. Test baking results showed that the loaf volume of samples with additives increased by 1.5–1.6 times and porosity by 1.1 times compared to the control flour sample. The findings confirm effectiveness and feasibility of introducing technological additives into flour directly during production.

Results may be useful for specialists in the flour milling industry, developers of food enrichment technologies, and food product manufacturers.

Keywords: wheat flour; technological additive; dosing and mixing; flour milling plant; enzyme preparations; quality optimization.

Fig.: 5. References: 20.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-338-353](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-338-353)

УДК 663.2:631.41:543.544:519.24

Олександр Сергійович Луканін¹, Наталія Борисівна Мельник²¹доктор технічних наук, професор, академік НААН

Національна академія аграрних наук України (Київ, Україна)

E-mail: 0752las@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7786-5942>²провідний фахівець відділу охорони ландшафтів, збереження біорізноманіття і природозаповідання

Інститут агроєкології і природокористування НААН (Київ, Україна)

E-mail: 17natasha17@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1667-6780>**КОРЕЛЯЦІЇ ВПЛИВУ ҐРУНТУ ТА ІНШИХ ФАКТОРІВ
НА ЯКІСТЬ ЯБЛУЧНИХ ДИСТИЛЯТІВ**

У статті представлено результати міждисциплінарного дослідження впливу агрохімічних характеристик ґрунту на ароматичний профіль яблучних дистилятів, виготовлених із сорту Айдаред у чотирьох регіонах України. Дослідження включало повний цикл виробництва яблучного дистиляту, що охоплював агрохімічний аналіз ґрунтів (визначення рН, вмісту гумусу, азоту, фосфору, калію), збір плодів сорту Айдаред, оцінку якості соку, ферментацію з використанням трьох рас дріжджів («Сидрова 101», «Яблучна 7», дика мікрофлора). На завершальному етапі здійснювався газохроматографічний аналіз дистилятів з метою визначення концентрацій летких сполук, що формують ароматичний профіль продукту.

Ключові слова: плодові дистиляти; ґрунт; леткі сполуки; азот; калій; фосфор; айдаред.

Рис.: 5. Табл.: 1. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. В умовах активного розвитку галузі виробництва плодових дистилятів в Україні, зокрема яблучних, залишається відкритим питання забезпечення високої якості продукції, яка використовується для виробництва плодових дистилятів з яблук. Одним із ключових факторів, що визначають ароматичний профіль алкогольних напоїв, є ґрунт – сукупність ґрунтово-кліматичних умов регіону вирощування сировини. Однак у науковій літературі спостерігається дефіцит системних досліджень, присвячених вивченню впливу агрохімічних характеристик ґрунту на летких сполук, які формують ароматичну складову яблучних дистилятів.

У більшості наукових праць увага акцентується на сортових особливостях плодів, технологічних параметрах ферментації або впливі рас дріжджів, при цьому взаємозв'язок між агрохімічним складом ґрунтів та сенсорними властивостями кінцевого продукту залишається недостатньо вивченим. Відсутність такої інформації обмежує можливості прогнозованого управління якістю дистилятів та ускладнює створення ґрунто-орієнтованих продуктів із виразною регіональною ідентичністю.

У зв'язку з цим, дослідження, спрямоване на встановлення статистично значущих кореляцій між вмістом гумусу, макроелементів (азоту, фосфору, калію), кислотністю ґрунту (рН) та концентраціями ключових ароматичних компонентів (естери, вищі спирти, альдегіди) з різних регіонів України, що є науково обґрунтованим і практично важливим. Його результати можуть бути використані як основа для агротехнологічного планування садівничого виробництва, а також для розвитку географічно маркованих алкогольних брендів в Україні.

Постановка проблеми. Вирішальну роль у формуванні смаку та аромату у дистилятах залежить від складу ґрунту. На родючість ґрунту та врожайність сільськогосподарських культур впливають біологічні процеси, а на ці процеси, включаючи активність ферментів, впливає рН [1].

Кислотність і лужність ґрунту (рН) мають значний вплив на ріст і розвиток рослин. З цього процесу це в основному відображається у впливі клімату та елементів ґрунту на ріст рослин, тоді як клімат в основному впливає на вуглець, водень і кисень, які становлять 96 % в атмосфері. Більш важливими елементами в ґрунті є азот, фосфор і калій, а вторинними елементами є кальцій, магній, сірка тощо [2].

Ґрунт визнано ключовим чинником, від якого залежить кінцева якість сільськогосподарської продукції. Вивчення ролі ґрунтів у виноградному виноробстві в різних країнах ретельно проведено в останні десятиліття, що дає позитивні результати у виробництві конкурентоспроможних вин та брендів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У літературі багато уваги приділяється ролі ґрунтових умов для врожайності яблунь. Для оптимального фотосинтезу яблунь на ґрунтах, що лежать на муловому покриві, вологість ґрунту повинна становити 60-86 % від найнижчої вологоємності, на інших ґрунтах – 60...90 % від польової вологоємності у шарі 0...60 см. Помірний полив яблуні до вологості 50...70 % від польової вологоємності ґрунту забезпечував найвищу якість плодів; дефіцит води у ґрунті спричиняв утворення дрібних яблук з вищим вмістом аскорбінової кислоти, поліфенолів і сухих речовин. При проєктуванні садів важливо мати дані про вологість ґрунту.

Найактивніше споживання елементів живлення кореневою системою яблуні відбувалося в ґрунтовому шарі на глибині 40...60 см. У цей період засвоювалися такі елементи як N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu та Zn. У міжнародних дослідженнях, зокрема в США, Китаї, Індії, Латвії та Новій Зеландії, встановлено, що цей шар ґрунту є критичним для поглинання поживних речовин корінням яблуні. Зростання вмісту фосфору спочатку спостерігається у листках і лише потім - у плодах, що супроводжується збільшенням урожайності до 20 %. Ефективність функціонування кореневої системи тісно пов'язана зі структурою ґрунту: на цілинних більш родючих землях урожайність яблук у кілька разів вища, ніж на ґрунтах, виснажених попередніми монокультурами.

У 2019 китайські науковці Yanbing Qi, Rui Wang, Qianru Qin & Quan Sun опублікували статтю «*Soil affected the variations in grape and wine properties along the eastern foot of Helan Mountain*», China [3]. Вони досліджували чотири виноградники в межах однієї кліматичної зони, де посаджено виноград сорту Каберне Совіньйон 4-річного віку. Були відібрані зразки для дослідження відмінностей у властивостях винограду і вина. Результати показали, що виноград виноградника Лілан мали вищий вміст цукру та цукор-кислотне співвідношення, ніж Huida, Yuquan та Zhihuiyuanshi. Відповідно, виноград з виноградника Zhihuiyuanshi мав найвищий вміст танінів і загальних фенолів. Що стосується вин, то вино з виноградників Юцюань мало низький pH, але витримувався добре потенціал, і вино виноградника Zhihuiyuanshi мало найвищий тон, кольоровість, таніни, загальні феноли і вміст алкоголю, ніж в інших виноградниках. pH ґрунту позитивно корелює з антоціанами винограду і негативно корелював із загальною кислотністю у вині. Вуглець мікробної біомаси (МБС) корелювали з антоціанами у винограді.

Вміст вуглецю в мікробній біомасі (МБС) позитивно корелював із вмістом антоціанів у винограді. У свою чергу, азот мікробної біомаси (МБН) виявив позитивну залежність від рівня розчинних сухих речовин у винограді, а також був пов'язаний із підвищеним вмістом танінів і загальних фенольних сполук у вині.

Сучасне дослідження Amoah-Antwi et al., 2022 «*Assessing factors controlling structural changes of humic acids in soils amended with organic materials to improve soil functionality*» свідчить, що гумусові кислоти мають критичне значення для стабілізації структури ґрунту, підтримки катіонного обміну та покращення водно-повітряного режиму. Робота Amoah-Antwi та співавт. (2022) наголошує, що внесення органічних матеріалів здатне істотно змінювати структурну організацію гумусових сполук, що, у свою чергу, впливає на мікробну активність і ферментативні процеси. Водночас у науковому дискурсі досі недостатньо висвітлено, як подібні зміни структури органічної речовини ґрунту впливають на вторинний метаболізм рослин та біосинтез ароматичних компонентів у дистилятах. Відтак, вивчення кореляції між концентрацією гумусу та леткими сполуками в спиртах відкриває нові перспективи для цілеспрямованого контролю якості фруктових сировини [4].

Дослідження Sauze et al., 2018 «*The role of soil pH on soil carbonic anhydrase activity*» встановлює фундаментальну роль pH ґрунту у регуляції активності ферментів, зокрема карбонатної ангідрози, яка бере участь у вуглецевому циклі. Однак у контексті фруктових культур та їхньої подальшої спиртової переробки недостатньо вивченим залишається зв'язок між

кислотно-лужним балансом ґрунту та синтезом ароматичних компонентів у процесі ферментації. Таким чином, подальше дослідження кореляцій між рН ґрунту та профілем летких сполук у дистилятах дає змогу деталізувати біохімічні наслідки впливу теруару [5].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри наявність ґрунтової кількості досліджень, присвячених якості фруктових дистилятів, більшість із них зосереджується на технологічних аспектах переробки сировини, виборі дріжджових культур або впливі процесів витримки. Натомість початковий вплив теруару – зокрема агрохімічних параметрів ґрунтів – на формування ароматичного профілю плодового дистиляту залишається недостатньо вивченим, особливо в контексті яблучної сировини. Переважна частина наукових праць або узагальнює роль ґрунтових характеристик, або не включає їх до комплексного хімічного аналізу кінцевого продукту.

До цього часу не було проведено глибокого порівняльного аналізу взаємозв'язків між рН, вмістом гумусу, макроелементами (азотом, фосфором, калієм) та концентраціями летких компонентів яблучних дистилятів, зокрема таких важливих ароматичних сполук як ацетальдегід, естери та вищі спирти. Також бракувало системних досліджень, що враховують регіональні відмінності ґрунтів і застосовують різні раси дріжджів у ферментації тієї самої сировини.

Існує чимало прикладів, що демонструють вплив мінеральних речовин, органічних добрив та агротехнічних заходів на урожайність яблуні. Проте даних щодо математичної залежності між конкретними показниками ґрунту та врожайністю недостатньо. Саме тому метою дослідження було визначити кореляційні зв'язки між основними ґрунтовими характеристиками та урожайністю яблунь на слабкорослих підщепах.

Це дослідження має на меті з'ясувати конкретні кореляції між ключовими параметрами ґрунту та хімічним профілем яблучних дистилятів, пропонуючи глибше розуміння ефекту теруару в цій спеціалізованій галузі сільського господарства. Таким чином, дана стаття покликана заповнити цю прогалину шляхом проведення багатофакторного дослідження, яке інтегрує агрохімічні параметри, технологічні етапи виробництва та хімічний аналіз ароматичних сполук дистиляту з яблук сорту Айдаред, вирощених у чотирьох агрогеографічних зонах України.

Мета дослідження. Метою дослідження є встановлення та кількісна оцінка кореляцій між агрохімічними параметрами ґрунту (рН, вміст гумусу, азоту, фосфору та калію) та концентрацією основних летких сполук (ацетальдегід, метанол, естери, вищі спирти, кислоти) у яблучних дистилятах, виготовлених із сорту Айдаред. Дослідження спрямоване на виявлення закономірностей, які визначають формування ароматичного профілю дистиляту залежно від теруару, з урахуванням географічного положення, складу ґрунту та особливостей ферментації.

Виклад основного матеріалу.

Методи досліджень. Хімічні та органолептичні показники об'єктів досліджень визначали за загальноприйнятими та спеціальними методиками технохімічного контролю у садівництві, консервній та виноробній промисловостях. Відбір яблук для аналізу проводили згідно з Програмою і методикою сортовивчення плодових, ягідних та горіхоплідних культур. Відбір проб для аналізів соків, сидрових матеріалів та ін. проводили згідно з ГОСТ 14137–74. Підготовку проб для визначення масової концентрації металів проводили згідно з ГОСТ 26929–94.

Дослідження проводили за такою схемою:

1. Проведення технологічної оцінки сировини для виробництва плодових дистилятів.
2. Технологічну оцінку сортів яблук для виробництва сидрів та їх класифікацію проводили згідно з вимогами до сировини для виробництва сидру у світі (за хімічним складом – масовою концентрацією кислот, фенольних речовин та цукрів).

Технологічну оцінку гібридних форм яблук, кребів (напівкультурних сортів яблук) та видів *Malus* на придатність для використання у селекції вітчизняних сидрових сортів яблук також проводили згідно з вимогами до сировини для виробництва у світі.

Фізико-хімічні показники визначали за методами:

- масову частку сухих розчинних речовин – згідно з ДСТУ ISO 751-2004;
- масову концентрацію відновлюваних (редуючих) цукрів – згідно з ДСТУ 4954:2008;
- масову концентрацію титрованих кислот (у перерахунку на яблучну) – згідно з ДСТУ 4957:2008;
- масову концентрацію фенольних речовин – згідно з ДСТУ 4112.41:2003 та згідно з перманганатометричним методом Левентал-Нейбауера, модифікованим на дослідній станції у м. Лонг Аштон (Англія).

Проведення аналізу передбачає титрування 1 мл зразка соку свіжим розчином 0,025 н KMnO_4 у присутності 5 мл розчину свіжого індикатору індигокарміну до зеленого кольору і потім від однієї краплі до жовтого. Приготування розчинів: розчин 0,025 н KMnO_4 готують перед аналізом розведенням 0,1 н розчину KMnO_4 в 4 рази; розчин індикатору індигокарміну – 1 г порошку індигокарміну розчинюють у воді з 50 мл H_2SO_4 концентрованого, об'єм розчину доводять до 1 л, кожного разу перед аналізом розбавляють розчин так, щоб на титрування 5 мл індикатору індигокарміну використовувалось точно 1 мл свіжого розчину 0,025 н KMnO_4 . Розрахунок за формулою:

$$X = A - 1, \text{ г/дм}^3 \text{ або } X = (A - 1) / 10, \%, \quad (1)$$

де x – загальна масова концентрація фенольних речовин, %, A – кількість 0,025 н KMnO_4 , який пішов на титрування зразка, мл, 1 – кількість 0,025 н KMnO_4 , який пішов на титрування індикатору індигокарміну, мл, 10 – перерахунок у %;

- об'ємну частку етилового спирту – згідно з ДСТУ 4181:2003,;
- активну кислотність (рН) – потенціометричним методом за допомогою рН-метру «Іономір І-130»;
- масову концентрацію легких кислот – згідно з ДСТУ ГОСТ 13191:2009;
- масову концентрацію іонів металів – методом атомно-абсорбційної спектроскопії згідно з ГОСТ 30178–96; ДСТУ 7670:2014.
- стабільність сидрових матеріалів визначали за допомогою тесту на схильність до незворотних колоїдних помутнень (традиційний тест));
- органолептичну оцінку сидрових матеріалів та сидрів – дегустацією за, відповідно, 8-ми та 10-бальною системами.

Методи визначення якості ґрунту:

- Відбір проб ґрунтів здійснювали згідно з ДСТУ 4287:2004 «Якість ґрунту. Відбирання проб»
- Визначення рухомих сполук фосфору і калію за модифікованим методом Чирикова;
- Визначення рухомих сполук фосфору і калію за модифікованим методом Мачигіна;
- Методи визначення валового фосфору і валового калію в модифікації ННЦ ІГА ім. О. Н. Соколовського;
- Визначання рухомих сполук фосфору і калію за методом Кірсанова в модифікації ННЦ ІГА;
- Визначання рухомих сполук калію за методом Маслової в модифікації ННЦ ІГА ім. О. Н. Соколовського.

Місця дослідження та збір зразків. Дослідження проводилося в чотирьох різних географічних локаціях України: Сокиряни, Жорнище, Шура та Суми. Ці місця були обрані для представлення різних ґрунтово-кліматичних умов. Вибір сорту Айдаред відбувся шляхом порівняння і порівняння вирощування сортів у різних зонах. Зразки яблук збирали щорічно протягом 3 років, та місцевий дикий сорт яблук, вирощений за

стандартними сільськогосподарськими практиками, відповідними для кожного регіону. У процесі ферментації застосовували три різні варіанти дріжджової мікрофлори: два штами з локальними назвами – «Сидорова 101» та «Яблучна 7», а також природну (дику сформовану) мікрофлору, характерну для відповідних регіонів. Конкретна видова класифікація дріжджів у межах цього дослідження не проводилась.

Аналіз дистилятів.

Аромат є атрибутом якості яблук, що складається не лише з одного критичного компонента, а складної суміші летких речовин, яка залежить від летких сполук, їх концентрацій та порогових значень запаху. Нині у яблуках ідентифіковано понад 300 летких речовин [6].

Більшість летких речовин класифікуються на естери (78-92 % від загальної кількості летких речовин), спирти (6-16 % від загальної кількості летких речовин), альдегіди та кетони [7]. Однак на склад і концентрацію летких речовин впливає багато факторів, включаючи стадію зрілості [8], умови зберігання [9], кліматичні умови та вплив теруару [10]. Наприклад, альдегіди домінують у незрілих яблуках. Однак концентрація альдегідів зменшується протягом періоду дозрівання яблук, тоді як основними летючими речовинами стають естери та спирти, концентрація яких зростає [11]. Крім того, сорт яблук є ще одним ключовим фактором, який має великий вплив на вміст летких речовин. Дослідження різних сортів виявили багато відмінностей як за складом, так і за концентрацією летких речовин [12].

Із зібраних плодів були виготовлені яблучні дистиляти з використанням єдиних протоколів ферментації та дистиляції, щоб мінімізувати процедурну мінливість. Отримані спирти були проаналізовані на вміст п'яти основних летких сполук:

Ацетальдегід: поширений альдегід, що впливає на свіжі, зелені або гострі нотки. Аналіз ацетальдегіду дає змогу відстежити якість ферментаційного процесу та вплив ґрунтових умов на інтенсивність біохімічного перетворення вуглеводів у яблучній сировині.

Метанол: токсичний спирт, який зазвичай присутній у незначних кількостях, рівень якого є вирішальним для безпеки та контролю якості. Метанол було включено до переліку аналізованих сполук як показник технологічної якості та безпеки яблучних дистилятів. Його утворення є типовим для продуктів ферментації, що базуються на фруктовій сировині з високим вмістом пектинів, зокрема яблук. Контроль за концентрацією метанолу дозволяє оцінити коректність процесів ферментації та дистиляції, а також гарантувати відповідність готового продукту санітарним нормам.

Естери: різноманітна група сполук, які переважно відповідають за фруктові та квіткові аромати. Їхня концентрація є сенсорним маркером якості дистиляту: надмірність – може призвести до різкого запаху, а дефіцит – до бідного аромату. Тому включення естерів до дослідження дозволяє оцінити органолептичний потенціал продукту, а також встановити зв'язок з ґрунтовими умовами та ферментаційним середовищем [13].

Вищі спирти: у межах дослідження було проаналізовано вміст основних представників вищих спиртів, які відіграють критичну роль у формуванні аромату та структури яблучного дистиляту. Зокрема, до них належать: ізоаміловий спирт (ізопентанол), н-пропанол, ізобутанол (ізобутиловий спирт), 1-бутанол та 1-гексанол. Загальна концентрація цих сполук була визначена як сума вищих спиртів. Ці компоненти складають основу сивушних олій, які при помірному вмісті сприяють повноті смаку та ароматичній насиченості напою, але за надлишкових концентрацій можуть обумовлювати небажані сенсорні відтінки.

Сивушні олії сприяють повноті та складності ароматичних нот, хоча в надлишку можуть призвести до небажаних сенсорних властивостей.

Органічні кислоти: сприяють загальній збалансованості та свіжості, а також діють як попередники етерифікації.

Аналіз ґрунту. У межах дослідження встановлено, що ґрунтово-кліматичні умови досліджуваних регіонів України – зокрема, Сокирянського району (Чернівецька обл.), с. Жорнище Іллінецького району та с. Шура Копіївська Тульчинського району (Вінницька обл.) і Сумської області – мають істотний вплив на метаболізм летких сполук у яблучній сировині. У цих зонах переважають ґрунти із середнім або підвищеним вмістом гумусу та азоту, що характерно для чорноземів та сірих лісових ґрунтів – типових для Лісостепу.

Зразки ґрунту були зібрані з яблуневих садів у кожному місці протягом одного і того ж трирічного періоду. Були визначені наступні критичні параметри ґрунту: рН – показник кислотності або лужності ґрунту, що впливає на доступність поживних речовин і мікробну активність:

1. Вміст гумусу (Гумус): Вміст органічної речовини, що свідчить про родючість ґрунту, його структуру та здатність утримувати воду.
2. Вміст азоту (N): Основний макроелемент, необхідний для росту рослин і синтезу білків.
3. Вміст фосфору (P): Необхідний макроелемент, що бере участь у передачі енергії та розвитку коренів.
4. Вміст калію (K): Важливий макроелемент для активації ферментів, регулювання водного балансу та якості плодів.

Результати дослідження. У системному вивченні якості плодового дистилляту важливим є не лише хімічний аналіз окремих стадій виробництва, а й встановлення причинно-наслідкових зв'язків між агрохімічними характеристиками сировини та кінцевим ароматичним профілем продукту. Такий підхід дозволяє виявити ключові фактори впливу, а також забезпечити керованість процесів на ранніх етапах (вибір ділянки, агротехніка, підбір дріжджів). Кореляційний аналіз у цьому дослідженні проведено для того, щоб виявити залежності між показниками ґрунту (рН, вміст гумусу, азоту, фосфору та калію), параметрами яблучного соку та концентраціями летких ароматичних сполук у дистиллятах. Це дало змогу оцінити, наскільки глибоко локальні ґрунтово-кліматичні особливості здатні впливати на хімічну природу напою навіть через кілька технологічних стадій – від соку до готового спирту.

Для встановлення залежності між агрохімічними характеристиками ґрунту та ароматичним профілем дистилляту було проведено кореляційний аналіз між вмістом гумусу в ґрунтах чотирьох регіонів дослідження: Зона 1 – Сокиряни, Зона 2 – Жорнище, Зона 3 – Шура, Зона 4 – Суми та концентраціями основних летких сполук, різних штамів дріжджів: Раса 1 – «Сидрова 101», Раса 2 – «Яблучна 7», Раса 3 – «Дикі» визначених у яблучних дистиллятах.

На графіку (рис. 1) представлено зв'язок між вмістом **гумусу** (%) та рівнями ацетальдегіду, метанолу, естерів, спиртів та кислот. На графіку подано усереднені значення для чотирьох агрогеографічних Зон та трьох Рас дріжджової мікрофлори, відповідно. Вважаємо, що підвищений вміст гумусу, сприяє кращому забезпеченню рослин доступними сполуками азоту та мікроелементами, що впливає на профіль амінокислот у яблуках, а отже – і на біосинтез ароматичних метаболітів під час бродіння.

Найвищу кореляцію з вмістом гумусу продемонстрував ацетальдегід у зразках, зброджених дріжджами «Дикі» (коефіцієнт $r = 0,903$), що свідчить про тісний зв'язок між органічним збагаченням ґрунту і біосинтезом альдегідів у процесі ферментації. Загалом, чим вищий вміст гумусу в ґрунті, тим вищі концентрації естерів, вищих спиртів і ацетальдегіду, що формують фруктовий-квітковий аромат яблучного дистилляту. Це підтверджує гіпотезу про позитивний вплив ґрунту на сенсорний профіль готового продукту.

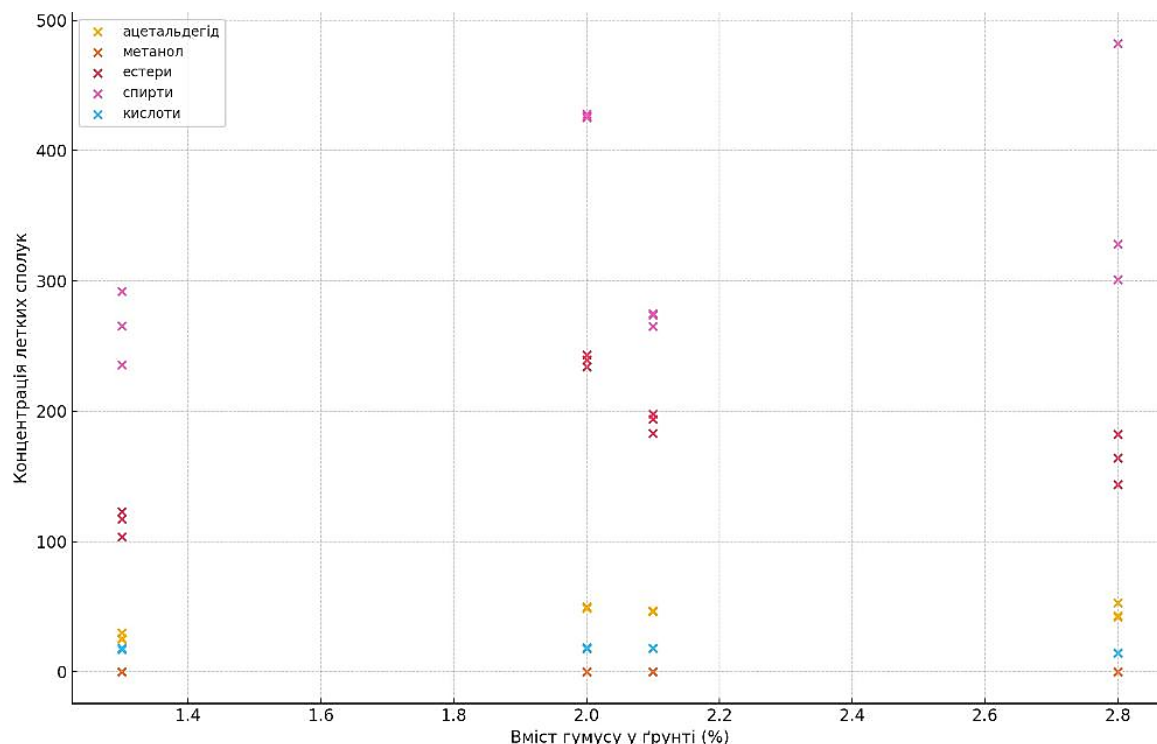


Рис. 1. Залежність концентрацій ацетальдегіду, метанолу, естерів, спиртів та кислот від вмісту гумусу в ґрунті

Джерело: розроблено авторами.

Наступним етапом дослідимо вплив рН ґрунту в досліджуваних зонах та концентраціями основних летких сполук, різних штамів дріжджів, визначених у яблучних дистилятах на формування летких компонентів дистиляту (рис. 2). Кореляція охоплює всі чотири зони та три раси дріжджів, відображаючи детальну картину впливу кислотності ґрунту на ароматичний профіль. Реакція ґрунтового середовища (рН) є важливим параметром, що впливає як на біодоступність макро- і мікроелементів, так і на метаболізм самої рослини, а згодом – і на характер ферментації.

Аналіз свідчить, що значення рН ґрунту знаходились у межах від 5,1 до 5,4, тобто в діапазоні слабокислого до нейтрального. Саме в цьому інтервалі відбувається оптимальне засвоєння макроелементів і прояв активності ґрунтових мікроорганізмів, що суттєво впливає на метаболізм рослин та дріжджів під час ферментації. Найсильніша кореляція зафіксована для ацетальдегіду, зброженого Расою 2 – «Яблучна 7» у Зоні 1 – Сокиряни: коефіцієнт $r = -0,843$, що вказує на сильний зворотний зв'язок. Тобто, зі зростанням рН знижується концентрація ацетальдегіду, що може бути пов'язано з регуляцією ферментативної активності альдегіддегідрогеназ у дріжджових клітинах.

Загалом, зі зростанням рН (від 5,1 до 5,4) тенденції змін різних летких компонентів виявляють індивідуальні патерни. Вищі спирти і естери демонструють помірну позитивну залежність, тоді як метанол залишався стабільно низьким. Це свідчить про те, що кислотність ґрунту не лише регулює поживний режим рослини, а й опосередковано керує ароматичним профілем кінцевого продукту.

Таким чином, можна стверджувати, що рН ґрунту може розглядатися як важливий параметр ферментативної керованості ароматогенезу, що дозволяє виробникам враховувати кислотність ділянки як один із факторів оптимізації якості дистиляту.

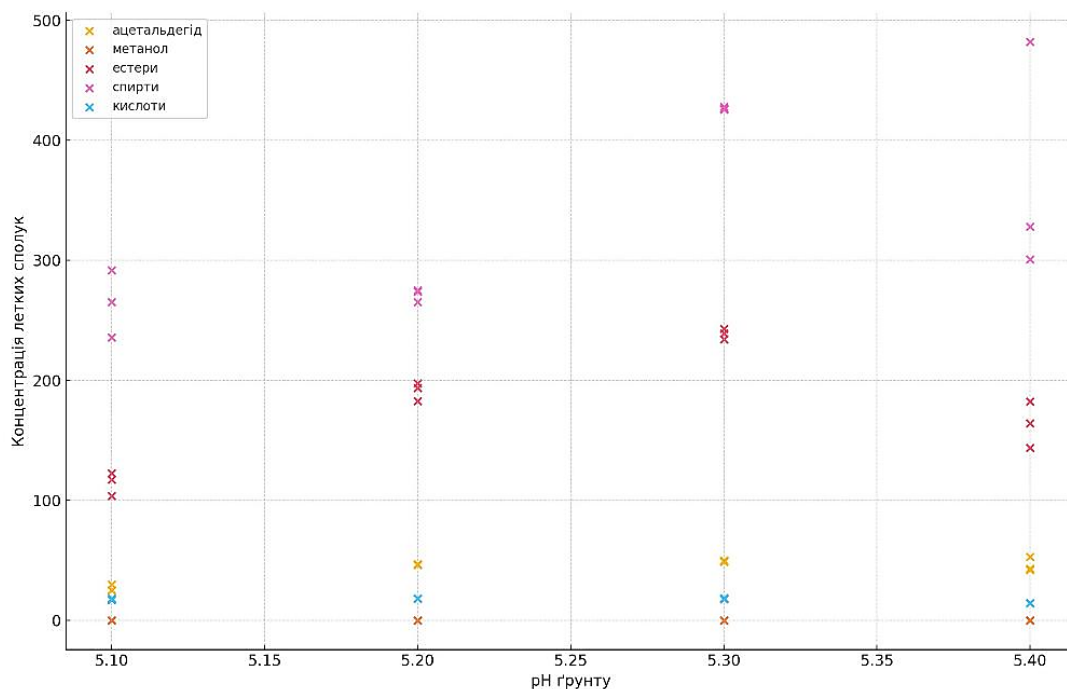


Рис. 2. Залежність показника pH ґрунту з леткими сполуками у яблучних дистилятах
Джерело: розроблено авторами.

Наступним етапом перевіriamo залежність летких компонентів яблучних дистилятів від концентрації азоту в ґрунті (рис. 3). В аналізі враховано чотири агроєкологічні зони (Зона 1–4) і три дріжджові раси (Раса 1–3). Азот є одним з ключових макроелементів, що визначає не лише врожайність плодів культур, а й хімічний склад їхньої первинної та вторинної метаболічної продукції [14]. У нашому дослідженні проаналізовано вплив вмісту загального азоту в ґрунті на концентрації летких компонентів – ацетальдегіду, естерів, метанолу, спиртів та кислот – у отриманих яблучних дистилятах.

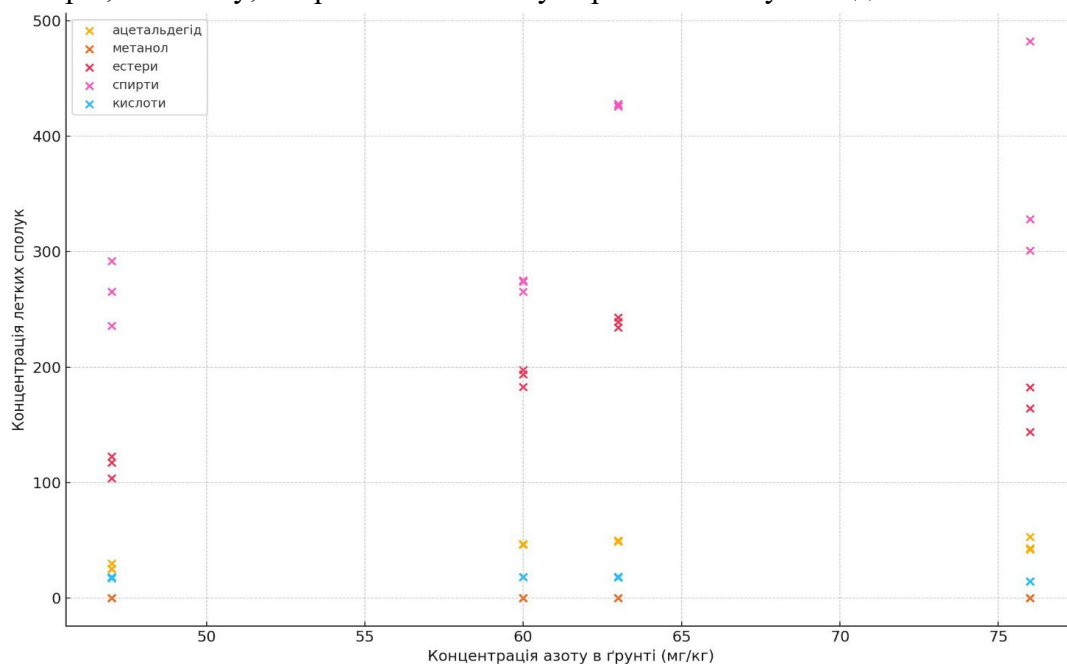


Рис. 3. Залежність летких компонентів яблучних дистилятів від концентрації азоту в ґрунті

Джерело: розроблено авторами.

Усі значення азоту варіювалися в межах від 47 до 76 мг/кг, що відповідає умовам середньо- та високопродуктивних чорноземів та сірих лісових ґрунтів. Виявлено чіткий позитивний вплив азотного живлення на синтез ароматичних метаболітів, особливо – вищих спиртів та естерів.

Найсильнішу кореляцію зафіксовано для ацетальдегіду, зброженого Расою 3 – «Дикі» у Зоні 3 – Шура: $r = +0.962$, що свідчить про потужний позитивний ефект. Це узгоджується з науковими даними про роль азоту у стимуляції амінокислотного метаболізму, що, у свою чергу, активує шляхи біосинтезу вищих спиртів, естерів та альдегідів у дріжджів.

Окрім ацетальдегіду, загалом вищі рівні азоту сприяють зростанню концентрацій ароматичних сполук, покращуючи сенсорні характеристики дистиляту. Це дає підстави розглядати азот не лише як агрономічний, але і як сенсорний модулюючий чинник у виробництві фруктових алкоголю. Відомо, що надлишковий вміст азоту стимулює біосинтез вищих спиртів та естерів через активацію відповідних ферментативних шляхів у дріжджів [15]. Таким чином, вміст азоту в ґрунті виступає не лише агрономічним чинником, а й одним із ключових предикторів якості та сенсорного профілю плодово-алкогольної продукції.

Наступним етапом побудуємо кореляцію між вмістом фосфору в ґрунті та леткими ароматичними компонентами (рис. 4). Фосфор, як елемент живлення, відіграє важливу роль у процесах енергетичного обміну, ферментативної активності та регуляції біосинтетичних шляхів у клітині. Його вплив на ароматичний склад плодового дистиляту менш вивчений, ніж азоту, однак у цьому дослідженні виявлено певні тенденції.

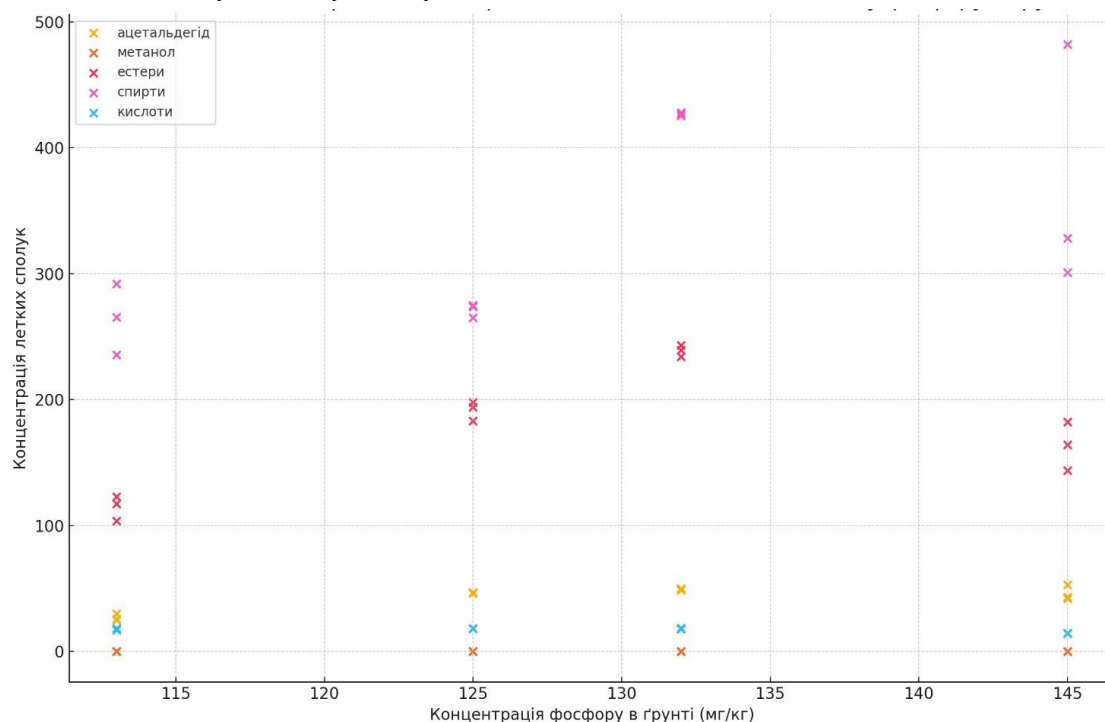


Рис. 4. Залежність концентрації летких ароматичних компонентів у яблучних дистилятах від середнього вмісту фосфору в ґрунті

Джерело: розроблено авторами.

Рисунок 4 відображає взаємозв'язок між концентрацією фосфору в ґрунті та рівнем летких ароматичних сполук у яблучних дистилятах, виготовлених із сорту Айдаред. У розрахунок бралися чотири агрогеографічні зони (Зона 1–4) і три варіанти дріжджів (Раса 1–3).

Діапазон вмісту фосфору становив 113–145 мг/кг, що відповідає добре забезпеченим ґрунтам у межах Лісостепу. Аналіз показав, що фосфорна забезпеченість значно впливає на біосинтез летких сполук, зокрема естерів та ацетальдегіду. Найвищу позитивну

кореляцію встановлено для ацетальдегіду, збродженого Расою 3 – «Дикі» у Зоні 3 – Шура: коефіцієнт $r = +0.881$. Це свідчить про активізацію ферментативних шляхів, пов'язаних з окисненням спиртів до альдегідів, що може бути обумовлено енергетичними механізмами, в яких фосфор відіграє ключову роль (АТФ-залежні реакції).

Також виявлено позитивні тенденції між рівнем фосфору і концентрацією естерів, що визначають фруктові-квіткові ноти напою. Такий вплив пов'язаний із підвищенням метаболічної активності дріжджів і ферментів у багатому фосфором середовищі. Таким чином, фосфор може вважатися метаболічним модулюючим чинником, що впливає на ароматичну насиченість дистиляту. Його значення не варто недооцінювати під час управління якістю сировини на рівні ґрунтового середовища.

Наступним етапом побудуємо кореляцію між вмістом калію в ґрунті та концентрацією летких компонентів у яблучних дистилятах. Калій – важливий мікроелемент, що регулює осмотичний баланс, транспортування цукрів та ферментативну активність у рослинах. У контексті плодово-алкогольної продукції він впливає на накопичення первинних метаболітів, зокрема органічних кислот і цукрів, які є субстратами для бродіння.

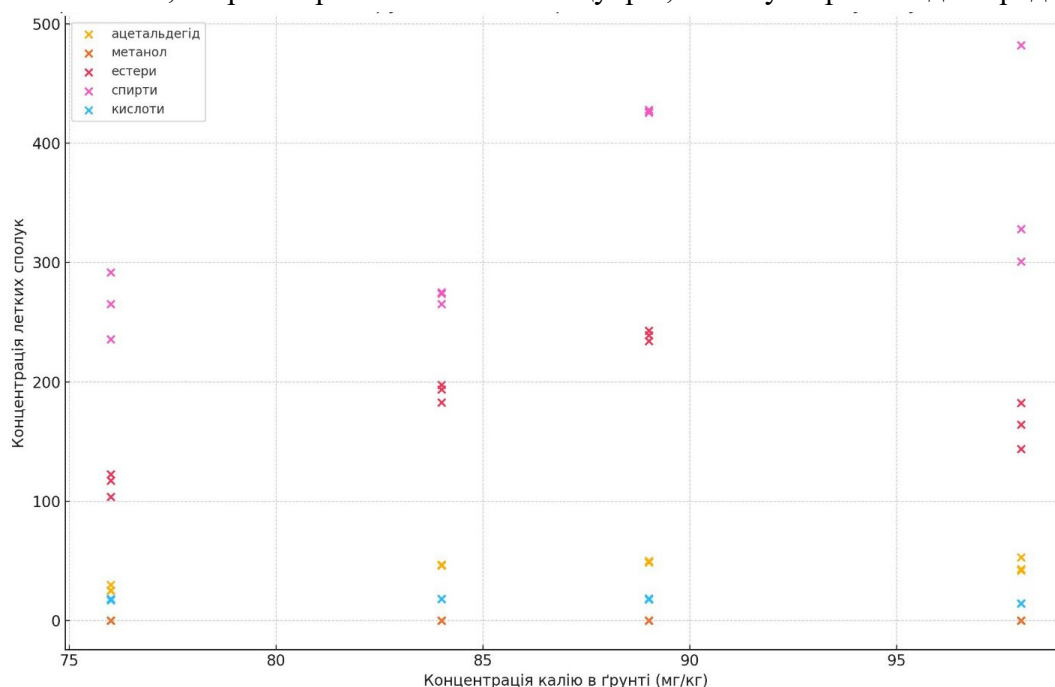


Рис. 5. Кореляція між вмістом калію в ґрунті та концентрацією летких компонентів у яблучних дистилятах

Джерело: розроблено авторами.

Рисунок 5 ілюструє зв'язок між вмістом калію в ґрунті та концентрацією летких ароматичних сполук у яблучних дистилятах, виготовлених із сорту Айдаред. Візуалізовано дані по чотирьох агроєкологічних зонах (Зона 1–4) і трьох расах дріжджів (Раса 1–3). Концентрація калію варіювалася в межах від 76 до 98 мг/кг, що є типовим для чорноземів із середнім і підвищеним рівнем забезпечення цим елементом. Калій відіграє роль у регуляції осмотичного балансу, транспортуванні цукрів та активації ферментів, що опосередковано впливає на метаболізм дріжджів.

Найвищу кореляцію виявлено для ацетальдегіду у дистилятах, зброджених Расою 3 – «Дикі» в Зоні 3 – Шура. Коефіцієнт кореляції склав $r = +0.952$, що свідчить про дуже сильний позитивний зв'язок. Такий ефект може бути зумовлений активізацією пентозо-фосфатного циклу та ферментів альдегідного метаболізму за умов підвищеного калійного живлення.

Загалом калій сприяв зростанню вмісту ароматичних компонентів, особливо ацетальдегіду та вищих спиртів, хоча його вплив був менш універсальним, ніж у випадку з гумусом або азотом. Водночас, стабільність залежностей підтверджує доцільність урахування калію при плануванні хімічного профілю дистиляту. Біологічно це пояснюється ключовою роллю калію в регуляції транспорту вуглеводів, активації ферментів та підтриманні осмотичного балансу в плодах, що впливає на продукцію ароматичних метаболітів під час ферментації. Таким чином, калій виступає як додатковий метаболічний модулюючий фактор, який сприяє покращенню сенсорного профілю яблучних дистилятів.

Таким чином, калій виступає як додатковий метаболічний регулятор ароматогенезу, який може використовуватися для тонкого налаштування сенсорних характеристик плодової алкогольної продукції.

Зведемо дані у спільну таблицю.

Таблиця 1 – Узагальнююча таблиця кореляцій між агрохімічними показниками ґрунту та леткими компонентами яблучних дистилятів

Ґрунтовий показник	Сполука	Зона	Раса дріжджів	Коефіцієнт кореляції (r)
Гумус	Ацетальдегід	Зона 1–4 (усі)	Раса 3 – «Дикі»	+0,903
pH	Ацетальдегід	Зона 1 – Сокиряни	Раса 2 – «Яблучна 7»	–0,843
Азот (N)	Ацетальдегід	Зона 3 – Шура	Раса 3 – «Дикі»	+0,962
Фосфор (P)	Ацетальдегід	Зона 3 – Шура	Раса 3 – «Дикі»	+0,881
Калій (K)	Ацетальдегід	Зона 3 – Шура	Раса 3 – «Дикі»	+0,952

Джерело: розроблено авторами.

На підставі узагальнюючої таблиці встановлено, що найвищі коефіцієнти кореляції між агрохімічними характеристиками ґрунту та леткими ароматичними компонентами яблучних дистилятів спостерігалися для **ацетальдегіду**. У всіх випадках найвиразніші зв'язки фіксувались при використанні **Раси 3 – «Дикі»** дріжджі, здебільшого у **Зоні 3 – Шура**, що свідчить про оптимальне поєднання теруару та мікрофлори.

Найвищу кореляцію виявлено між вмістом азоту та ацетальдегідом ($r = +0,962$), а також між калієм та ацетальдегідом ($r = +0,952$), що підкреслює критичну роль азотного та калійного живлення у формуванні сенсорного профілю дистиляту. Кореляція з pH виявилася негативною і теж сильною ($r = -0,843$), що підтверджує складний регуляторний вплив кислотності ґрунту на ароматогенез.

Таким чином, **гумус, азот, фосфор і калій** є ключовими агрохімічними предикторами якості яблучного дистиляту, а найчутливішим маркером змін виявився саме **ацетальдегід**. Це дає змогу цілеспрямовано управляти ароматичним профілем продукції шляхом контролю ґрунтового середовища та дріжджових культур.

Статистичний аналіз. Для оцінки взаємозв'язку між кожним агрохімічним параметром ґрунту (pH, гумус, азот (N), фосфор (P), калій (K)) та концентрацією ключових летких сполук у яблучному дистиляті було проведено як лінійний, так і експоненційний кореляційний аналіз. Силу кореляції класифіковано згідно з такими інтервалами:

- Дуже сильна: $|r| > 0,9$
- Сильна: $0,7 < |r| \leq 0,9$
- Середня: $0,4 < |r| \leq 0,7$
- Низька: $|r| \leq 0,4$

Комплексний набір даних виявив стабільні й інформативні закономірності між агрохімічними характеристиками ґрунту та вмістом летких ароматичних сполук у дистиляті. Зокрема:

- pH ґрунтів варіювався від 5,1 до 5,4 ,
- гумус – 1,3–2,8%,

- азот – 47–76 мг/кг,
- фосфор – 113–145 мг/кг,
- калій – 76–98 мг/кг.

Хімічний склад дистилятів. Концентрація ацетальдегіду коливалась у межах 24–55 мг/дм³, з найвищими значеннями у зразках із Зони 3 – Шура при використанні Раси 3 – «Дикі».

Рівень метанолу був стабільно низьким – 0,001–0,009 мг/л, що свідчить про безпечність виробничого процесу. Концентрація естерів варіювалася від 100 до 240 мг/дм³, вищих спиртів – 230–480 мг/дм³. Загальна титрована кислотність залишалася стабільною і становила 14–19 мг/дм³.

Обговорення результатів кореляційного аналізу

Гумус. Проведений кореляційний аналіз виявив стійку позитивну залежність між вмістом гумусу в ґрунті та концентраціями летких ароматичних компонентів, зокрема ацетальдегіду, естерів і ізоамілового спирту в яблучних дистилятах. Найвищі значення цих сполук фіксувалися у зонах з підвищеним вмістом гумусу понад 2% – зокрема, у Зоні 3 (Шура) та Зоні 2 (Жорнище). Найсильніша кореляція встановлена для дріжджів Раси 3 – «Дикі», де коефіцієнт кореляції між гумусом та концентрацією ацетальдегід становив $r = 0,903$, що свідчить про надзвичайну чутливість цього класу сполук до органічного збагачення ґрунту. Така залежність узгоджується з даними щодо стимуляції ферментативної активності в середовищах із вищим вмістом органічної речовини, що може забезпечувати більш сприятливе азотне живлення для дріжджів, а також багатший метаболітний профіль під час ферментації.

рН ґрунту. Найвищі концентрації летких компонентів, включаючи ацетальдегід, естери та ізоаміловий спирт, виявлено у зразках із ґрунтів із рН 5,3–5,4. Найсильніша негативна кореляція з рН встановлена у Зоні 1 (Сокиряни) для Раси 2 – «Яблучна 7» (наприклад, ацетальдегід: $r = -0,843$). Це свідчить про те, що слабокисле до майже нейтрального середовище створює сприятливі умови для бродіння і метаболізму дріжджів, зокрема для утворення ароматичних сполук.

Азот. Рівень загального азоту продемонстрував дуже сильну позитивну лінійну кореляцію з вмістом ацетальдегіду ($r > 0,96$) у всіх зонах (особливо в Зоні 3 – Шура) для всіх рас, з максимумом у Расі 3 – «Дикі». Встановлено також сильні кореляції з естерами та вищими спиртами. Це підтверджує фундаментальну роль азотного живлення у стимуляції дріжджового метаболізму та накопиченні попередників летких ароматичних сполук.

Фосфор. У Зоні 3 (Шура) при дії Раси 3 – «Дикі» зафіксовано найвищу позитивну кореляцію між фосфором і ацетальдегідом ($r = 0,881$), а також виразну залежність для естерів. Фосфор, як компонент енергетичного обміну та синтезу нуклеотидів, опосередковано впливає на дріжджову активність, а отже – і на генерацію ароматичних метаболітів. Така закономірність підтверджує роль фосфору як додаткового регулятора ферментативних процесів.

Калій. Залежність між калієм та леткими компонентами виявилась дуже сильною. Найвиразніша кореляція спостерігалась для ацетальдегіду ($r = 0,952$) у зразках з Зони 3 (Шура) та Раси 3 – «Дикі». Калій бере участь у регуляції осмотичного тиску, транспорту вуглеводів і активності багатьох ферментів, тому його вплив на ароматогенез є опосередкованим, але суттєвим.

Загальні висновки. Результати дослідження підтверджують вирішальний вплив агрохімічних характеристик ґрунту (гумус, азот, рН, фосфор, калій) на хімічний та ароматичний профіль яблучних дистилятів. Найбільш інформативними предикторами були гумус і азот, що формували сильні кореляції з усіма основними леткими компонентами: ацетальдегідом, естерами (етилацетат, етилпропіонат) та вищими спиртами (ізоаміловий

спирт, ізобутанол, 1-бутанол, н-пропанол). Найбільш стабільні та сильні залежності виявлено для Раси 3 – «Дикі», а також у кількох випадках – для Раси 2 та 1, що дозволяє рекомендувати ці поєднання як оптимальні з погляду сенсорного потенціалу.

Висновок. Проведене дослідження підтверджує, що агрохімічні властивості ґрунту мають істотний вплив на формування хімічного складу яблучних дистилятів, зокрема на концентрацію летких ароматичних компонентів. Установлено значущі кореляції між параметрами ґрунтів у чотирьох географічних зонах – Зона 1 (Сокиряни), Зона 2 (Жорнище), Зона 3 (Шура), Зона 4 (Суми) – та рівнями ароматичних сполук, отриманих у результаті ферментації соку за участю трьох рас дріжджів: Раса 1 – «Сидрова 101», Раса 2 – «Яблучна 7», Раса 3 – «Дикі».

Аналіз виявив стабільні та сильні кореляції між вмістом гумусу, азоту, фосфору, калію та рН ґрунту з концентраціями ключових летких компонентів дистилятів – ацетальдегіду, естерів та вищих спиртів.

Особливо значущий вплив продемонстрували:

- Ацетальдегід, як найбільш чутливий індикатор змін агрохімічного фону, що демонстрував найвищі коефіцієнти кореляції (до $r = 0,962$) з вмістом азоту, калію та фосфору.
- Гумус і азот – як основні предиктори ароматогенезу, що стабільно впливали на всі групи летких компонентів.
- Раса 3 – «Дикі» дріжджі – як найбільш інформативна з погляду прояву сильних і стабільних кореляцій в усіх зонах, особливо в Зоні 3 – Шура.

Результати дослідження вказують на можливість управління ароматичним профілем дистиляту через оптимізацію агрохімічних параметрів ґрунту та використання специфічних рас дріжджів у конкретних теруарних умовах.

З практичного погляду, результати відкривають нові можливості для управління ароматичним профілем яблучних дистилятів через цілеспрямоване регулювання складу ґрунтів. Це є цінним інструментом для виробників, які прагнуть досягти стабільної якості, регіональної ідентичності та органолептичної гармонії у своїй продукції.

Напрямки подальших досліджень:

- дослідження механізмів впливу кожного з ґрунтових елементів на ферментативні шляхи та утворення ароматичних сполук;
- розширення експериментів на інші сорти яблук та регіони України;
- розробка моделей прогнозування хімічного складу дистилятів на основі ґрунтового аналізу;
- впровадження польових експериментів із контрольованим внесенням добрив для перевірки каузального впливу;
- вивчення змін аромату та складу дистилятів у часі – під час витримки.

Таким чином, результати роботи не тільки поглиблюють наукове розуміння впливу теруару на якість фруктової сировини, але й створюють базу для практичної оптимізації технологій виробництва плодкових дистилятів.

Список використаних джерел

1. Dick, W. A., Cheng, L., & Wang, P. (2000). Soil acid and alkaline phosphatase activity as pH adjustment indicators. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(13), 1915–1919. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00166-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00166-8).
2. Qiu, L. C. Research Progress on the Effects of Soil Acidity and Alkalinity on Plant Growth. (2022). *Open Journal of Applied Sciences*, 12, 1045–1053. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00166-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00166-8).
3. Qi, Y., Wang, R., Qin, Q., & Sun, Q. (2019). Soil affected the variations in grape and wine properties along the eastern foot of Helan Mountain, China. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*, 69(6), 494–502. <https://doi.org/10.1080/09064710.2019.1611914>.

4. Amoah-Antwi, C., Kwiatkowska-Malina, J., Szara, E., & Malina, G. (2022). Assessing factors controlling structural changes of humic acids in soils amended with organic materials to improve soil functionality. *Agronomy*, 12(2), 283. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020283>.
5. Sauze, J., Jones, S. P., Wingate, L., Wohl, S., & Ogée, J. (2018). The role of soil pH on soil carbonic anhydrase activity. *Biogeosciences*, 15(2), 597–612. <https://doi.org/10.5194/bg-15-597-2018>.
6. Wu, X., Bi, J., & Fauconnier, M.-L. (2022). Characteristic volatiles and cultivar classification in 35 apple varieties: A case study of two harvest years. *Foods*, 11(5), 690. <https://doi.org/10.3390/foods11050690>.
7. Dixon, J., & Hewett, E. W. (2000). Factors affecting apple aroma/flavour volatile concentration: A Review. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 28(3), 155–173. <https://doi.org/10.1080/01140671.2000.9514136>.
8. Mehinagic, E., Royer, G., Symoneaux, R., Jourjon, F., & Prost, C. (2006). Characterization of odor-active volatiles in apples: Influence of cultivars and maturity stage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(7), 2678–2687. <https://doi.org/10.1021/jf052288n>.
9. Echeverría, G., Fuentes, T., Graell, J., Lara, I., & López, M. L. (2004). Aroma volatile compounds of ‘Fuji’ apples in relation to harvest date and cold storage technology. *Postharvest Biology and Technology*, 32(1), 29–44. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2003.09.017>.
10. Ferreira, L., Perestrelo, R., Caldeira, M., & Câmara, J. S. (2009). Characterization of volatile substances in apples from Rosaceae family by headspace solid-phase microextraction followed by GC-qMS. *Journal of Separation Science*, 32(11), 1875–1888. <https://doi.org/10.1002/jssc.200900024>.
11. Espino-Díaz, M., Sepúlveda, D.R., González-Aguilar, G., & Olivas, G.I. (2016) Biochemistry of Apple Aroma: A Review. *Food Technol. Biotechnol.*, 54, 375–397. <https://doi.org/10.17113/ftb.54.04.16.4248>.
12. Aprea, E., Corollaro, M. L., Betta, E., Endrizzi, I., Demattè, M. L., Biasioli, F., & Gasperi, F. (2012). Sensory and instrumental profiling of 18 apple cultivars to investigate the relation between perceived quality and odour and flavour. *Food Research International*, 49(2), 677–686. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.09.023>.
13. Stoica, F., Camelia, M. C., Giugea, N., Mărcăneanu, L. C., & Ionete, R. (2019). Volatile compounds in different fraction of fruits distillate obtained by traditional distillation. *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology*, 23(2), 27–34.
14. Kowalczyk W., Wrona D., & Przybyłko S. (2022). Effect of nitrogen fertilization of apple orchard on soil mineral nitrogen content, yielding of the apple trees and nutritional status of leaves and fruits. *Agriculture*, 12(12), 2169. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122169>.
15. Bimbela, F., Cachero, A., & Masson, E. (2021). Influence of nitrogen supply on the production of higher alcohols and esters and expression of flavour-related genes in cachaça fermentation. *Food Chemistry*, 338, 128106. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128106>.

References

1. Dick, W. A., Cheng, L., & Wang, P. (2000). Soil acid and alkaline phosphatase activity as pH adjustment indicators. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(13), 1915–1919. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00166-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00166-8).
2. Qiu, L. C. Research Progress on the Effects of Soil Acidity and Alkalinity on Plant Growth. (2022). *Open Journal of Applied Sciences*, 12, 1045–1053. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00166-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00166-8).
3. Qi, Y., Wang, R., Qin, Q., & Sun, Q. (2019). Soil affected the variations in grape and wine properties along the eastern foot of Helan Mountain, China. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*, 69(6), 494–502. <https://doi.org/10.1080/09064710.2019.1611914>.
4. Amoah-Antwi, C., Kwiatkowska-Malina, J., Szara, E., & Malina, G. (2022). Assessing factors controlling structural changes of humic acids in soils amended with organic materials to improve soil functionality. *Agronomy*, 12(2), 283. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020283>.
5. Sauze, J., Jones, S. P., Wingate, L., Wohl, S., & Ogée, J. (2018). The role of soil pH on soil carbonic anhydrase activity. *Biogeosciences*, 15(2), 597–612. <https://doi.org/10.5194/bg-15-597-2018>.
6. Wu, X., Bi, J., & Fauconnier, M.-L. (2022). Characteristic volatiles and cultivar classification in 35 apple varieties: A case study of two harvest years. *Foods*, 11(5), 690. <https://doi.org/10.3390/foods11050690>.

7. Dixon, J., & Hewett, E. W. (2000). Factors affecting apple aroma/flavour volatile concentration: A Review. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 28(3), 155–173. <https://doi.org/10.1080/01140671.2000.9514136>.
8. Mehinagic, E., Royer, G., Symoneaux, R., Jourjon, F., & Prost, C. (2006). Characterization of odor-active volatiles in apples: Influence of cultivars and maturity stage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(7), 2678–2687. <https://doi.org/10.1021/jf052288n>.
9. Echeverría, G., Fuentes, T., Graell, J., Lara, I., & López, M. L. (2004). Aroma volatile compounds of 'Fuji' apples in relation to harvest date and cold storage technology. *Postharvest Biology and Technology*, 32(1), 29–44. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2003.09.017>.
10. Ferreira, L., Perestrelo, R., Caldeira, M., & Câmara, J. S. (2009). Characterization of volatile substances in apples from Rosaceae family by headspace solid-phase microextraction followed by GC-qMS. *Journal of Separation Science*, 32(11), 1875–1888. <https://doi.org/10.1002/jssc.200900024>.
11. Espino-Díaz, M., Sepúlveda, D.R., González-Aguilar, G., & Olivas, G.I. (2016) Biochemistry of Apple Aroma: A Review. *Food Technol. Biotechnol.*, 54, 375–397. <https://doi.org/10.17113/ftb.54.04.16.4248>.
12. Aprea, E., Corollaro, M. L., Betta, E., Endrizzi, I., Demattè, M. L., Biasioli, F., & Gasperi, F. (2012). Sensory and instrumental profiling of 18 apple cultivars to investigate the relation between perceived quality and odour and flavour. *Food Research International*, 49(2), 677–686. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.09.023>.
13. Stoica, F., Camelia, M. C., Giugea, N., Mărcineanu, L. C., & Ionete, R. (2019). Volatile compounds in different fraction of fruits distillate obtained by traditional distillation. *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology*, 23(2), 27–34.
14. Kowalczyk W., Wrona D., & Przybyłko S. (2022). Effect of nitrogen fertilization of apple orchard on soil mineral nitrogen content, yielding of the apple trees and nutritional status of leaves and fruits. *Agriculture*, 12(12), 2169. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122169>.
15. Bimbela, F., Cachero, A., & Masson, E. (2021). Influence of nitrogen supply on the production of higher alcohols and esters and expression of flavour-related genes in cachaça fermentation. *Food Chemistry*, 338, 128106. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128106>.

Отримано 20.06.2025

UDC 663.2:631.41:543.544:519.24

Olexander Lukanin¹, Nataliia Melnyk²

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of NAAS
National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: 0752las@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7786-5942>

²leading specialist in the Department of Landscape Protection, Biodiversity Conservation, and Nature Preservation
Institute of Agroecology and Nature Management NAAS NAAS (Kyiv, Ukraine)

E-mail: 17natasha17@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1667-6780>

CORRELATIONS BETWEEN THE INFLUENCE OF SOIL AND OTHER FACTORS ON THE QUALITY OF APPLE DISTILLATES

This article presents the results of an interdisciplinary study on the influence of soil agrochemical characteristics on the aromatic profile of apple distillates produced from the 'Idared' variety in four regions of Ukraine (Dnister Horticultural Corporation, Sokyryany, Chernivtsi region – zone 1; Zhornyshche, Illinets district, Vinnytsia region – zone 2; Shura Kopyivska, Vinnytsia region – zone 3; Research station of the Institute of Horticulture of the National Academy of Agrarian Sciences, Maly Sambir, Sumy region – zone 4).

The research encompassed the full production cycle of apple distillates, including agrochemical soil analysis (determination of pH, humus content, nitrogen, phosphorus, and potassium levels), harvesting of 'Idared' apples, juice quality assessment, fermentation with three yeast strains ("Sydrova 101," "Yabluchna 7," and wild microflora), distillation to raw alcohol, and production of the final spirit. The final stage involved gas chromatographic analysis of the distillates to determine the concentrations of volatile compounds contributing to the product's aromatic profile. All collected data were compiled into an integrated analytical matrix for correlation analysis.

The relationships between humus content, macronutrients (nitrogen, phosphorus, potassium), soil pH, and the concentrations of volatile compounds such as acetaldehyde, methanol, esters (ethyl acetate, ethyl propionate), and higher alcohols (isoamyl alcohol, isobutanol, 1-butanol, n-propanol) were evaluated. The correlation analysis, which included both linear and exponential models, revealed strong to very strong dependencies, particularly between humus levels and esters, nitrogen and acetaldehyde, and soil pH and the overall aromatic profile.

The findings confirm the critical role of terroir-particularly the agrochemical composition of soils-in shaping the sensory characteristics of apple distillates. Higher levels of soil humus and nitrogen were associated with increased concentrations of esters and higher alcohols that define the fruity and floral aromas of the product, while soil pH significantly influenced acetaldehyde levels, contributing to fresh, green aromatic notes. These correlations remained stable across all studied regions and yeast strains, suggesting that these parameters serve as key predictors of apple distillate quality. The study highlights opportunities for targeted soil management to regulate the quality and regional identity of alcoholic beverages.

Keywords: fruit distillates, soil, volatile compounds, nitrogen, potassium, phosphorus, Idared.

Fig.: 5. Table: 1. References: 15.

**Володимир Григорович Хоменко¹, Ірина Сергіївна Макєєва²,
Ольга Володимирівна Кислова³, Дмитро Олександрович Нікулін⁴**

¹доктор технічних наук, доцент кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)
E-mail: v.khomenko@i.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0013-8010>
Researcher ID: X-2214-2018. **SCOPUS Author ID:** 7004402598

²кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)
E-mail: makyeveva.is@kntud.com.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5672-3097>
Researcher ID: X-2580-2018. **SCOPUS Author ID:** 7003994762

³кандидат біологічних наук, доцент кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)
E-mail: kislova.ov@kntud.com.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0223-1860>
SCOPUS Author ID: 22034723000

⁴аспірант, кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)
E-mail: nikuln74@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-7063-2826>

РОЗРОБКА ЕФЕКТИВНОЇ ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ГРАФІТУ ДЛЯ АНОДІВ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ

Робота присвячена розробці технології хімічного очищення вітчизняного графіту із застосуванням суміші сульфатної кислоти та амоній фториду. Отримано акумуляторний графіт марки GAK-2 чистотою 99,95 %. Очищений графіт відповідає вимогам до анодних матеріалів для літій-іонних акумуляторів, що підтверджено електрохімічними випробуваннями. Зокрема, він демонструє високу ємність (350 мА·год/г), первинну кулонівську ефективність (близько 90 %) та стабільність під час циклування. Наведені результати свідчать про перспективність розробленого метода хімічного очищення графіту для виробництва анодних матеріалів літій-іонних акумуляторів.

Ключові слова: очищення графіту; обробка мінеральними кислотами; амоній фторид; електрохімічні дослідження; літій-іонні акумулятори (ЛІА); гальваностатичне циклування.

Рис.: 3. Табл.: 2. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Україна входить до числа провідних європейських країн за обсягами запасів графіту, що відкриває значні перспективи для її виходу на міжнародний ринок стратегічних матеріалів. Графіт є алотропною модифікацією вуглецю, але завдяки особливостям кристалічної гексагональної будови він має такі властивості, як низька твердість, висока електропровідність та вогнетривкість. Графіт є ключовим матеріалом для багатьох високотехнологічних галузей, зокрема для виробництва літій-іонних акумуляторів (ЛІА), які широко застосовуються як джерело енергії для електротранспорту [1].

На території України розташовані одні з найбільших родовищ графіту у Європі, зокрема Заваллівське родовище, яке характеризується значними покладами вуглецевого матеріалу [2]. Водночас вітчизняні підприємства не володіють необхідними технологіями для видобутку графіту з високим рівнем чистоти. Це створює бар'єри для українських компаній у конкурентній боротьбі на світовому ринку, де попит на високоочищений графіт неухильно зростає.

Постановка проблеми. Оскільки графіт для виготовлення анодів ЛІА повинен мати високу чистоту (понад 99,95 %), особливо важливим є застосування ефективних методів очищення вуглецевого матеріалу. Крім забезпечення необхідного ступеня чистоти графіту, метод очищення повинен бути економічно вигідним та екологічно безпечним. Розробка такого методу значно підвищить конкурентну спроможність вітчизняної продукції на міжнародному ринку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для очищення графіту від домішок використовуються такі технологічні методи, як механічне, термічне, хімічне та фізико-хімічне очищення [3].

Одним із найпростіших і найдоступніших методів видалення домішок із графітової сировини є механічний метод [4]. Хоча цей метод відзначається низькими витратами та простотою реалізації, він не забезпечує рівня чистоти матеріалу понад 98 %.

Термічне очищення передбачає нагрівання графіту до температур біля 3000 °С для розкладання та випаровування небажаних домішок [5]. Однак значні енергетичні витрати та необхідність попереднього очищення графіту іншими методами значно збільшують його собівартість [6].

Фізико-хімічне очищення графіту [7] комбінує фізичні та хімічні методи для ефективного видалення домішок. До основних технологій належать флотація та електроліз, які сприяють підвищенню чистоти матеріалу. Хоча ці методи дозволяють досягти достатньо високого рівня очищення, вони все ще не гарантують необхідної чистоти для використання у виробництві ЛПА та потребують застосування спеціалізованого обладнання.

Відносно дешевим методом є хімічне очищення, яке базується на застосуванні лужних і кислотних технологій для отримання високочистого графіту. Іноді ці методи комбінують для досягнення більш глибокого очищення. Лужна обробка ефективно видаляє силікатні домішки, тоді як при взаємодії з мінеральними кислотами або їх сумішшю легко розчиняються оксиди алюмінію, феруму, лужних та лужноземельних металів [8].

Застосування сумішей мінеральних кислот із фторвмісними реагентами є ефективною стратегією для видалення з природного графіту як силікатних включень, так і оксидів металів. Зокрема, використання фтористоводневої кислоти (HF) дозволяє утворювати розчинні фторсилікатні комплекси та розчиняти оксиди металів [9]. Проте через надзвичайно високу токсичність і корозійну активність фтористоводневої кислоти в сучасних дослідженнях її дедалі частіше замінюють на тверді фториди, такі як фторид натрію (NaF) або фторид амонію (NH₄F), які в присутності кислот генерують HF *in situ* [10].

Обробка сумішшю концентрованої хлоридної кислоти та натрій фториду забезпечує ефективне очищення графіту від домішок і дозволяє досягти вмісту вуглецю до 98,37 %, тоді як комбінація хлоридної кислоти з амоній фторидом забезпечує ще вищу чистоту - до 99,47 %. Перевагою застосування амоній фториду є збільшення розчинності амоній гексафторосилікату ((NH₄)₂SiF₆) порівняно з натрій гексафторосилікатом (Na₂SiF₆), що сприяє глибшому очищенню [11].

Недоліком наведених вище сумішей є висока леткість HCl при тривалому нагріванні, що призводить до зменшення її ефективності. Нітратна кислота (HNO₃), у свою чергу, є сильною кислотою-окисником. Її застосування призводить до утворення побічних продуктів і часткового окиснення графіту.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх публікацій свідчить, що суміш мінеральних кислот з амоній фторидом дає можливість досягти достатньо високого рівня чистоти графіту. Проте ефективна та конкурентноспроможна технологія очищення вітчизняних графітів різних марок із Заваллівського родовища поки не розроблена.

Метою статті є розробка ефективного та екологічно безпечного методу очищення графіту кислотною сумішшю, який може забезпечити ступінь чистоти вуглецевого матеріалу 99,95 %, а також дослідження електрохімічних характеристик одержаного графіту як анодного матеріалу для літій-іонних акумуляторів.

Виклад основного матеріалу. У межах міжнародного проєкту 101103752-GR4FITE3 програми "Горизонт Європа" наукова група КНУТД розробляє технологію хімічного очищення графіту з використанням розбавлених розчинів сульфатної кислоти та амоній фториду.

У цьому дослідженні використовували комерційні зразки графіту різних марок із початковою чистотою 92–99 %. Обробку проводили розчинами сульфатної кислоти з концентрацією від 10 до 40 %, до яких додавали амоній фторид у кількості 0,01–1,00 М. Хімічне очищення виконували при температурі 60–80 °С, а тривалість процесу варіювали від 30 до 120 хвилин. Після очищення зразки ретельно промивали дистильованою водою до досягнення нейтрального значення рН, а потім висушували в сушильній шафі при 105 °С.

Ефективність очищення зразків оцінювали за їхньою зольністю, яку визначали шляхом озолоння наважки графіту в муфельній печі до постійної маси при температурі 1050 °С.

Зольність зразку графіту (X) у відсотках розраховували за формулою (1) [12]:

$$X = \frac{m}{M} \cdot 100 \quad (1)$$

де m – маса зольного залишку,

M – маса наважки графіту.

Для оцінки можливості застосування очищеного графіту як анодного матеріалу для літій-іонних акумуляторів були виготовлені електроди. Суспензію, що містила очищений графіт, полівініліденфторид (ПВДФ) як зв'язуючий компонент та ацетиленову сажу у співвідношенні 90:8:2 (ваг. %), наносили на мідну фольгу. Отримані електроди висушували у вакуумі при 120 °С протягом 12 годин.

Електрохімічні характеристики визначали у двохелектродних комірках, де як протиелектрод використовували металевий літій. Як електроліт застосовували 1 М розчин LiPF_6 у суміші етиленкарбонату (ЕС) та диметилкарбонату (DMC) у співвідношенні 1:1 за об'ємом. Комірки збирали в середовищі аргону, що містив вологу та кисень на рівні <1 ppm. Гальваностатичне циклування проводили в діапазоні потенціалів 0,01–2,0 В, оцінюючи такі параметри, як початкова ємність, ефективність циклування та стабільність ємності з часом.

Результати хімічного очищення графіту сумішшю сульфатної кислоти різної концентрації з амоній фторидом представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати хімічного очищення зразків ТОВ «Заваллівський графіт»

Марка графіту	Склад розчину хімічного очищення	Вміст вуглецю, %	
		До	Після
GUPG-92	H_2SO_4 (40 %), NH_4F	92,67	99,56
GUPG-92	H_2SO_4 (20 %), NH_4F	92,67	99,41
GEO-94	H_2SO_4 (40 %), NH_4F	94,46	99,60
GEO-94	H_2SO_4 (20 %), NH_4F	94,46	99,67
GTO-95	H_2SO_4 (40 %), NH_4F	95,37	99,80
GTO-95	H_2SO_4 (20 %), NH_4F	95,37	99,65
GAK-2	H_2SO_4 (20 %), NH_4F	99,19	99,95
GAK-2	H_2SO_4 (10 %), NH_4F	99,19	99,94

Джерело: розроблено авторами.

З'ясовано, що зменшення концентрації сульфатної кислоти у реакційній суміші не призводить до суттєвого зниження ефективності очищення марок графітів з високою початковою чистотою. Рівень видалення домішок значно залежить від початкового вмісту золи в матеріалі. Для графітів із початковим вмістом вуглецю нижче 95 % (наприклад, GUPG-92, GEO-94), для досягнення високого ступеня чистоти необхідно підвищувати концентрацію сульфатної кислоти (до 40 %) і використовувати більшу кількість амоній фториду.

Натомість при очищенні графіту марки GAK-2, який характеризується низьким рівнем зольності (початковий вміст вуглецю 99,19 %), ефективне видалення залишкових домішок забезпечується вже за використання лише 10–20 % сульфатної кислоти в

поєднанні з мінімальною кількістю NH_4F . Такий підхід дозволяє значно зменшити шкідливий вплив на довкілля, оскільки знижується використання агресивних реагентів (зокрема, пов'язаних з утворенням HF) і кількість утворених відходів. Таким чином, графіт марки GAK-2 є оптимальним об'єктом для реалізації екологічно доцільного методу очищення, що особливо важливо для масштабного промислового застосування. Зменшення концентрації кислоти й фториду амонію знижує ризики для навколишнього середовища, витрати на реагенти та утилізацію відходів.

На мікрофотографіях (рис. 1) видно, що після обробки 10%-м розчином сульфатної кислоти домішки на поверхні графіту GAK-2 практично відсутні.

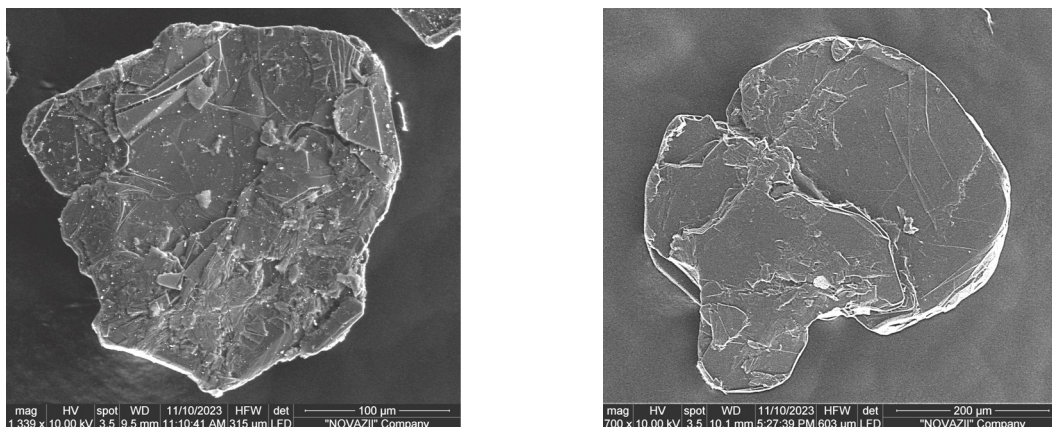


Рис. 1. Розподіл домішок на поверхні частинок графіту GAK-2 до (ліворуч) та після (праворуч) проведення хімічної очистки

Джерело: розроблено авторами.

Отримані результати озолення підтверджують високий рівень очищення графіту марки GAK-2 (табл. 1).

У роботі проведено комплексне оцінювання електрохімічних властивостей хімічно очищеного природного графіту з метою визначення його придатності для застосування в анодах ЛІА. Основну увагу приділено зразкам графіту марки GAK-2, які пройшли обробку в умовах мінімізованого використання реагентів, а саме розбавленої сірчаної кислоти та амоній фториду, що дозволяє знизити екологічне навантаження процесу очищення.

На рис. 2 зображено типові зарядно-розрядні криві електрода, виготовленого на основі очищеного зразка GAK-2. Тестування проводилося в напівелементі Li /графіт при густині струму $\text{C}/10$. Криві демонструють добре виражені плато, характерні для стадій інтеркаляції та деінтеркаляції іонів літію в графітову матрицю, що свідчить про високу кристалічність і структурну впорядкованість матеріалу.

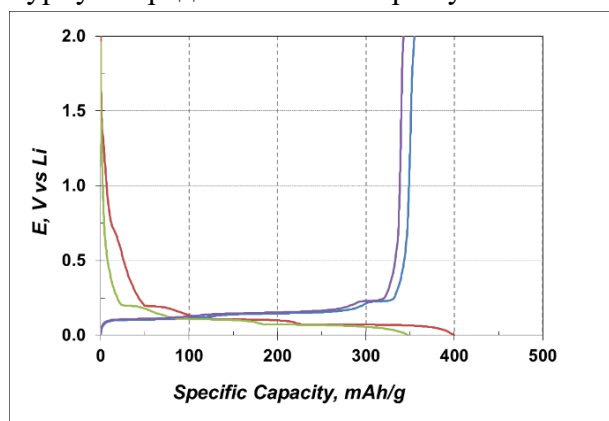


Рис. 2. Заряд-розрядні криві електрода на основі очищеного GAK-2

Джерело: розроблено авторами.

Питомі значення ємності після першого розряду для зразків GAK-2 та GUPG-92 становили відповідно 356,4 та 354,7 мА·год/г (табл. 2). Варто зазначити, що зразок GAK-2 має значно вищу початкову чистоту (вміст вуглецю >99 %), що дозволило досягти цільових характеристик без необхідності використання концентрованих реагентів.

Таблиця 2 – Електричні характеристики зразків графіту після хімічного очищення

Марка графіту	Q заряду, мА·год/г	Q розряду, мА·год/г	Кулонівська ефективність, %
GUPG-92	399,4	354,7	88,8
GAK-2	391,1	356,4	91,1

Джерело: розроблено авторами.

Початкова кулонівська ефективність для зразка GAK-2 склала 91,1 %, що свідчить про обмежене споживання літію під час формування пасивного міжфазного шару (SEI). Порівняно зі зразком GUPG-92, який продемонстрував нижчий показник (88,8 %), можна припустити, що залишкові домішки в графіті GUPG-92 каталізують побічні реакції з електролітом. Отже, підвищена чистота графіту прямо корелює з ефективністю початкових циклів.

На рис. 3 представлено динаміку зміни питомої ємності графіту GAK-2 протягом 100 циклів. Електроди демонструють високу стабільність: після початкового формування SEI-плівки ємність стабілізується і зберігається майже незмінною упродовж тривалого періоду.

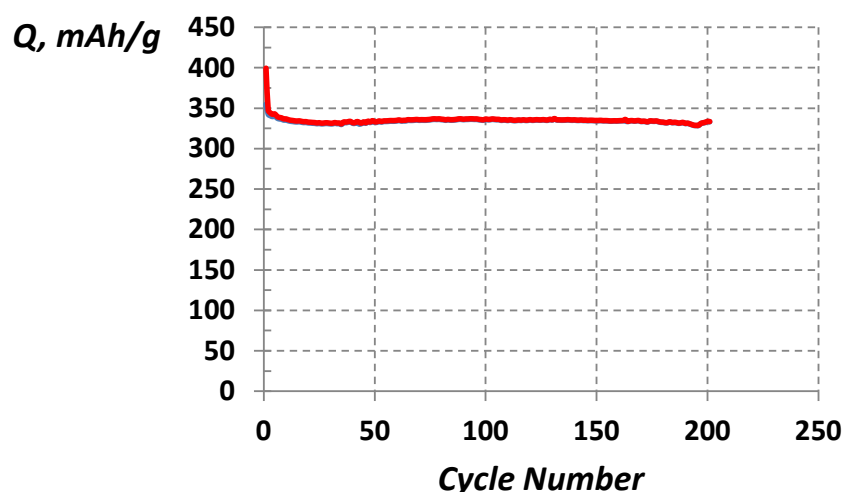


Рис. 3. Циклування електрода на основі очищеного графіту GAK-2

Джерело: розроблено авторами.

Отже, отримані результати демонструють високу стабільність анодного матеріалу протягом тривалого циклування.

Електричні характеристики графіту можуть бути суттєво покращені після проведення сферитизації частинок графіту та покриття їх вуглецевим матеріалом для зменшення питомої поверхні графіту.

Висновки. Розроблено метод хімічного очищення вітчизняного графіту марки GAK-2 з застосуванням розбавленого розчину сульфатної кислоти та амоній фториду, який дозволяє підвищити вміст вуглецевого матеріалу до 99,95 %.

Електрохімічні випробування очищеного графіту марки GAK-2 підтвердили його відповідність вимогам до анодних матеріалів для літій-іонних акумуляторів, зокрема щодо ємності (350 мА·год/г), кулонівської ефективності (нарівні 90 %) та стабільності під час циклування. Очищений графіт марки GAK-2 може бути успішно використаний для створення анодів ЛІА.

Розроблений метод з точки зору екологічних стандартів є одним із найбільш перспективних для промислового виробництва високочистого графіту, придатного для виготовлення анодів літій-іонних акумуляторів.

Подяка

Робота виконується за фінансовою підтримкою проєкту ЄС 101103752-GR4FITE «Стійке постачання графіту для анодів літій-іонних акумуляторів завдяки сталому розвитку європейського ланцюга постачання» програми «Горизонт Європа».

Список використаних джерел

1. Asenbauer, J., Eisenmann, T., Kuenzel, M., Kazzazi A., Chen, Z., Bresser, D. (2020). The success story of graphite as a lithium-ion anode material – fundamentals, remaining challenges, and recent developments including silicon (oxide) composites. *Sustainable Energy & Fuels*. 4:11, 5363–5870. <https://doi.org/10.1039/D0SE00175A>.
2. Rudko, G. (2021) Geology of graphite deposits of Ukraine and prospects of extraction in modern conditions. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology* 3, 67-74. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.94.08>.
3. Jara, A., Betemariam, A., Woldetinsae, G., Kim, J. (2019). Purification, application and current market trend of natural graphite: A review. *International Journal of Mining Science and Technology* 29, 671–689. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.04.003>.
4. Peng, Z., Li, D., Fang, W., Zhang, J., Zhang, R., Qiu, Y., Sun, K. (2023). Improved Flotation of Fine Flake Graphite Using a Modified Thickening Process. *Separations*. 10(5), 275. <https://doi.org/10.3390/separations10050275>.
5. Bao, C., Shi, K., Xu, P., Yang, L., Chen H., Dai, Y., Liu, H. (2021). Purification effect of the methods used for the preparation of the ultra-high purity graphite. *Diamond and Related Materials*. 120. 108704. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108704>.
6. Chelgani, C., Rudolph, M., Kratzsch, R., Sandmann, D., & Gutzmer, J. (2016). A Review of Graphite Beneficiation Techniques. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 37:1. 58-68. <https://doi.org/10.1080/08827508.2015.1115992>.
7. Kang, W., Ding, S., Li, H., Zhao, H. (2023). Experimental study on flotation of graphite with inorganic electrolytes solution. *Carbon Lett.* 33, 1709–1722. <https://doi.org/10.1007/s42823-023-00531-1>.
8. Zhao, G., Chao, B., Zhao, Z., Nan, D. (2021). Research on Purification Technology of Ultra-Large Flake Graphite Based on Alkali-Acid Method. *MSF*. 1036:104–113. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1036.104>.
9. Al-Sairafi, F.A., Jiang, C., Zhong, Z., & Saleh, B. (2022). Study on purification of flake graphite by heat activation and hydrofluoric acid. *Advances in materials and processing technologies* <https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2079172>.
10. Xie W., Wang Z., Kuang J.C., Xu H., Yi S., Deng Y., & et al. (2016). Fixed carbon content and reaction mechanism of natural microcrystalline graphite purified by hydrochloric acid and sodium fluoride. *International Journal of Mineral Processing* 155, 45–54 <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2016.08.002>.
11. Jara, A., Kim, J. (2020). Chemical purification processes of the natural crystalline flake graphite for Li-ion Battery anodes. *Materials Today Communications*. 25.101437, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101437>.
12. Макєєва, І.С., Кислова, О.В., Патлун, Д.В., Хоменко, В.Г., Нікулін, Д.О. (2024). Розробка методів підвищення ефективності хімічного очищення природного графіту. *Технології та інжиніринг*. 2 (19), 117-124. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.2>

References

1. Asenbauer, J., Eisenmann, T., Kuenzel, M., Kazzazi A., Chen, Z., Bresser, D. (2020). The success story of graphite as a lithium-ion anode material – fundamentals, remaining challenges, and recent developments including silicon (oxide) composites. *Sustainable Energy & Fuels*. 4:11, 5363–5870. <https://doi.org/10.1039/D0SE00175A>.
2. Rudko, G. (2021) Geology of graphite deposits of Ukraine and prospects of extraction in modern conditions. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology* 3, 67-74. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.94.08>.

3. Jara, A., Betemariam, A., Woldetinsae, G., Kim, J. (2019). Purification, application and current market trend of natural graphite: A review. *International Journal of Mining Science and Technology* 29, 671–689. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.04.003>.
4. Peng, Z., Li, D., Fang, W., Zhang, J., Zhang, R., Qiu, Y., Sun, K. (2023). Improved Flotation of Fine Flake Graphite Using a Modified Thickening Process. *Separations*. 10(5), 275. <https://doi.org/10.3390/separations10050275>.
5. Bao, C., Shi, K., Xu, P., Yang, L., Chen H., Dai, Y., Liu, H. (2021). Purification effect of the methods used for the preparation of the ultra-high purity graphite. *Diamond and Related Materials*. 120. 108704. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108704>.
6. Chelgani, C., Rudolph, M., Kratzsch, R., Sandmann, D., & Gutzmer, J. (2016). A Review of Graphite Beneficiation Techniques. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 37:1. 58-68. <https://doi.org/10.1080/08827508.2015.1115992>.
7. Kang, W., Ding, S., Li, H., Zhao, H. (2023). Experimental study on flotation of graphite with inorganic electrolytes solution. *Carbon Lett.* 33, 1709–1722. <https://doi.org/10.1007/s42823-023-00531-1>.
8. Zhao, G., Chao, B., Zhao, Z., Nan, D. (2021). Research on Purification Technology of Ultra-Large Flake Graphite Based on Alkali-Acid Method. *MSF*. 1036:104–113. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1036.104>.
9. Al-Sairafi, F.A., Jiang, C., Zhong, Z., & Saleh, B. (2022). Study on purification of flake graphite by heat activation and hydrofluoric acid. *Advances in materials and processing technologies* <https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2079172>.
10. Xie W., Wang Z., Kuang J.C., Xu H., Yi S., Deng Y., & et al. (2016). Fixed carbon content and reaction mechanism of natural microcrystalline graphite purified by hydrochloric acid and sodium fluoride. *International Journal of Mineral Processing* 155, 45–54 <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2016.08.002>.
11. Jara, A., Kim, J. (2020). Chemical purification processes of the natural crystalline flake graphite for Li-ion Battery anodes. *Materials Today Communications*. 25.101437, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101437>.
12. Makheyeva, I.S., Kyslova, O.V., Patlun, D.V., Khomenko, V.H., Nikulin, D.O. (2024). Rozrobka metodiv pidvyshchennia efektyvnosti khimichnoho ochyshchennia pryrodnoho hrafitu [Development of methods for improving efficiency of natural graphite chemical purification]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh – Technologies and Engineering*, (2(19)), 117-124. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.2>.

Отримано 21.05.2025

UDC 678.669

Volodymyr Khomenko¹, Iryna Makheyeva², Olha Kyslova³, Dmytro Niculin⁴

¹Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Electrochemical Power Engineering and Chemistry
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: v.khomenko@i.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0013-8010>

Researcher ID: X-2214-2018. SCOPUS Author ID: 7004402598

²PhD, Associate professor, Department of Chemical Technologies and Resource Saving
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: makheyeva.is@kntud.com.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5672-3097>

Researcher ID: X-2580-2018. SCOPUS Author ID: 7003994762

³PhD in Biological Sciences, Associate Professor, Department of Chemical Technologies and Resource Saving,
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: kislova.ov@kntud.com.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0223-1860>

SCOPUS Author ID: 22034723000

⁴PhD Student, Department of Chemical Technologies and Resource Saving

Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: nikulin74@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7063-2826>

DEVELOPMENT OF GRAPHITE PURIFICATION EFFICIENT CHEMICAL TECHNOLOGY FOR LITHIUM-ION BATTERY ANODES

Graphite is a key material for many high-tech industries, in particular for production of lithium-ion batteries. Ukraine has significant reserves of natural graphite, but domestic enterprises don't have necessary technologies for its extraction in a highly purified state. Since graphite for the manufacture of lithium-ion batteries anode masses must contain more than 99.95%

carbon material, the use of effective methods for its purification is especially important. In addition to ensuring the required degree of graphite cleanliness, the purification method must be economically viable and environmentally safe. Development of this method will significantly increase competitiveness of domestic products in the international market.

The promising method for purifying graphite is treatment with a mixture of sulfuric acid and ammonium fluoride. Because of acid treatment, the degree of purification of graphite grades GUPG-92, GEO-94, GTO-95 ranged from 99.4% to 99.8%, which is insufficient for use in lithium-ion batteries, while the purity of battery graphite GAK-2 was increased to the required level of 99.95 %.

Electrochemical investigations of purified graphite grade GAK-2 confirmed its compliance with requirements for lithium-ion batteries anode materials. Its capacity was approximately 350 mAh/g, which is a competitive value among modern graphite-based anode materials. The initial coulombic efficiency of the anodes (89–91%) approaches characteristics of commercial graphite materials. Studies of the cyclic stability of chemically purified graphite by analyzing the dependence of the specific capacity on the number of cycles demonstrate high stability of the material during long-term cycling. Electrochemical investigations confirm suitability of purified GAK-2 graphite for use in lithium-ion batteries. Electrical characteristics of graphite can be significantly improved after graphite particles spheroidization and coating them with carbon material to reduce the specific surface area.

Keywords: graphite purification; mineral acids treatment; ammonium fluoride; electrochemical investigations; lithium-ion batteries (LIB); galvanostatic cycling.

Fig.: 3. Table: 2. References: 12.

Наталія Андріївна Березкина¹, Олена Олександрівна Кохан²

¹старший викладач кафедри харчових технологій та екології
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: galenko94@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0952-5557>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій хлібопекарських і кондитерських виробів
Національний університет харчових технологій (Київ, Україна)
E-mail: eagavva@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4582-0814>

ПЕРСПЕКТИВА ВИКОРИСТАННЯ КОКОСОВОГО БОРОШНА ПРИ РОЗРОБЦІ РЕЦЕПТУРНОЇ КОМПОЗИЦІЇ БІСКВІТНОГО НАПІВФАБРИКАТУ

Борошняні кондитерські вироби займають значну частку в загальному обсязі виробництва кондитерської продукції і представлені широким асортиментом. Пшеничне борошно є одним із компонентів, який входить до рецептури борошняних кондитерських виробів (БКВ). Воно сприяє збільшенню маси тіла, заборонено при непереносимості глютену (глікімічний індекс 80), цукровому діабеті, підвищеному тиску. Мета роботи – наукове обґрунтування, розробка рецептури й технології бісквітного напівфабрикату з заміною пшеничного борошна на кокосове.

Ключові слова: бісквітний напівфабрикат; кокосове борошно; вологість; пористість; органолептичні властивості.
Рис.: 2. Табл.: 4. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. Кондитерські вироби спеціального призначення – до цієї групи кондитерських виробів належать дієтичні, вітамінізовані, лікувальні та інші вироби, які відрізняються або низькою калорійністю, жирністю, або введенням різних компонентів, що підвищують харчову й біологічну цінність (вітамінів, молочних продуктів, харчових волокон, білків тощо), або використанням різноманітних замінників.

Розширення асортименту кондитерських виробів шляхом використання нетрадиційної сировини дозволяє вирішити декілька проблем, а саме задовольнити попит вибагливих споживачів на кондитерські вироби, і водночас мали збалансований склад, містили функціональні інгредієнти чи належали до групи виробів спеціального призначення. Одним із можливих варіантів розширення асортименту борошняних виробів спеціального призначення є розробка їхніх рецептурних композицій з повним виключенням з їхнього складу видів борошна, що містять глютен, замінивши їх на аглютеніві види – кокосове борошно. Використання даного борошна в технології бісквітного напівфабрикату є доволі перспективним напрямом досліджень.

Кокосове борошно – один із головних інгредієнтів у всіх рецептах кето-випічки. Вона має здатність балансувати рівень цукру в крові, допомагає підтримувати здоровий обмін речовин, забезпечує велику кількість клітковини, та допомагає підтримувати здоров'я травної системи. Кокосове борошно багате на МСТ (середньоланцюгові тригліцериди), які організм здатний перетворювати на енергію без значної допомоги інших ферментів. У їжі є чотири різних типи МСТ, включаючи капронову, каприлову, капринову та лауринову кислоти. Найбільш поширеною кислотою в кокосових продуктах є лауринова кислота, що становить 77 % МСТ, що містяться в кокосовій олії. Також кокосове борошно багате на основні вітаміни і мінерали, включаючи марганець, кальцій, селен, фосфор і калій. У ньому практично немає клейковини, а тому кокосове борошно прекрасно підійде для безглютенової дієти. Воно абсолютно гіпоалергено. Волокон у складі кокосового борошна без глютену в чотири рази більше, а вуглеводів у п'ять разів менше, ніж у пшеничній. Страви, виготовлені з кокосового борошна сприяють швидкому поліпшенню травлення, а також нормалізації обмінних процесів в організмі. Корисний вплив буде помітним і щодо поліпшення стану шкіри та волосся. Регулярне вживання кокосового борошна покращує стан стінок судин, запобігає розвитку атеросклеротичних змін, підвищує імунітет. У складі кокосового борошна містяться дуже важливі для організму вітаміни А, Е, С, D, також вона містить йод, кобальт, 60 % клітковини і 20 % білків, вуглеводів усього лише 4 %.

Постановка проблеми. Кондитерська промисловість не стоїть на місці. Вона стрімко розвивається, розроблюються нові рецептури або оновлюються старі. З'являється нова сировина, нові методи приготування і нові види кондитерських виробів.

Бісквітні вироби мають у своєму складі велику кількість цукру. Цукрова залежність дуже небезпечна для здоров'я. Чим більше в нашому житті солодких продуктів, тим швидше організм починає старіти. Разом із задоволенням від цукру ми отримуємо беззаперечну можливість заробити серйозні захворювання, одним із таких захворювань є цукровий діабет. Коли людина з'їдає щось солодке, то глюкоза швидко проникає в стінки шлунку і стрімко розноситься по всіх клітинах організму. У результаті людина відчуває покращення настрою, активізацію мозкової діяльності й навіть ейфорію. Глюкоза є джерелом харчування для понад 100 мільярдів нейронів. Ці клітини вимагають від людини глюкози, оскільки самостійно не можуть її виробляти, а також зберігати. Різке зниження цукру в крові може призвести до станів близьким до непритомності, які часто спостерігається у діабетиків.

Для покращення харчових властивостей БКВ вносять різноманітні спеціалізовані продукти, які збагачують готову вироби вітамінами та макроелементами, щоб забезпечити фізіологічні потреби людей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Борошняні кондитерські вироби є доступними й популярними у населення, тому актуально формувати їхній асортимент з урахуванням впливу на раціон харчування. При формуванні асортименту БКВ враховуються споживчі властивості та товарознавчі характеристики, які базуються на сучасних вимогах якості готової продукції.

Зробивши огляд останніх досліджень, для збагачення властивостей бісквітних напівфабрикатів науковці використовували яєчну шкарлупу, порошки плодів, борошна кукурудзяне екструдоване.

Тому виникає необхідність створювати безглютенових бісквітних напівфабрикатів, тим самим скорегують харчову цінність і не будуть містити у своєму складі глютену. У цій роботі пшеничне борошно замінено на кокосове. Борошно має солодкуватий смак, його можна використовувати як підсолоджувач, що дає змогу зменшити кількість цукру.

Кокосове борошно — це висушена та розмелена м'якоть кокоса, яка залишилася після видалення кокосової води, або кокосового молока, з плоду. Воно надає виробам більш багатий смак і текстуру. Клітковина в кокосовому борошні допомагає підтримувати здоров'я травлення та регулює рівень цукру в крові. Калій і магній є важливими мінералами, які допомагають регулювати кров'яний тиск і серцеву функцію.

Мета роботи. Ця стаття призначена для обґрунтування та розробки рецептури й технологій бісквітного напівфабрикату з використання кокосового борошна. Основне завдання: користь кокосового борошна на організм людини.

Виклад основного матеріалу. *Об'єктом* дослідження є технологія бісквіту основного виготовленого з повною заміною пшеничного борошна на кокосове. *Предмет* дослідження – кокосове борошно, бісквітний напівфабрикат, харчову цінність.

У цій роботі замість борошна пшеничного вищого гатунку було замінено на кокосове борошно, через відсутність у ньому глютену. Новий вид продукту зможуть вживати люди хворі на целиацію.

Кокосове борошно – це висушена та розмелена м'якоть кокоса, яка залишилася після видалення кокосової води, або кокосового молока, з плоду.

Новизна даної роботи полягає в дослідженні впливу кокосового борошна на органолептичні та фізико-хімічні показники бісквітного напівфабрикату.

Хімічний склад борошна кокосового та пшеничного наведений у табл. 1.

Колір кокосового борошна світліший, ніж пшеничного, що надає готовим виробам світлішого кольору також борошно цього виду надає хлібобулочним виробам більшої пишності.

Таблиця 1 – Хімічний склад кокосового та пшеничного борошна

Показники	Одиниця вимірювання	Кокосове борошно	Пшеничне борошно
Білки	%	20,0	10,8
Жири	%	16,8	1,3
Вуглеводи	%	60,0	69,9
Кальцій	мг/100 г	43	18
Калій	мг/100 г	356	122
Магній	мг/100 г	92	16
Натрій	мг/100 г	20	16
Фосфор	мг/100 г	95	86
Залізо	мг/100 г	2,26	1,2
Клітковина	г/100 г	18,0	2,7
Енергетична цінність	ккал	444,0	334,0
Глікемічний індекс		35	85

Порівнюючи харчові цінності пшеничного та кокосового борошна, можна побачити, що останнє багате на білок. Продукти виготовлені з такого борошна корисні для людей з надмірною вагою та спортсменів важкої атлетики. Головною перевагою є те, що у складі кокосового борошна відсутній глютен.

У кокосовому борошні багато мінералів, особливо магнію, заліза та натрію. Воно має цілющий вплив на шлунково-кишковий тракт, допомагає при гастриті та сприяє усуненню печії. Кокосове борошно ідеально підходить як натуральне джерело білка для людей, які дотримуються контрольованих дієт.

Для проведення дослідження було взято кокосове борошно ТМ «Здорово». Водопоглинальна властивість якого становить 144 %. Крупність помелу: залишок на ситі 0,6...20 %; 0,5...30 %.

На якість бісквітного напівфабрикату впливає також час та спосіб збивання яєчно-цукрової суміші. Тому розглянемо холодний спосіб приготування бісквітного тіста.

Послідовність технологічного процесу приготування бісквіта: підготовка сировини – просіювання борошна, цукру (видаляються сторонні домішки та продукти насичуються повітрям); обробка яєць згідно з чинними санітарними вимогами; збивання яєць з цукром до збільшення об'єму у 2,5-3 рази (відбувається насичення киснем утвореної емульсії і денатурації білка); заміс тіста з борошном 8-10 с; випікання при температурі 160-180 °C протягом 25-30 хвилин.



Рис. 1. Випечений зразок бісквітного напівфабрикату на кокосовому борошні

Зробивши літературний огляд, треба взяти до уваги, що кокосове борошно треба брати менше в 3 рази, ніж пшеничного. Одна особливість – гідроскопічність, тому треба додавати більше рідких компонентів. Також була зменшена кількість внесення цукру на 30 %, кокосове борошно має свій солодкуватий та ніжний смак, не має запаху. Також для випікання виробів із кокосового борошна необхідно менше часу (табл. 2, 3).

Таблиця 2 – Порівняльна характеристика органолептичних показників зразків на пшеничному та коксовому борошні

Показник	Зразок бісквіту на основі пшеничного борошна	Зразок бісквіту на основі коксового борошна
Смак	У міру солодкий	У міру солодкий, з ароматом кокосу
Запах	Притаманний інгредієнтам	Гармонійний, притаманний інгредієнтам.
Колір	Однорідний	Однорідний
Стан поверхні	Кругла форма та гладка поверхня без пошкоджень, зламів і ум'ятин	Кругла форма та гладка поверхня без пошкоджень, зламів і ум'ятин
Вигляд у розрізі	Напівфабрикат має гарну пористість, без слідів непромішування	Напівфабрикат має гарну пористість, без слідів непромішування

Таблиця 3 – Розроблена рецептура бісквітного напівфабрикату 200 гр продукту



Визначена харчова цінність та енергетична розробленого напівфабрикату наведена в табл. 4.

Таблиця 4 – Харчова цінність бісквітного напівфабрикату з коксового борошна

Показники	Одиниця виміру	Бісквіт з коксового борошна
Білки	%	56,88
Жири	%	83,88
Вуглеводи	%	105
Калорійність	ккал	245,74

Висновки. Структура та високі споживчі характеристики бісквітного н/ф на основі коксового борошна спонукає продовжити розпочаті дослідження з метою удосконалення технології його виробництва.

Список використаних джерел

- Лисюк, Г. М. (Ред.). (2012). *Технологія борошняних кондитерських і хлібобулочних виробів: навчальний посібник*. Університетська книга.
- Дорохович, А. М., & Ковбаса, В. М. (Ред.). (2015). *Технологія та лабораторний практикум кондитерських виробів і харчових концентратів: навчальний посібник*. Фірма «ІНКОС».
- Шидакова-Каменюка, О. Г., Рогова, А. Л., Чоні, І. В., & Терещенко, М. В. (2019). Розробка технології бісквітного напівфабрикату, збагаченого мінеральними речовинами. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі*, 1(91), 62–70. <https://doi.org/10.37734/2518-7171-2019-1-8>.
- Дорохович, В. В. (2010). *Наукове обґрунтування і розроблення технологій борошняних кондитерських виробів спеціального дієтичного споживання* (Докторська дисертація, 05.18.16).
- Цокало, В. А., & Дітріх, І. В. (2018). Коксове борошно як альтернативний замінник традиційної сировини у безглютеновій дієті. У *Сучасні тенденції розвитку харчових технологій в умовах європейської інтеграції: Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції (Київ, 16 травня 2018 р.)* (с. 155–156).

6. ДСТУ 8001:2015. (2016). *Бісквіти. Загальні технічні умови* (Чинний від 2017-01-01). ДП «УкрНДНЦ».

7. ДСТУ 7346:2013. (2013). *Вироби кондитерські борошняні для спеціального дієтичного споживання. Загальні технічні умови* (Чинний від 2013-08-22). Мінекономрозвитку України.

References

1. Lysiuk, H. M. (Red.). (2012). *Tekhnolohiia boroshnianykh kondyterskykh i khlibobulochnykh vyrobiv* [Technology of flour confectionary and bakery products]. *Universytetska knyha – University book*.

2. Dorokhovych, A. M., & Kovbasa, B. M. (Ред.). (2015). *Tekhnolohiia ta laboratornyi praktykum kondyterskykh vyrobiv i kharchovykh kontsentrativ* [Technology and laboratory workshop of confectionery products and food concentrates]. “INCOS” Comapny.

3. Shydakova-Kamenuka, O. H., Rohova, A. L., Choni, I. V., & Tereshchenko, M. V. (2019). Rozrobka tekhnolohii biskvitnoho napivfabrykatu, zbahachenoho mineralnymi rehovynamy [Developing a technology for a biscuit semi-finished product enriched with minerals]. *Naukovyi visnyk Poltavskoho universytetu ekonomiky i torhivli – Scientific Bulletin of Poltava University of Economics and Trade*, 1(91), 62-70. <https://doi.org/10.37734/2518-7171-2019-1-8>.

4. Dorokhovych, V. V. (2010). *Naukove obgruntuvannia i rozroblennia tekhnolohii boroshnianykh kondyterskykh vyrobiv spetsialnoho diietynnoho spozhyvannia* [Scientific substantiation and development of technologies for flour confectionary products of special dietary consumption]. [Doctoral thesis, 05.18.16].

5. Tsokalo, V. A., & Ditrikh, I. V. (2018). Kokosove boroshno yak alternatyvnyi zaminnyk tradytsiinoi syrovyny u bezgliutenovii diieti. [Coconut flour as an alternative substitute for traditional raw materials in agluten-free diet]. *Suchasni tendentsii rozvytku kharchovykh tekhnolohii v umovakh yevropeiskoi intehtratsii: zbirnyk tez dopovidei Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii – Modern trends in the development of food technologies in the context of European integration: Collection of abstracts of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference* (pp. 155-156).

6. DSTU 8001:2015. (2016). *Biskvity. Zahalni tekhnichni umovy* [Bisuits. General technical conditions.] (Valid from 2017-01-01). SE “UKRNDNTS”.

7. DSTU 7346:2013. (2013). *Vyroby kondyterski boroshniani dlia spetsialnoho diietynnoho spozhyvannia. Zahalni tekhnichni umovy* [Confectionary flour products for special dietary production. General technical conditions]. (Valid from 2013-08-22). Minsitry of the Economic Development of Ukraine.

Отримано 29.04.2025

UDC 664

Natalii Berezkyina¹, Olena Kokhan²

¹Senior Lecturer, Department of Food Technology and Ecology
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: galenko94@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0952-5557>

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Bakery and Confectionery Technology
National University of Food Technologies (Kyiv, Ukraine)

E-mail: eagavva@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4582-0814>

PROSPECTS OF USING COCONUT FLOUR IN DEVELOPING A FORMULATION OF A BISCUITS SEMI-FINISHED PRODUC

The assortment of confectionery products has begun to change dramatically in recent years, taking into account preferences of consumers. When buying a dessert, pastry, or other sweets, the consumer seeks to get a high-quality, tasty product and a new experience. Consumers are very attracted to new flavors and designs, which encourages them to purchase a given product. However, most prefer the classic flavors that they know well and use constantly.

A healthy lifestyle, adherence to therapeutic diets and careful attention to the composition of the product is a new trend among consumers. Many Europeans prefer healthy and natural products containing natural dyes and extracts, rather than synthetic substitutes. These changes are taking place under the influence of natural and organic trends. In particular, consumers prefer unprocessed bakery products without artificial additives. Therefore, expanding the range of confectionery products by using non-traditional raw materials is a very relevant topic.

Wheat flour is quite high in calories, products made from it cannot be consumed by people who are gluten intolerant, such flour has a high glycemic index – 80 and causes allergies. Excessive consumption of wheat flour can lead to obesity.

Therefore, thanks to modern global technologies, manufacturers are trying to create new innovative products - replacing traditional ingredients with others to enrich the product with vitamins, trace elements, and other nutritional components.

Coconut flour is obtained by grinding coconut flakes, and is used mainly in the cooking and confectionery industry. This flour is allergen-free, gluten-free and quite low-carb. Baking from this type of flour turns out dense and satisfying, thanks to the high content of trace elements and vitamins.

At the same time, coconut powder can give products a light but noticeable coconut flavor. When using coconut flour, which gives its sweetness, the dosage of sugar is reduced. Coconut flour is an excellent alternative for the production of gluten-free foods.

Expanding the range of confectionery products using non-traditional raw materials allows solving several problems, namely, satisfying the demand of demanding consumers for confectionery products.

Keywords: coconut flour, assortment, healthy lifestyle, glycemic index.

Fig.: 2. References: 7.

Василь Віталійович Володимиров

аспірант

Український державний університет науки і технологій

ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)

E-mail: volodymyrov_vasyl@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7353-5065>

ОГЛЯД ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИБОРІВ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ ПОЛІМЕР-НЕОРГАНІЧНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ З ЕЛЕКТРОННОЮ ПРОВІДНІСТЮ

Останнім часом можна спостерігати постійне зростання потужності обчислювальної техніки, і не в останню чергу це пов'язано з появою багатопроцесорних обчислювальних систем і багатоядерних процесорів. Також підвищенню робочих температур сприяли чіпи SOC (system on chip), у яких практично весь ноутбук побудований у складі одного процесора. Взагалі будь-які компоненти комп'ютера на основі напівпровідників так чи інакше нагріваються під час роботи. Водночас час розвиваються технології, зростає потужність/частота/швидкість, а отже, збільшується і тепловіддача. З огляду на вищевикладене можна зробити висновок, що попри значне поширення безвідмовних флюсів, їх залишки за певних умов, як, наприклад, підвищена температура експлуатації, можуть впливати на безперебійну роботу електронного обладнання.

Ключові слова: підвищені робочі температури; безвідмовні флюси; тепловіддача; ультра тонкий дизайн виробів; ускладнення вентиляції.

Бібл.: 25.

Актуальність теми дослідження. У сучасній електронній промисловості пайка є невід'ємним етапом виробництва, що забезпечує електричне та механічне з'єднання компонентів на друкованих платах. Для забезпечення якісного паяння використовуються флюси, які виконують ряд важливих функцій, таких як видалення оксидів з поверхні матеріалів, що паяються, зниження поверхневого натягу розплавленого припою і полегшення його розтікання.

У сучасному виробництві в переважній більшості випадків безвідмовний флюс входить до складу так званих паяльних паст. Паяльні пасти – це сполучні матеріали, отримані диспергуванням порошку припою у флюсі, який зазвичай також називають транспортним засобом. Паяльні пасти застосовуються на друковану плату шляхом трафаретного друку за допомогою трафарету або на будь-яку металізовану поверхню шляхом дозування через шприц, щоб нанести відповідну невелику кількість пасти на кожну ділянку, яка підлягає паянню, а потім нагріти в печі для розплавлення припою та виконання з'єднання. Ця техніка паяння зазвичай називається паянням оплавленням. У печі оплавлення можна використовувати різні методи нагрівання, включаючи інфрачервоне нагрівання, лазерне нагрівання, нагрівання гарячим повітрям і нагрівання гарячої плити. Паяльні пасти повинні мати певні реологічні властивості, придатні для трафаретного друку або дозування.

Флюс або носій паяльної пасти містить принаймні один активатор, який може видаляти оксидні шари з поверхонь, що з'єднуються, і з порошку припою, щоб забезпечити хороше з'єднання. Крім того, флюс містить компоненти, які регулюють реологічні властивості пасти. Основними компонентами звичайного флюсу є каніфоль і похідні каніфолі, що використовуються в концентрації від 40 до 70 мас.% і комбінація розчинників, що використовуються в концентрації від 20 до 50 мас.% кожного відносно загальної ваги флюсу.

Постановка проблеми. Здійснити огляд проблематики використання сучасних полімер-неорганічних композиційних матеріалів з електронною провідністю, та вплив залишків, після завершення їх використання (завершення циклу пайки) на відмовостійкість електронних пристроїв.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З розвитком технологій і прагненням до скорочення виробничих витрат і часу, а також екологічних вимог дедалі більшої популярності набувають безвідмивальні флюси (no-clean flux), які являють собою композиційні матеріали. Безвідмивальні флюси були розроблені у 1990-х роках для усунення хлорфторвуглеців (ХФУ) з виробничих майданчиків відповідно до Монреальського протоколу [1; 2]. На відміну від традиційних флюсів, що вимагають обов'язкового відмивання після паяння, безвідмивальні флюси повинні забезпечувати надійне паяне з'єднання, не залишаючи при цьому корозійно активних або електропровідних залишків, які могли б негативно вплинути на працездатність та надійність електронного пристрою.

Однак, незважаючи на свою назву, безвідмивальні флюси все ж таки залишають деяку кількість залишків на платі після процесу паяння. Певні рівні залишків, присутні на друкованих платах після процесу паяння, були описані в літературі, або пов'язані з лабораторними дослідженнями [3] або безпосередньо з виробничим процесом [4]. Ці залишки, кількість та тип яких залежать від багатьох факторів, включаючи характеристики РСВА, тип процесу паяння [4] та середовище паяння (наприклад, азот атмосфера) [5]; можуть містити різні органічні сполуки, які в певних умовах можуть виявляти електропровідність, що призводить до виникнення так званого залишкового опору (residual resistance). Одними з найважливіших факторів, які викликають залишковий опір є хімічний склад флюсу та кількість нанесеного флюсу [4]. Залишковий опір може стати причиною паразитних струмів витоку, зниження ізоляції між провідниками, і, зрештою, виходу з ладу електронного пристрою, особливо в умовах високих робочих температур та вологості.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Одним недоліком таких звичайних флюсів є той факт, що значна кількість каніфолі та інших твердих компонентів флюсу залишається на отриманому паяному з'єднанні або поблизу нього у вигляді залишку флюсу. Під час оплавлення відбувається багато хімічних реакцій між каніфоллю, іншими компонентами флюсу та оксидами металів на поверхнях припою. Нелетка частина продуктів реакції та інертні компоненти сировини залишаються у вигляді залишків на заготовках. Комерційні безвідмивні паяльні пасти мають залишки від 6 до 7% мас. Ці залишки містять різні типи смоли, розчинники та слабкі органічні кислоти (WOA) [5; 7; 8]. Залишки, якщо вони залишаються у значній кількості, призводять до поганого зовнішнього вигляду спаяних ділянок і погіршують контакт контактів спаюваної електронної частини з паяльною пастою. Крім того, залишки флюсу можуть спричинити зниження опору ізоляції між ланцюгами заготовки через поглинання вологи залишками флюсу або можуть призвести до розриву чи роз'єднання ланцюгів через утворення продуктів корозії із залишків флюсу. Це явище корозії може призвести до критичного зменшення поверхні опору ізоляції (SIR) [5; 9; 10] або електрохімічної міграції (ECM) і пов'язаних з нею збоїв короткого замикання. У процесі електрохімічної міграції (ECM) корозія Sn, Ag і Cu відбувається на аноді, а розчинені металеві іони мігрують до катода, де металеві іони можуть осаджуватись і рости назад до аноді у вигляді металевих дендритів. Тому заготовки, призначені для використання в електронному обладнанні, для якого потрібна висока надійність, після пайки оплавленням необхідно промити очисником, щоб видалити залишки флюсу, що залишилися в місцях пайки.

Виклад основного матеріалу. Часто для підвищення надійності електронне обладнання доводиться закривати від вологи. Герметизація виконується шляхом формування всієї заготовки смолою. У такому випадку заготовку необхідно промити засобом для чищення, щоб видалити будь-які залишки флюсу перед нанесенням смоляного покриття або формування.

Класифікація флюсів за стандартом IPC-J-STD-004B наведена в табл. 1 [11].

Таблиця 1 – Класифікація флюсів за стандартом IPC-J-STD-004B

Основа флюсу	Рівень активності флюсу/залишків флюсу	Зміст галогенідів за вагою ¹ , %	Тип флюсу ²	Позначення флюсу
Каніфольна (RO)	Низька (L)	<0,05	L0	ROL0
		<0,5	L1	ROL1
	Середня (M)	<0,05	M0	ROM0
		0,5 – 2,0	M1	ROM1
	Висока (H)	<0,05	H0	ROH0
		>2,0	H1	ROH1
Синтетична (RE)	Низька (L)	<0,05	L0	REL0
		<0,5	L1	REL1
	Середня (M)	<0,05	M0	REM0
		<0,5 – 2,0	M1	REM1
	Висока (H)	<0,05	H0	REH0
		>2,0	H1	REH1
Органічна (OR)	Низька (L)	<0,05	L0	ORL0
		<0,5	L1	ORL1
	Середня (M)	<0,05	M0	ORM0
		<0,5 – 2,0	M1	ORM1
	Висока (H)	<0,05	H0	ORH0
		>2,0	H1	ORH1
Неорганічна (IN)	Низька (L)	<0,05	L0	INL0
		<0,5	L1	INL1
	Середня (M)	<0,05	M0	INM0
		<0,5 – 2,0	M1	INM1
	Висока (H)	<0,05	H0	INH0
		>2,0	H1	INH1

¹ Флюси з вмістом галогенідів менше ніж 0,05 % можуть бути розцінені як такі, що не містять галогенідів. Цей метод описує кількість галогенідів, що міститься у складі флюсу.

² Показник 0 і 1 означає відсутність або присутність галогенідів відповідно.

Для розчинення каніфолі в залишках флюсу успішно використовуються очисники на основі фторованих і хлорованих розчинників. Однак необхідність очищення заготовок перед формуванням смоли вводить додатковий дорогий етап виробництва. Крім того, використання цих розчинників тепер регулюється, оскільки їхні пари спричиняють виснаження озонового шару в атмосфері.

Тому були розроблені паяльні пасти з низьким залишком флюсу, так звані безвідмивні паяльні пасти. У патенті № 5176759 [12], наприклад, розкрито паяльну пасту з мінімізованими залишками флюсу, що залишаються після пайки, яка містить порошкоподібний припій і флюс у домішці. Флюс містить приблизно від 5 % до приблизно 40 % за вагою компонентів носія, які включають каніфоль або похідну каніфолі, активуючий агент і тиксотропний агент, і від приблизно 60 % до приблизно 95 % за вагою розчинника. Розчинник переважно (понад 50 % за масою) містить 2-алкіл-1,3-гександiol, що має від 1 до 4 атомів вуглецю в алкільній групі. В'язкість 2-алкіл-1,3-гександiolу, який використовується в розчиннику, є низькою – зазвичай у діапазоні приблизно 323 сП при 20 °С. У цьому патенті залишок, що залишився, спостерігають візуально та присвоюють один із чотирьох класів від 1 до 4. Відсотки залишкового флюсу не наводяться. Зменшення залишків флюсу, що залишається після пайки оплавленням з цим типом паяльної пасти, не викликає суттєвих проблем у звичайному електронному обладнанні, для якого потрібна висока надійність. Однак зменшення залишків паяльної пасти не є цілком задовільним для сучасного електронного обладнання, для якого потрібна надвисока надійність. У патенті № 6887319 В2 [13] описана паяльна паста без залишків, яка не містить каніфолі. Припій без залишків не залишає залишків флюсу після пайки

оплавленням і містить порошок припою, змішаний із пастоподібним флюсом без канифолі. Флюс містить щонайменше один твердий розчинник і щонайменше один високов'язкий розчинник у загальній кількості від 30 до 90 мас. %, на додаток до щонайменше одного рідкого розчинника, причому всі розчинники випаровуються при температурі пайки оплавленням. Флюс може додатково містити від 0,5 до 12 % тиксо-тропного агента, такого як амід жирної кислоти, і від 1 до 15 % активатора, вибраного з органічних кислот та їх солей амінів, причому тиксотропний агент і активатор випаровуються в присутності розчинників, поки розчинники випаровуються. Ця паяльна паста здається задовільною з огляду на кількість залишків, що залишилися після пайки оплавленням, але вона все ще не є задовільною щодо однорідності, стійкості проти розшарування пасти та вимоги до змочування.

Також одним із важливих факторів є температура експлуатації виробу. Тому що залишковий опір безвідмивальних флюсів не є постійною величиною, а змінюється залежно від температури. При підвищенні температури залишковий опір безвідмивальних флюсів переважно зменшується. Це пов'язано з кількома факторами:

1. Іонізація: Підвищення температури сприяє дисоціації молекул органічних залишків флюсу на іони. Збільшення концентрації рухомих іонів призводить до підвищення електропровідності. Це особливо помітно для залишків які містять слабкі органічні кислоти.

2. Збільшення рухливості іонів: Зі зростанням температури збільшується кінетична енергія іонів, що підвищує їхню рухливість. Це також сприяє збільшенню провідності.

3. Термічна деградація компонентів флюсу: При високих температурах компоненти флюсу можуть зазнавати термічної деградації. Деякі продукти цієї деградації можуть бути електропровіднішими, ніж вихідні компоненти. Наприклад, термічне розкладання органічних кислот може призвести до утворення вуглецевих залишків, які мають певну електропровідність.

4. Зміна фазового стану: Деякі залишки флюсу можуть переходити до більш провідного фазового стану при нагріванні (наприклад, з твердого в напіврідкий або рідкий).

Також на залишковий опір може впливати термічна деградація компонентів флюсу. Термічна деградація є одним із ключових факторів, що визначають температурну залежність залишкового опору. При нагріванні сполуки, що входять до складу флюсу, можуть піддаватися різним хімічним перетворенням:

- Декарбоксилювання: органічні кислоти можуть декарбоксилюватись, втрачаючи групу CO_2 , що може призвести до утворення інших продуктів з відмінними властивостями.

- Розкладання смол: смоли та інші полімерні сполуки можуть розпадатися на дрібніші фрагменти, деякі з яких можуть мати провідність.

- Утворення вуглецю: при високій температурі деякі органічні сполуки можуть перетворюватися на вуглець, який є хорошим провідником.

У виробництві електроніки де використовуються безвідмивальні флюси. Для всіх типів процесів паяння передбачається, що кількість залишків, що залишилися, мінімальна і безпечна. Очікується, що використання низького вмісту твердих речовин у безвідмивальному флюсі призводить до майже повного розкладання складових компонентів під час процесу паяння. Однак розкладання флюсу залежить від багатьох факторів, таких як зміна температури на вузлах друкованих плат (PCBA), процесу паяння, кількість і тип флюсу, процедури нанесення флюсу, швидкість нагрівання та температури розкладання хімікатів і т. ін. Тому на практиці PCBA іноді бувають забруднені значною кількістю залишків флюсу [14], включаючи компоненти активатора, переважно слабкі органічні кислоти (WOA). Типові WOA, виявлені в системах безвідмивальних флюсів, є дикарбонові кислоти, такі як адипінова, глутарова, бурштинова та яблучна, які призводять до того, що іонні залишки на поверхні PCBA мають гігроскопічну природу [15]. Поєднання

адсорбованої вологи та іонних забруднюючих речовин, пов'язаних із залишками флюсу, що призводить до утворення електроліту, який може забезпечити середовище для струмів витоку, що призводять до електрохімічної міграції, та, отже, може бути потенційним прискорювачем корозії [16]. Однак кількість та розподіл залишків флюсу значно різняться залежно від конкретного типу процесу паяння та пов'язаних з ним параметрів [17]. Паяння оплавленням припою – це процес, що використовується для друкованих плат з компонентами поверхневого монтажу, а як зазначалось вище, флюс наноситься у вигляді пасти з використанням трафаретного друку, потім слідує монтаж компонентів і потім проходження через паяльну піч. Хоча кількість флюсу, що наноситься в цьому випадку, залежить від площі посадкового місця компонента, під компонентами можуть бути виявлені захоплені залишки, що в кінцевому підсумку може викликати проблеми з корозією при вплив вологих умов [18]. З іншого боку, пайка хвилею припою зазвичай використовує розпилення рідкого флюсу на нижній стороні, якщо використовуються компоненти з об'ємними виводами. Однак частина флюсу також може піднятися на верхню сторону через проливання або через наскрізні отвори. У цьому випадку проводиться пайка в нижній частині РСВА, де температура піднімається до 250 °C, тоді як верхня частина РСВА відчуває лише приблизно 170 °C. Це призводить до диференціалу розкладання флюсу на верхню і нижню сторони [19]. Вибіркова пайка хвилею також використовує рідкі типи флюсів у більшості випадків. Однак процес може бути здійснений різними способами, у тому числі з використанням піддону для маскування небажаних ділянок. Однак, незалежно від процесу, диференціальне нагрівання в зоні пайки й оточення призводить до накопичення залишків флюсу навколо вибіркового паяльного ділянок. Відсутність оптимізації кількості розпилення флюсу може призвести до значного рівня залишків у так званих пастках під піддоном [20]. Хоча загальновідомо, що різні процеси пайки можуть призвести до забруднення поверхні друкованої плати, що порушує її чистоту, зараз дослідження відносних рівнів залишків введений різними процесами паяння та його вплив на корозійну надійність ще тривають. Однак вищенаведене розшарування температур більш актуально для силових електронних модулів, де компоненти мають доволі значні габарити та розміщуються з однієї сторони плати а менші габаритні компоненти з іншої.

Також одним зі значних факторів відмови обладнання є прискорена корозія у вологих умовах за рахунок внутрішнього забруднення на вузлах друкованих плат при використанні безвідмивальних флюсів під час паяння. Найбільш важливими факторами в цьому випадку є хімія флюсу та його характеристики розкладання під час процесу паяння, що призводить до утворення залишків. Найчастіше використовувані системи флюсу містять: розчинник – середовище для змішування всіх компонентів флюсу, часто суміш спиртів, активатори – здебільшого слабкі органічні кислоти або галогеніди (рідше зустрічаються у безвідмивальних флюсах), і носій – нелетуча сполука, така як смола або ефір, яка стабільна в діапазоні температур, використовуваних у процесі паяння [21]. Припущення, що лежить в основі технології безвідмивальних флюсів (no-clean), полягає в тому, що агресивні хімікати, що використовуються в розчині флюсу, згоряють, тобто випаровуються або розкладаються на леткі речовини під час процесу паяння, і залишають лише мінімальний рівень залишків агресивної природи на поверхні друкованої плати. Однак на практиці, як уже зазначалось раніше, це відбувається рідко, і друковані плати можуть бути забруднені значною кількістю залишків флюсу, що складаються з іонних сполук, які використовуються як активатори в первинній або розкладеній формі. Вони можуть взаємодіяти з вологістю через свою гігроскопічну природу, роблячи адсорбований водний шар хорошим електролітом для провідності струму та подальшої корозії [22]. Тому в літературі повідомлялося про низку збоїв друкованих плат через наявності цих

залишків флюсу, які зазвичай викликають зниження опору поверхневої ізоляції (SIR), що призводить до збільшення струму витoku або за певних умов, електрохімічної міграції та утворення дендритів [23; 24]. Кількість, розподіл та морфологія залишків флюсу значно різняться залежно від конкретного процесу паяння та пов'язаних з ним параметрів. Результати показують, що зміна умов процесу, таких як температура поверхні друкованої плати під час паяння, має велике значення і може призвести до значної зміни кількості локалізованих залишків [25].

Висновки. Таким чином, можна зробити висновок, що попри значну поширеність безвідмивальних флюсів, їхні залишки за певних умов можуть впливати на безвідмовну роботу електронної техніки для складання (формування паяльних з'єднань) якої вони були використані. Тож, є ще певний простір для досліджень, пов'язаний з умовами експлуатації електронних виробів, як-то підвищена вібрація (характерна для модулів керування рухомою технікою), підвищена вологість та, що останнім часом стає дедалі актуальним, підвищені температури експлуатації виробів, які зумовлені зростаючою обчислювальною потужністю, ультратонким дизайном, та пов'язаною з цим складністю штучної вентиляції.

Список використаних джерел

1. Ramirez, C., & Lei, K.-S. (1996). Evaluation of the reliability and corrosivity of voc-free, no-clean fluxes using standard, modified and electrochemical methods. *Soldering & Surface Mount Technology*, 8(1), 6–9. <https://doi.org/10.1108/09540919610777555>.
2. Adams, K. M., Anderson, J. E., & Graves, Y. B. (1994). Ionograph sensitivity to chemical residues from 'no clean soldering fluxes: comparison of solvent extract conductivity and surface conductivity. *Circuit World*, 20, 41–44. <https://doi.org/10.1108/eb046251>.
3. Conseil, H., Verdingovas, V., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2015). Decomposition of no-clean solder flux systems and their effects on the corrosion reliability of electronics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27(1), 23–32. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-3712-x>.
4. Conseil, H., Stendahl Jellesen, M., & Ambat, R. (2014). Contamination profile on typical printed circuit board assemblies vs soldering process. *Soldering & Surface Mount Technology*, 26(4), 194–202. <https://doi.org/10.1108/ssmt-03-2014-0007>.
5. Verdingovas, V., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2015). Solder Flux Residues and Humidity-Related Failures in Electronics: Relative Effects of Weak Organic Acids Used in No-Clean Flux Systems. *Journal of Electronic Materials*, 44(4), 1116–1127. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3609-0>.
6. Piotrowska, K., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2017). Thermal decomposition of solder flux activators under simulated wave soldering conditions. *Soldering & Surface Mount Technology*, 29(3), 133–143. <https://doi.org/10.1108/ssmt-01-2017-0003>.
7. Smith, B. A., & Turbini, L. J. (1999). Characterizing the weak organic acids used in low solids fluxes. *Journal of Electronic Materials*, 28(11), 1299–1306. <https://doi.org/10.1007/s11664-999-0171-2>.
8. Zhan, S., Azarian, M. H., & Pecht, M. (2008). Reliability of printed circuit boards processed using no-clean flux technology in temperature–humidity–bias conditions. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 8(2), 426–434. <https://doi.org/10.1109/tdmr.2008.922908>.
9. Piotrowska, K., Ud Din, R., Grumsen, F. B., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2018). Parametric study of solder flux hygroscopicity: Impact of weak organic acids on water layer formation and corrosion of electronics. *Journal of Electronic Materials*, 47(7), 4190–4207. <https://doi.org/10.1007/s11664-018-6311-9>.
10. Hunt, C., Zou, L. (1999). The impact of temperature and humidity conditions on surface insulation resistance (SIR) values for various fluxes. *Journal of Soldering and Surface Mount Technology*, 11(1), 36–43. <http://eprintspublications.npl.co.uk/id/eprint/1067>.
11. Requirements for Soldering Fluxes. [A standard developed by the Flux Specifications Task Group (5-24a) of the Assembly and Joining Processes Committee (5-20) of IPC]. (2011). *IPC J-STD-004B with Amendment 1*. <https://www.ipc.org/TOC/J-STD-004BwAm1.pdf>.
12. High temperature solder pastes [US3915729A](https://patents.google.com/patent/US3915729A/en?q=(no-clean+flux)&oq=no-clean+flux) 1974-04-09 1975-10-28 Du Pon. [https://patents.google.com/patent/US3915729A/en?q=\(no-clean+flux\)&oq=no-clean+flux](https://patents.google.com/patent/US3915729A/en?q=(no-clean+flux)&oq=no-clean+flux).

13. US4298407A1980-08-041981-11-03E. I. Du Pont De Nemours And Company Flux treated solder powder composition [https://patents.google.com/patent/US4298407A/en?q=\(no-clean+flux\)&oq=no-clean+flux](https://patents.google.com/patent/US4298407A/en?q=(no-clean+flux)&oq=no-clean+flux).
14. Biocca, P. (2001). Flux Chemistries and Thermal Profiling: Avoiding Soldering Defects in SMT Assembly, Loctite/Multicore Solders, Richardson, TX.
15. Song, B., Azarian, M. H., & Pecht, M. G. (2013). Effect of temperature and relative humidity on the impedance degradation of dust-contaminated electronics. *Journal of the Electrochemical Society*, 160(3), C97—C105. <https://doi.org/10.1149/2.024303jes>.
16. Verdingovas, V., Jellesen, M. S., Rizzo, R., Conseil, H., & Ambat, R. (2013). Impact of hygroscopicity and composition of solder flux residue on the reliability of PCBA under corrosive conditions. In *Proceedings of EUROCORR*. 2013. <http://www.eurocorr2013.org>.
17. Hansen, K. S., Jellesen, M. S., Møller, P., Westermann, P. J. S., & Ambat, R. (2009). Effect of solder flux residues on corrosion of electronics. In *Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2009. RAMS 2009*. IEEE Press. <https://doi.org/10.1109/RAMS.2009.4914727>.
18. Jellesen, M. S., Dutta, M., Verdingovas, V., & Ambat, R. (2012). Detection of acid release from reflow solder flux residues using localized test methods, paper presented at Eurocorr 2012, Istanbul, 9-13 September.
19. Conseil, H., Jellesen, M. S., Verdingovas, V., & Ambat, R. (2013). Decomposition studies of no-clean solder flux systems in connection with corrosion reliability of electronics. In *EUROCORR 2013 - European Corrosion Congress*. Article Paper H European Federation of Corrosion.
20. Munson, T. (2003). Understanding selective pallet soldering residue. *Circuit Assembly*, 14(9), 48. https://static1.squarespace.com/static/5ddd523267a1ae54e9d2cb96/t/5eed2530a6da31edac68c91/1592709715629/2003.09-Understanding_Selective_Pallet_Soldering_Residue_-_Circuits_Assembly.pdf.
21. Minges, M.L. (1989). *Electronic Materials Handbook*, 11, 1st edn. (ASM International, Almere).
22. Rathinavelu, U., Jellesen, M.S., Møller, P., Ambat, R. (2012). *IEEE Trans. Compon. Package Technol.*, 2(4), 719–728.
23. Verdingovas, V., Jellesen, M. S., Ambat, R. (2013). *Corros. Eng. Sci. Technol.*, 48(6), 426–435.
24. Verdingovas, V., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2015). Relative effect of solder flux chemistry on the humidity related failures in electronics. *Soldering & Surface Mount Technology*, 27(4), 146–156. <https://doi.org/10.1108/ssmt-11-2014-0022>.
25. Conseil, H., Jellesen, M.S., Ambat, R. (2014). *Solder. Surf. Mt. Technol.*, 26(4), 194–202.

References

1. Ramirez, C., & Lei, K.-S. (1996). Evaluation of the reliability and corrosivity of voc-free, no-clean fluxes using standard, modified and electrochemical methods. *Soldering & Surface Mount Technology*, 8(1), 6–9. <https://doi.org/10.1108/09540919610777555>.
2. Adams, K. M., Anderson, J. E., & Graves, Y. B. (1994). Ionograph sensitivity to chemical residues from 'no clean soldering fluxes: comparison of solvent extract conductivity and surface conductivity. *Circuit World*, 20, 41–44. <https://doi.org/10.1108/eb046251>.
3. Conseil, H., Verdingovas, V., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2015). Decomposition of no-clean solder flux systems and their effects on the corrosion reliability of electronics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27(1), 23–32. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-3712-x>.
4. Conseil, H., Stendahl Jellesen, M., & Ambat, R. (2014). Contamination profile on typical printed circuit board assemblies vs soldering process. *Soldering & Surface Mount Technology*, 26(4), 194–202. <https://doi.org/10.1108/ssmt-03-2014-0007>.
5. Verdingovas, V., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2015). Solder Flux Residues and Humidity-Related Failures in Electronics: Relative Effects of Weak Organic Acids Used in No-Clean Flux Systems. *Journal of Electronic Materials*, 44(4), 1116–1127. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3609-0>.
6. Piotrowska, K., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2017). Thermal decomposition of solder flux activators under simulated wave soldering conditions. *Soldering & Surface Mount Technology*, 29(3), 133–143. <https://doi.org/10.1108/ssmt-01-2017-0003>.
7. Smith, B. A., & Turbini, L. J. (1999). Characterizing the weak organic acids used in low solids fluxes. *Journal of Electronic Materials*, 28(11), 1299–1306. <https://doi.org/10.1007/s11664-999-0171-2>.

8. Zhan, S., Azarian, M. H., & Pecht, M. (2008). Reliability of printed circuit boards processed using no-clean flux technology in temperature–humidity–bias conditions. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 8(2), 426–434. <https://doi.org/10.1109/tdmr.2008.922908>.
9. Piotrowska, K., Ud Din, R., Grumsen, F. B., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2018). Parametric study of solder flux hygroscopicity: Impact of weak organic acids on water layer formation and corrosion of electronics. *Journal of Electronic Materials*, 47(7), 4190–4207. <https://doi.org/10.1007/s11664-018-6311-9>.
10. Hunt, C., Zou, L. (1999). The impact of temperature and humidity conditions on surface insulation resistance (SIR) values for various fluxes. *Journal of Soldering and Surface Mount Technology*, 11(1), 36–43. <http://eprintspublications.npl.co.uk/id/eprint/1067>.
11. Requirements for Soldering Fluxes. [A standard developed by the Flux Specifications Task Group (5-24a) of the Assembly and Joining Processes Committee (5-20) of IPC]. (2011). *IPC J-STD-004B with Amendment 1*. <https://www.ipc.org/TOC/J-STD-004BwAm1.pdf>.
12. High temperature solder pastes [US3915729A](https://patents.google.com/patent/US3915729A/en?q=(no-clean+flux)&oq=no-clean+flux) 1974-04-09/1975-10-28 Du Pon. [https://patents.google.com/patent/US3915729A/en?q=\(no-clean+flux\)&oq=no-clean+flux](https://patents.google.com/patent/US3915729A/en?q=(no-clean+flux)&oq=no-clean+flux).
13. US4298407A 1980-08-04/1981-11-03E. I. Du Pont De Nemours And Company Flux treated solder powder composition [https://patents.google.com/patent/US4298407A/en?q=\(no-clean+flux\)&oq=no-clean+flux](https://patents.google.com/patent/US4298407A/en?q=(no-clean+flux)&oq=no-clean+flux).
14. Biocca, P. (2001). Flux Chemistries and Thermal Profiling: Avoiding Soldering Defects in SMT Assembly, Loctite/Multicore Solders, Richardson, TX.
15. Song, B., Azarian, M. H., & Pecht, M. G. (2013). Effect of temperature and relative humidity on the impedance degradation of dust-contaminated electronics. *Journal of the Electrochemical Society*, 160(3), C97–C105. <https://doi.org/10.1149/2.024303jes>.
16. Verdingovas, V., Jellesen, M. S., Rizzo, R., Conseil, H., & Ambat, R. (2013). Impact of hygroscopicity and composition of solder flux residue on the reliability of PCBA under corrosive conditions. In *Proceedings of EUROCORR*. 2013. <http://www.eurocorr2013.org>.
17. Hansen, K. S., Jellesen, M. S., Møller, P., Westermann, P. J. S., & Ambat, R. (2009). Effect of solder flux residues on corrosion of electronics. In *Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2009. RAMS 2009*. IEEE Press. <https://doi.org/10.1109/RAMS.2009.4914727>.
18. Jellesen, M. S., Dutta, M., Verdingovas, V., & Ambat, R. (2012). Detection of acid release from reflow solder flux residues using localized test methods, paper presented at Eurocorr 2012, Istanbul, 9-13 September.
19. Conseil, H., Jellesen, M. S., Verdingovas, V., & Ambat, R. (2013). Decomposition studies of no-clean solder flux systems in connection with corrosion reliability of electronics. In *EUROCORR 2013 - European Corrosion Congress*. Article Paper H European Federation of Corrosion.
20. Munson, T. (2003), Understanding selective pallet soldering residue. *Circuit Assembly*, 14(9), 48. https://static1.squarespace.com/static/5ddd523267a1ae54e9d2cb96/t/5eed2530a6da31edac68c91/1592709715629/2003.09-Understanding_Selective_Pallet_Soldering_Residue_-_Circuits_Assembly.pdf.
21. Minges, M.L. (1989). *Electronic Materials Handbook*, 11, 1st edn. (ASM International, Almere).
22. Rathinavelu, U., Jellesen, M.S., Møller, P., Ambat, R. (2012). *IEEE Trans. Compon. Package Technol.*, 2(4), 719–728.
23. Verdingovas, V., Jellesen, M. S., Ambat, R. (2013). *Corros. Eng. Sci. Technol.*, 48(6), 426–435.
24. Verdingovas, V., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2015). Relative effect of solder flux chemistry on the humidity related failures in electronics. *Soldering & Surface Mount Technology*, 27(4), 146–156. <https://doi.org/10.1108/ssmt-11-2014-0022>.
25. Conseil, H., Jellesen, M.S., Ambat, R. (2014). *Solder. Surf. Mt. Technol.*, 26(4), 194–202.

Отримано 13.05.2025

Vasyl Volodymyrov

PhD Student, Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products,
Ukrainian State University of Science and Technology,

National Research Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology" (Dnipro, Ukraine)

E-mail: volodymyrov_vasyl@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7353-5065>

**INCREASING THE FAULT TOLERANCE OF ELECTRONIC DEVICES
USING MODERN POLYMER-INORGANIC COMPOSITE MATERIALS
WITH ELECTRONIC CONDUCTIVITY**

Recently, we can observe steady increase in the power of computing equipment, not least of which is due to emergence of multiprocessor computing systems and multicore processors, when several cores of one processor can be implemented in the conditions of one microcircuit. Not least of all, SOC (system on chip) chips have contributed to the increase in operating temperatures, in which almost the entire laptop is built as part of one processor. In general, any computer components based on semiconductors heat up in one way or another during operation. At the same time, technologies are developing, power/frequency/speed are increasing, and therefore heat dissipation is also increasing.

In addition, more and more manufacturers prefer ultra-thin product designs, we can see ultra-thin TVs, laptops, tablet computers, etc. much more often. All this, while packing more and more power into a smaller volume of products, leads to the increase in thermal load and difficulty in ventilation. Artificial ventilation and cooling are no longer able to reduce temperatures to the level that was 5-10 years ago.

The problem of studying failures of electronic equipment is global in nature, not least these failures are caused by a change in the resistance of solder flux residues, which, under the influence of a number of factors, can change their parameters. Unfortunately, in Ukraine, due to the decline in the production of electronic equipment, this issue has not been raised recently, but in the world space this problem remains relevant and may reach a new level, since in recent times production of electronic equipment has been rapidly developing. One example is the factor of the rapid increase in laptop sales, which is due to the Coronavirus pandemic, which provoked a sharp demand for mobile PCs. If in pre-pandemic 2019 the average age of a home laptop was 6 years, then the mass transition to remote work required their renewal.

Based on the above, we can conclude that despite wide distribution of no-wash fluxes, their residues, under certain conditions, can to some extent affect the trouble-free operation of electronic equipment for the assembly (formation of solder joints) of which they were used. Therefore, there is still some room for research related to operating conditions of electronic products, including increased vibration (typical of control modules of mobile equipment), increased humidity and, which has recently become increasingly relevant, increased operating temperatures of products, which are due to growing computing power, ultra-thin design, and the associated complexity of artificial ventilation.

Keywords: increased operating temperatures; no-clean fluxes; heat transfer; ultra-thin product design; ventilation complications.

Table: 1. References: 25.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-377-384](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-377-384)

УДК 622.276.72

Олег Миронович Шищак¹, Петро Іванович Топільницький¹¹аспірант кафедри технології переробки нафти і газу

Національний університет “Львівська політехніка” (Львів, Україна)

E-mail: oleh.m.shyshchak@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7377-8373>. Researcher ID: [GDW-9915-2022](https://orcid.org/0009-0007-7377-8373)²доцент кафедри технології переробки нафти і газу

Національний університет “Львівська політехніка” (Львів, Україна)

E-mail: petro.i.topilnytskyi@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7770-2567>. Researcher ID: [R-5271-2017](https://orcid.org/0000-0002-7770-2567)
Scopus ID: [56256147400](https://orcid.org/0000-0002-7770-2567)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДЕПРЕСОРА НА РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАФТ ЗАХІДНОГО РЕГІОНУ УКРАЇНИ

Для покращення транспортability властивостей високопарафіністких нафт Долинського і Бориславського родовищ досліджено їхні реологічні властивості у разі додавання промислового депресора Dodiflow 5236 (фірма Clariant, Швейцарія). За допомогою ротарійного віскозиметра визначено динамічну в'язкість і напруження зсуву чистих нафт і нафт з депресорами. Встановлено, що додавання Dodiflow 5236 покращує реологічні властивості досліджуваних високопарафіністких нафт. Їхня динамічна в'язкість зменшується в 6-7 разів, а напруження зсуву – у 6-6,5 раза.

Ключові слова: транспортування нафти; депресорні добавки; високопарафініста нафта.

Рис.: 2. Табл.: 2. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Нафти з аномальними фізико-хімічними властивостями, до яких належать високопарафіністі нафти західного регіону України, мають досить високі значення реологічних параметрів і температури застигання. Це створює труднощі при їх перекачуванні нафтопроводами та зберіганні в резервуарах, особливо в холодну пору року [1; 2]. Тому надзвичайно важливим є пошук і створення таких умов, за яких перекачування і зберігання будуть економічно вигідними та безпечними.

Постановка проблеми. Вплив депресорів на реологічні властивості високопарафіністких нафт має індивідуальний характер, а отже, для забезпечення максимальної ефективності їх транспортування необхідно експериментально визначати реологічні параметри для кожного конкретного випадку із забезпеченням відповідних технологічних умов.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Способи транспортування високопарафіністких і високов'язких нафт, які базуються на різних способах покращення реологічних характеристик і залежних від них транспортability властивостей нафт, розглядаються в багатьох роботах [2-5]. До них належать:

- перекачування з підігрівом (“гаряче” перекачування);
- перекачування із супутнім підігрівом;
- після термообробки;
- змішування нафти з розріджувачем;
- використання депресорів.

Однак кожен зі способів має певні недоліки.

Перекачування з підігрівом є найбільш відомим і дослідженим способом. Основною проблемою при його застосуванні є великі витрати тепла на підігрів нафти, втрати тепла в довкілля і значний перепад температур на початку і в кінці ділянки нафтопроводу, що викликає відкладення парафіну на внутрішніх стінках.

При термообробці нагрівання нафти до 90 °С сприяє розчиненню твердих парафінів, присутніх в її складі [5]. Подальше охолодження із заданою швидкістю призводить до зниження температури застигання і в'язкості. Проте використання цього методу пов'язане з додатковими витратами на пункти термообробки та значною витратою часу на охолодження нафти.

При дослідженні високов'язкої долинської нафти встановлено, що її реологічні властивості суттєво залежать від температури її підігріву перед закачуванням у нафтопровід [6].

У результатах дослідження [7] стосовно впливу термообробки на реологічні і транспортні властивості цієї ж нафти зазначено, що проблемою при перекачуванні з розріджувачами (малов'язка нафта, газовий конденсат, дизельне паливо) є зміна фізико-хімічних властивостей вихідної нафти, оскільки частка розріджувача може сягати в деяких випадках 70 %.

Застосування депресорів найчастіше виявляється оптимальним і перспективним способом покращення реологічних властивостей нафти, висока в'язкість яких зумовлена значним вмістом парафінів. Депресори не тільки знижують температуру застигання, кількість відкладів на стінках, а значить і енерговитрати на перекачування, але й дозволяють зменшити кількість насосних і теплових станцій при проектуванні нових трубопроводів [4].

В огляді [8] детально проаналізовано ефективність і обмеження існуючих типів депресорів, розглянуто проблеми, з якими стикається нафтовидобувна і нафтопереробна промисловість під час транспортування високопарафіністих нафт, наведено перспективні напрями наступних досліджень.

Механізму впливу депресорів на транспортні властивості високопарафіністих нафт присвячені роботи багатьох дослідників [9-11]. У роботах зазначено, що властивості кожного типу нафти унікальні, і тому для досягнення оптимальних результатів необхідно проводити моніторинг якості кожної індивідуальної нафти після введення депресорів, оскільки можуть виникати непередбачені реакції або відхилення від загальної тенденції. Крім того, підбір оптимальних додатків для кожного конкретного випадку є складним завданням, яке вимагає досліджень і експериментів [12].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх публікацій показав, що попри значну кількість публікацій стосовно проблем транспортування високопарафіністих нафт, дослідження реологічної поведінки нафт західного регіону України в присутності депресорних додатків практично не проводились.

Метою статті є дослідження впливу депресора Dodiflow 5236 виробництва фірми Clariant на реологічні властивості Долинської і Бориславської нафт з родовищ західного регіону України.

Виклад основного матеріалу. Попередньо нами було визначено, що для нафт Долина і Борислав додаток Dodiflow 5236 виявив найвищу депресорну ефективність з-поміж інших досліджуваних додатків [13]. Тому визначення реологічних властивостей нафт проводили без і з додаванням цього депресора.

Дослідження проводили з використанням віскозиметра Rheomat-30 (Contraves AG, Швейцарія). Це ротаційний віскозиметр, який використовується для визначення в'язкості матеріалів в діапазоні від 0,1 до $4 \cdot 10^5$ Па·с у діапазоні градієнта швидкостей від 0 до 452 с^{-1} . Він обладнаний адаптером ротаційного типу з коаксіальними циліндрами (вимірювальна система CM409.484, що складається з циліндра діаметром 25 мм і камери діаметром 23,8 мм, загальним об'ємом 40 см^3), циркуляційним термостатом УН-8 фірми MLW (Німеччина), і оснащений спеціальною протічною коміркою. Діапазон робочих температур $20-95^\circ\text{C}$ (термостатуюча рідина – демінералізована вода).

Перед проведенням експерименту всі деталі вимірювального приладу промивали розчинником (ізопропіловий спирт, уайт-спірит, бензин тощо). Після цього заповнювали його досліджуваним матеріалом. Маса зразка досліджуваної нафти становила 3,5 г. Включали двигун і проводили перемішування матеріалу протягом 10 хвилин при вибраній швидкості обертання. Після цього вимірювали кут обертання (α) внутрішнього конуса вимірювального приладу з досліджуваним матеріалом за різних значень градієнтів швидкості деформації. Результат вимірювання кута α регулювали на блоці вимірювання через 1 хв. Після вмикання відповідної швидкості обертання. За результат приймали середнє арифметичне значення двох послідовних визначень. Час стабілізації показу 30 с.

Динамічну (ефективну) в'язкість (η , Па·с) визначали за формулою (1):

$$\eta = \eta_{rep} \cdot \alpha, \quad (1)$$

де η_{rep} – в'язкість, яка відповідає положенню перемикача приладу при напруженні зсуву для відповідної вимірювальної системи, Па·с; α – показ на шкалі приладу, %, який відповідає куту обертання внутрішнього конуса вимірювального приладу з досліджуваним матеріалом.

Напруження зсуву (τ , Па) визначали зі співвідношення (2):

$$\tau = \eta \cdot D_{rep}, \quad (2)$$

де D_{rep} – швидкість зсуву, яка відповідає положенню перемикача приладу при напруженні зсуву для відповідної вимірювальної системи, с^{-1} .

Дослідження проводили в інтервалі швидкостей зсуву 0,06-452 с^{-1} . Температурний діапазон становив 0-20 °С. Цей температурний інтервал корелюється з реальною температурою нафти в трубопроводі за несприятливих умов.

Витрата депресора становила 1000 ppm, оскільки за такої концентрації температура застигання досліджуваних нафт знизилась до -1...-2 °С з +19 °С для нафти Долина і з +17 °С для нафти Борислав [13], що є достатнім для перекачування нафти в будь-яку пору року.

Одержані експериментальні дані показали, що в діапазоні низьких температур (нижче 10 °С) нафти Долина і Борислав поведуть себе як неньютонівські рідини, про що свідчать залежності напруження зсуву від градієнта швидкості зсуву. При додаванні депресорів ці ж нафти виявляють властивості в'язкопластичної рідини. Такі дані узгоджуються з результатами інших дослідників [6; 7; 14; 15].

Реологічні характеристики, одержані при температурі дослідження 10 °С, наведені в табл. 1 і 2 для нафт Долина і Борислав, відповідно, а їхня графічна інтерпретація представлена на рис. 1 і 2.

Таблиця 1 – Реологічні дослідження нафти Долина без і з депресором Dodiflow 5236

$D_{rep}, \text{с}^{-1}$	$\eta_{rep}, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\alpha, \%$		$\eta, \text{Па} \cdot \text{с}$		$\tau, \text{Па}$	
		без депресора	з депресором	без депресора	з депресором	без депресора	з депресором
0,527	2,125	0,8	0,1	1,7	0,2125	0,8959	0,1119
0,717	1,562	0,85	0,12	1,3277	0,1874	0,9520	0,1344
0,973	1,151	0,9	0,15	1,0359	0,1727	1,0079	0,1680
1,32	0,848	1,0	0,2	0,848	0,1696	1,1194	0,2239
1,80	0,622	1,25	0,25	0,7775	0,1555	1,3995	0,2799
2,45	0,457	1,25	0,3	0,5713	0,1371	1,4000	0,3359
3,32	0,337	1,35	0,5	0,4550	0,1685	1,5106	0,5594
4,52	0,248	1,35	0,5	0,3348	0,124	1,5133	0,5605
6,15	0,182	1,5	0,55	0,273	0,1001	1,6790	0,6156
8,35	0,134	1,55	0,6	0,2077	0,0804	1,7343	0,6713
11,35	0,0987	1,6	0,6	0,1579	0,0592	1,7921	0,6721
15,4	0,0727	1,7	0,65	0,1236	0,0473	1,9034	0,7277
21,0	0,0533	1,75	0,7	0,0933	0,0371	1,9593	0,7835
28,5	0,0393	1,75	0,7	0,0688	0,0275	1,9608	0,7840
38,7	0,0289	1,8	0,75	0,0520	0,0217	2,0132	0,8388
52,7	0,0213	1,8	0,75	0,0383	0,01598	2,0184	0,8419
71,7	0,0156	1,85	0,8	0,0289	0,0125	2,0721	0,8948
97,3	0,0115	2,0	0,8	0,023	0,0092	2,2379	0,8952
132	0,00848	2,0	0,8	0,01696	0,0068	2,2387	0,8955
180	0,00622	2,25	0,85	0,01400	0,0053	2,5200	0,9517
245	0,00457	2,5	0,9	0,01143	0,0041	2,8004	1,0077
332	0,00337	3,0	0,95	0,01011	0,0032	3,3565	1,0629
452	0,00248	3,25	1,0	0,0081	0,00248	3,6612	1,1210

Джерело: розроблено авторами.

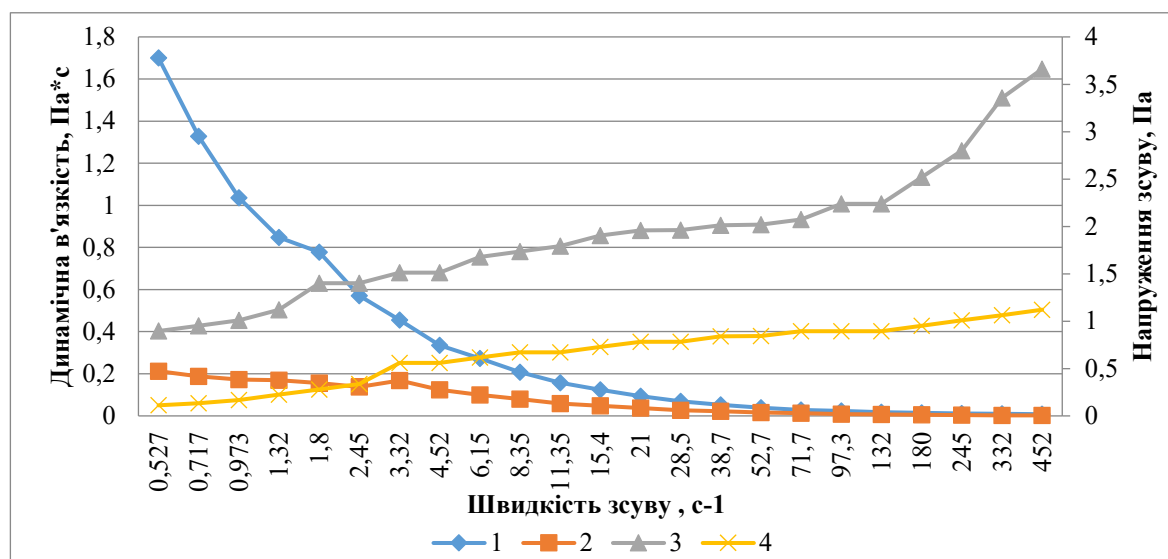


Рис. 1. Залежність динамічної в'язкості (1, 2) і напруження зсуву (3, 4) від швидкості зсуву для нафти Долина без депресора (1, 3) і з додаванням Dodiflow 5236 (2, 4)
Джерело: розроблено авторами.

Аналіз отриманих залежностей динамічної в'язкості й напруження зсуву від швидкості зсуву дає змогу стверджувати, що в початковий момент запуску приладу ($D_{\text{геп}} = 0,973 \text{ с}^{-1}$), тобто момент початку руйнування парафінової структури, спостерігається відчутний вплив депресора на реологічні властивості нафти Долина. Значення і динамічної в'язкості, і напруження зсуву нафти при додаванні Dodiflow 5236 зменшились в 6 разів, з $1,0359 \text{ Па}\cdot\text{с}$ до $0,1727 \text{ Па}\cdot\text{с}$, і з $1,0079 \text{ Па}$ до $0,1680 \text{ Па}$, відповідно. При подальшому збільшенні швидкості зсуву різниця у величинах реологічних параметрів нафти з депресором і без нього стає меншою. При швидкості 452 с^{-1} значення динамічної в'язкості та напруження зсуву для нафти з депресором зменшуються приблизно втричі порівняно з величинами, одержаними для чистої нафти.

Оскільки у присутності депресора Dodiflow 5236 температура застигання нафти Борислав знижувалась приблизно настільки ж, як і температура застигання нафти Долина [13], у її реологічній поведінці очікувалась аналогічна тенденція. Одержані експериментальні результати, представлені в табл. 2 і рис. 2, підтвердили позитивний вплив додавання депресора на основні реологічні параметри.

Таблиця 2 – Реологічні дослідження нафти Борислав без і з депресором Dodiflow 5236

$D_{\text{геп}}, \text{с}^{-1}$	$\eta_{\text{геп}}, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\alpha, \%$		$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$		$\tau, \text{Па}$	
		без депресора	з депресором	без депресора	з депресором	без депресора	з депресором
1	2	3	4	5	6	7	8
0,527	2,125	0,55	0,06	1,1687	0,1275	0,6159	0,0672
0,717	1,562	0,6	0,08	0,9372	0,1250	0,6720	0,0896
0,973	1,151	0,65	0,10	0,7481	0,1102	0,7279	0,1120
1,32	0,848	0,7	0,13	0,5936	0,1092	0,7835	0,1455
1,80	0,622	0,8	0,17	0,4976	0,1057	0,8957	0,1903
2,45	0,457	0,9	0,22	0,4113	0,1005	1,0077	0,2462
3,32	0,337	0,95	0,28	0,3201	0,0944	1,0627	0,3134
4,52	0,248	0,95	0,32	0,2356	0,0793	1,0649	0,3584
6,15	0,182	1,05	0,41	0,1911	0,0746	1,1753	0,4588
8,35	0,134	1,15	0,46	0,1541	0,0616	1,2867	0,5144
11,35	0,0987	1,15	0,47	0,1135	0,0464	1,2882	0,5266
15,4	0,0727	1,2	0,49	0,0872	0,0356	1,3429	0,5482

Закінчення табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8
21,0	0,0533	1,25	0,51	0,0666	0,0272	1,3986	0,5712
28,5	0,0393	1,25	0,53	0,0491	0,0208	1,3993	0,5928
38,7	0,0289	1,3	0,55	0,0376	0,0159	1,4551	0,6151
52,7	0,0213	1,3	0,56	0,0277	0,01193	1,4598	0,6286
71,7	0,0156	1,35	0,59	0,0211	0,0092	1,5100	0,6599
97,3	0,0115	1,45	0,61	0,0167	0,0070	1,6249	0,6825
132	0,00848	1,5	0,65	0,0127	0,0055	1,6790	0,7276
180	0,00622	1,55	0,65	0,0096	0,0040	1,7354	0,7277
245	0,00457	1,6	0,68	0,0073	0,0031	1,7914	0,7614
332	0,00337	2,0	0,70	0,0067	0,0023	2,2244	0,7832
452	0,00248	2,25	0,75	0,0058	0,0019	2,6216	0,8407

Джерело: розроблено авторами.

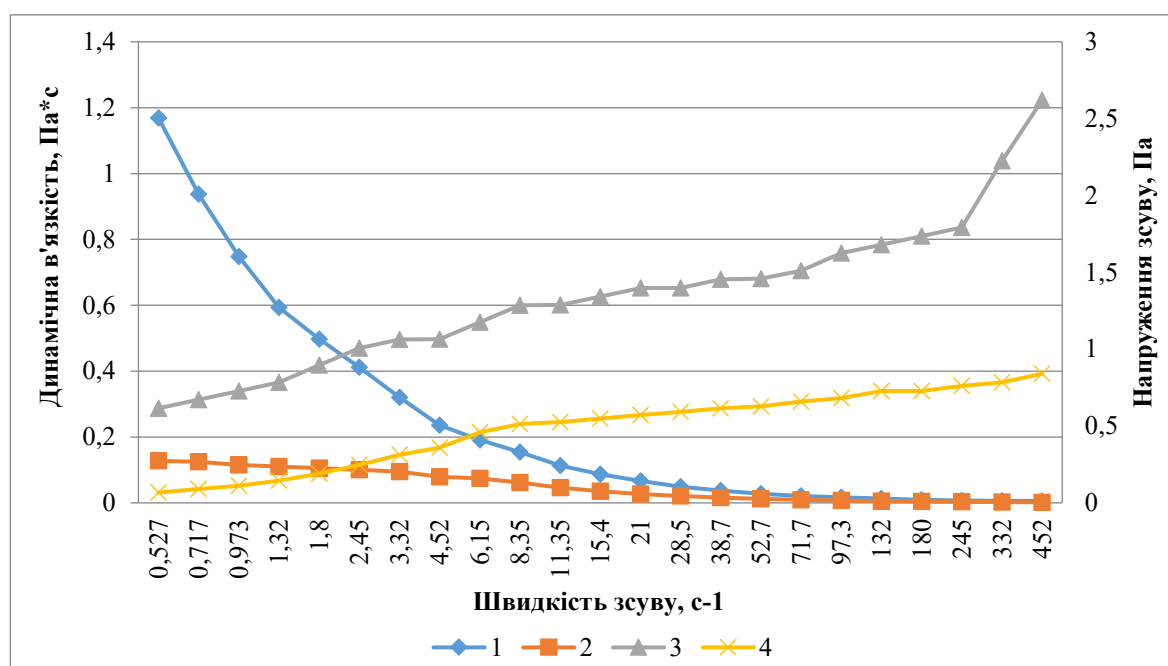


Рис. 2. Залежність динамічної в'язкості (1, 2) і напруження зсуву (3, 4) від швидкості зсуву для нафти Борислав без депресора (1, 3) і з додаванням Dodiflow 5236 (2, 4)
Джерело: розроблено авторами.

У початковий момент запуску приладу значення динамічної в'язкості нафти при додаванні Dodiflow 5236 зменшились приблизно в 7 разів, з 0,7481 Па·с до 0,11102 Па·с, а напруження зсуву з 0,7279 Па до 0,112 Па, тобто в 6,5 раза. При швидкості 452 с⁻¹, як і для нафти Долина, значення динамічної в'язкості та напруження зсуву зменшуються втричі.

Як видно з експериментальних даних, додавання депресора Dodiflow 5236 в кількості 1000 ppm зменшує внутрішні напруження обох досліджуваних нафт, особливо в момент початку перекачування. Це особливо важливо, якщо є ймовірність періодичної зупинки нафтопроводу, заповненого високопарафіністою нафтою, тому що зменшить пускові тиски та істотно знизить можливість виникнення нештатних аварійних ситуацій при подальшому запуску.

Оскільки полімерні добавки впливають на морфологію кристалів, у наших попередніх дослідженнях [13] була доведена доцільність введення депресора в нафту при температурі, вищій за температуру плавлення парафінів, присутніх у її складі. На нашу думку,

за такої температури кристали парафіну, які утворюють стійку кристалічну ґратку за низьких температур, переходять у дисперсний стан, і тому можуть зв'язуватись із молекулами депресора. Таким чином кристалічна ґратка парафіну втрачає здатність для структуроутворення. Парафіни разом із депресором рухаються в потоці нафти в дисперсному стані із суттєво зниженою в'язкістю.

Отже, використання досліджуваних депресорів, за умов дотримання технології їх введення, дозволить суттєво зменшити гідравлічний опір трубопроводу, а отже, і енергетичні втрати в системі. Очевидно, кристали парафіну в присутності молекул депресора набувають інших форм, розмірів і властивостей, втрачається чи послаблюється їхня властивість взаємодіяти між собою, будувати просторову структуру. Внаслідок цього нафта набуває нових властивостей: знижується температура застигання, покращуються реологічні параметри, зона прояву структурних властивостей зсувається в область від'ємних температур.

Висновки. Визначення унікальних властивостей кожного типу нафти та їх взаємодія з депресорами важливе для розроблення стратегії зберігання та транспортування нафти, щоб уникнути негативних наслідків для якості продукту та ефективності його використання. У роботі досліджено реологічні параметри нафт Долина і Борислав без депресорів і з додаванням їх. Встановлено, що додавання депресора Dodiflow 5236 у кількості 1000 ppm зменшує динамічну в'язкість в 6 разів для нафти Долина, і в 7 разів для нафти Борислав. При цьому початкове напруження зсуву також зменшується, в 6-6,5 раза для обох досліджуваних нафт. Таке покращення реологічних властивостей, за умови дотримання технології введення депресорів, дозволить забезпечити оптимальну ефективність та довговічність системи транспортування нафти.

Список використаних джерел

1. Ibrahim, R. I., Odah, M. K., & Al-Mufti, A. (2019). An overview on the recent techniques for improving the flowability of crude oil in pipelines. *IOP conference series: materials science and engineering*, 579(1), 012054. IOP Publishing.
2. Ratnakar R. K., Pandian S., Mary H., & Choksi H. (2024). Flow assurance methods for transporting heavy and waxy crude oils via pipelines without chemical additive intervention. *Petroleum Research*, 10(1), 204-215. <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2024.07.005>.
3. Chala, G., Sulaiman, S., & Japper-Jaafar, A. (2018). Flow start-up and transportation of waxy crude oil in pipelines-A review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2017.11.008>.
4. Kumar, A. (2023). Perspectives of flow assurance problems in oil and gas production: A mini-review. *Energy & Fuels*, 37(12), 8142–8159. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c00843>.
5. Zhu, H., Lei, Y., Yu, P., Li, C., Yang, F., Yao, B. et al. (2024). Wax deposition during the transportation of waxy crude oil: Mechanisms, influencing factors, modeling, and outlook. *Energy & Fuels*, 38(11), 9131-9152. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c04687>.
6. Яновський, С. Р., Середюк, М. Д., & Пилипів Л. Д. (2008). Дослідження впливу температури підігрівання долиньської нафти на її реологічні властивості. *Науковий вісник ІФНТУНГ*, 1(17), 82-91.
7. Пилипів Л. Д. (2015). Дослідження впливу термообробки високов'язкої долиньської нафти на її реологічні та транспортабельні властивості. *Нафтогазова галузь України*. 1, 18-20.
8. Ala, B. S. K., & Daraboina, N. (2024). Chemical management for wax deposition: Recent developments and future prospects. *Energy Fuels*, 38(13), 11437–11454. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c01371>.
9. Jovanović, S., Tolmač, J., Prvulovic, S., Markovic M., Lavolic B., & Tolmač, D. (2021). Analyzing the processing of high paraffin oils by addition of modifiers of rheological properties. *34th International Congress on Process Industry*. 34(1), 113-118. <http://dx.doi.org/10.24094/ptk.021.34.1.113>.

10. Guo, L., Xu, X., Lei, Y., Wang, L., Yu, P., & Xu, Q. (2022). Study on the viscoelastic-thixotropic characteristics of waxy crude oil based on stress loading. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208(A), 109159. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109159>.
11. Li, B., Guo, Z., Du, M., Han, D., Han, J., Zheng, L., et al. (2024). Research status and outlook of mechanism, characterization, performance evaluation, and type of pour point depressants in waxy crude oil: A review. *Energy Fuels*, 38(9), 7480-7509. doi:10/1021/acs.energyfuels.3c04555.
12. Gurbanov H. R., & Gasimzade, A. V. (2023). Study of the combined effect of magnetic field and the addition of new composition on the rheological parameters of high paraffin oil. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 1, 11-17. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2023-146-1-11-17>.
13. Shyshchak, O. M., Topilnytskyu, P. I., & Skorokhoda, V. Y. (2024). Selection and study of depressant additives to improve the low-temperature properties of high waxy crude oils from the Western region of Ukraine. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 6, 129-135. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2024-157-6-129-135>.
14. Середюк, М. Д., & Григорський, С. Я. (2019). Гідродинамічний розрахунок нафтопроводу при транспортуванні нафти з неньютонівськими властивостями за низьких швидкостей зсуву. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*, 15(77), 99-105.
15. Andrade, D. E. V., & Negrão, C. O. R. (2025). Rheology of waxy oils: A critical review. *Applications in Engineering Science*, 21, 100202. <https://doi.org/10.1016/j.apples.2024.100202>.

References

1. Ibrahim, R. I., Odah, M. K., & Al-Mufti, A. (2019). An overview on the recent techniques for improving the flowability of crude oil in pipelines. *IOP conference series: materials science and engineering*, 579(1), 012054. IOP Publishing.
2. Ratnakar R. K., Pandian S., Mary H., & Choksi H. (2024). Flow assurance methods for transporting heavy and waxy crude oils via pipelines without chemical additive intervention, *Petroleum Research*, 10(1), 204-215. <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2024.07.005>.
3. Chala, G., Sulaiman, S., & Japper-Jaafar, A. (2018). Flow start-up and transportation of waxy crude oil in pipelines-A review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2017.11.008>.
4. Kumar, A. (2023). Perspectives of flow assurance problems in oil and gas production: A mini-review. *Energy & Fuels*, 37(12), 8142–8159. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c00843>.
5. Zhu, H., Lei, Y., Yu, P., Li, C., Yang, F., Yao, B. et al. (2024). Wax deposition during the transportation of waxy crude oil: Mechanisms, influencing factors, modeling, and outlook. *Energy & Fuels*, 38(11), 9131-9152. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c04687>.
6. Yanovskyi, S. R., Serediuk, M.D., & Pylypiv L.D. (2008). Doslidzhennia vplyvu temperatury pidihrivannia dolynskoi nafty na yii reolohichni vlastyvoli [Studies on the influence of the temperature of the extraction of Dolyna oil on its rheological properties]. *Naukovyi visnyk IFNTUNH – Scientific Bulletin of IFNTUNH*, 1(17), 82-91.
7. Pylypiv L. D. (2015). Doslidzhennia vplyvu termoobrobky vysokoviazkoi dolynskoi nafty na yii reolohichni ta transportabelni vlastyvoli [Studies on the impact of thermal treatment of high-viscosity Dolyna oil on its rheological and transport properties]. *Naftohazova haluz Ukrainy – Oil and Gas Industry of Ukraine*, 1, 18-20.
8. Ala, B. S. K., & Daraboina, N. (2024). Chemical Management for Wax Deposition: Recent Developments and Future Prospects. *Energy Fuels*, 38(13), 11437–11454. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c01371>.
9. Jovanović, S., Tolmač, J., Prvulovic, S., Markovic M., Lavalic B., & Tolmač, D. (2021). Analyzing the processing of high paraffin oils by addition of modifiers of rheological properties. *34th International Congress on Process Industry*, 34(1), 113-118. <https://doi.org/10.24094/ptk.021.34.1.113>.
10. Guo, L., Xu, X., Lei, Y., Wang, L., Yu, P., & Xu, Q. (2022). Study on the viscoelastic-thixotropic characteristics of waxy crude oil based on stress loading. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208(A), 109159, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109159>.
11. Li, B., Guo, Z., Du, M., Han, D., Han, J., Zheng, L., et al. (2024). Research status and outlook of mechanism, characterization, performance evaluation, and type of pour point depressants in waxy crude oil: A review. *Energy Fuels*, 38(9), 7480-7509. doi:10/1021/acs.energyfuels.3c04555.

12. Gurbanov H. R. & Gasimzade, A. V. (2023). Study of the combined effect of magnetic field and the addition of new composition on the rheological parameters of high paraffin oil. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 1, 11-17. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2023-146-1-11-17>.

13. Shyshchak, O. M., Topilnytskyi, P. I., & Skorokhoda, V. Y. (2024). Selection and study of depressant additives to improve the low-temperature properties of high waxy crude oils from the Western region of Ukraine. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 6, 129-135. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2024-157-6-129-135>.

14. Serediuk, M. D., & Hryhorskyi, S. Ya. (2019). Hidrodinamichniy rozrakhunok naftoprovodu pry transportuvanni nafty z neniutonivskymy vlastyvostiamy za nyzkykh shvydkostei zsuvu [Hydrodynamic calculation of oil pipelines for oil transportation with non-inductive properties at low shear rates]. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal «Internauka» – International scientific journal “Internauka”*, 15(77), 99-105.

15. Andrade, D. E. V., & Negrão, C. O. R. (2025). Rheology of waxy oils: A critical review. *Applications in Engineering Science*, 21, 100202. <https://doi.org/10.1016/j.applsc.2024.100202>.

Отримано 15.04.2025

UDC 622.276.72

Oleh Shyshchak¹, Petro Topilnytskyi¹

¹post-graduate student of the Department of Oil and Gas Processing

Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: oleh.m.shyshchak@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-7377-8373>. **Researcher ID:** [GDW-9915-2022](https://orcid.org/0009-0007-7377-8373)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Oil and Gas Processing

Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: petro.i.topilnytskyi@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7770-2567>. **Researcher ID:** [R-5271-2017](https://orcid.org/0000-0002-7770-2567)

Scopus ID: [56256147400](https://orcid.org/0000-0002-7770-2567)

STUDY ON EFFECT OF DEPRESSANT ON RHEOLOGICAL PROPERTIES OF OILS FROM THE WESTERN REGION OF UKRAINE

Facilitating high waxy oil transportation, the decrease in oil viscosity and the increase in the pipeline transmission capacity remain in the spotlight of researchers.

In the situation when development of some Ukrainian oil fields has either been suspended or even ceased to exist due to the Russian aggression, investigation of oils, which are produced in the western region of Ukraine and are primarily high waxy and high-viscosity oils, is of particular importance.

The analysis of recent studies shows that despite a variety of publications regarding transportation problems of high waxy oil, investigations of rheological behavior of oils from the western region of Ukraine in the presence of depressants actually have not been studied.

The effect of depressants on rheological properties of high waxy oil is individual, and therefore, to ensure maximum efficiency of oil transportation, it is necessary to experimentally determine rheological parameters for each specific case, adhering to corresponding operating conditions.

This article aims to study the effect of Dodiflow 5236 industrial depressant (Clariant, Switzerland) on rheological properties of Dolyna and Borislav oils from the western region of Ukraine.

In this work, rheological parameters of Dolyna and Borislav oils without depressant and in its presence were determined. Using the Rheomat-30 rotational viscometer, the dynamic viscosity and shear stress were determined. It was found that adding 1000 ppm of Dodiflow 5236 decreases the dynamic viscosity by 6 times for Dolyna oil and by 7 times for Borislav oil. At the same time, the initial shear stress is decreased by almost the same amount, by 6 times for Dolyna oil and by 6.5 times for Borislav oil.

Determining the unique properties of oils from the western region of Ukraine and their interactions with depressants are important for developing the strategy of oil storage and transportation to avoid negative impact on the product quality and efficiency of its use. The obtained results regarding improvement of rheological properties of Dolyna and Borislav oils when following the depressant introduction technology will allow ensuring optimal efficiency and avoiding many problems in the oil transportation system.

Keywords: oil transportation; depressant additive; high waxy oil.

Fig.: 2. **Table:** 2. **References:** 15.

РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-385-399](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-385-399)

УДК 62-523:681.513.66

Олег Володимирович Ключев

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електротехніки та електромеханіки
Дніпровський державний технічний університет (Кам'янське, Україна)

E-mail: kluev2006@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4542-3317>. Scopus Author ID: 57217113986

СПОСТЕРІГАЧ ШВИДКОСТІ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ НА ОСНОВІ ВЕКТОРА ПОТОКОЗЧЕПЛЕННЯ РОТОРА

У статті здійснений структурний і параметричний синтез спостерігача швидкості в класі систем з еталонною моделлю, у якій функція адаптації визначена як векторний добуток оцінок вектора потокозчеплення ротора асинхронної машини (АМ). Після запису рівнянь моделей статора і ротора стосовно проєкцій вектора потокозчеплення ротора в осях у результаті аналітичних перетворень записується умова стійкості спостерігача швидкості, сформульована другою теоремою Ляпунова про стійкість руху. З цієї умови знаходиться закон адаптації моделі ротора до еталонної моделі статора. Для визначення параметрів ПІ-регулятора в складі спостерігача швидкості проведена лінеаризація його рівнянь динаміки. Отримано характеристичне рівняння лінеаризованого спостерігача, коефіцієнти якого залежать від швидкості і коефіцієнтів підсилення складових регулятора. Побудовано границі стійкості спостерігача швидкості ротора в площині параметрів його регулятора, що дозволяє обґрунтовано задавати ці параметри в спостерігачі, забезпечуючи одночасно асимптотичну стійкість спостерігача і необхідну швидкодію.

Ключові слова: Асинхронна машина, система з еталонною моделлю, спостерігач швидкості, функція адаптації, характеристичне рівняння, асимптотична стійкість

Рис.: 5. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Сучасний загальнопромисловий електропривод (ЕП) має бути недорогим, надійним і легко вбудовуватися в діюче виробниче устаткування без втручання в його конструкцію. Найбільшою мірою цим вимогам задовольняють бездатчикові системи ЕП на базі асинхронних машин із короткозамкненим ротором, де всі необхідні для їхнього функціонування виміри здійснюються усередині схеми керуваного перетворювача частоти [1]. У бездатчикових асинхронних ЕП зі скалярним частотним керуванням необхідно мати оцінку як мінімум кутової швидкості ротора. Ідентифікувати механічні змінні АМ складніше, ніж електромагнітні, що стосується і швидкості ротора. У моделі статора змінна швидкості відсутня. У моделі ротора швидкість, якщо її потрібно визначити, є невідомою вхідною величиною. Момент інерції ротора і момент навантаження на його валу змінні величини, які складно визначити, що зумовлює неефективність використання рівняння руху ЕП для обчислення швидкості ротора. При цьому слід зазначити, що для синтезу спостерігачів добре зарекомендували себе методи теорії систем керування з еталонною моделлю [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [3] описуються спостерігачі Model Reference Adaptive System (MRAS) для оцінки швидкості асинхронного двигуна з прямим керуванням моментом і потокозчепленням. Перший спостерігач синтезований на основі порівняння векторів потокозчеплень, а другий – на основі векторів струмів. Порівнюється точність ідентифікації швидкості цими двома спостерігачами. Однак не приводиться методика синтезу структури спостерігачів і не пояснюється, як підбиралися параметри ПІ-регулятора, що забезпечує нульове значення функції адаптації в сталому режимі. У [4] пропонується спостерігач швидкості MRAS, у якому адаптивна модель ротора створена на основі нейронної мережі, придатної для електроприводів з лінійними асинхронними двигунами. Вагові коефіцієнти нейронної мережі підбираються методом зворотного поширення помилки. У [5] синтезована векторна система керування АМ зі

спостерігачем швидкості MRAS, у якому модель ротора будується не як система диференціальних рівнянь, а як нейронна мережа, що визначає проєкції вектора потокозчеплення ротора. Така структура спостерігача підвищує точність ідентифікації швидкості й забезпечує інваріантність спостерігача до зміни моменту навантаження. У [6] досліджуються класичний спостерігач швидкості MRAS з ПІ-регулятором від функції адаптації і спостерігач з релейним регулятором на виході цієї функції. Обговорюються стійкість і динаміка двох запропонованих спостерігачів. Спостерігач швидкості MRAS з ковзним режимом не вимагає настроювання значень коефіцієнтів регулятора функції адаптації, що потрібно в класичному спостерігачі, і не містить полюсів у правій напівплощині комплексної площини коренів, що свідчить про стійкість спостерігача MRAS з ковзним режимом. У [7] еталонна й регульована моделі, розроблені в нерухомій системі відліку статора, використовуються у схемі MRAS для одержання оцінки швидкості ротора АМ. Цей спостерігач швидкості об'єднаний зі спостерігачем Люєнбергера моменту навантаження. У [8] вказується на те, що еталонна модель містить інтегратори від ЕРС статора, які можуть накопичувати помилку при неточному визначенні активного опору обмоток статора і цей небажаний ефект сильніше виявляється на знижених швидкостях ротора АМ. Тому спостерігач швидкості за принципом MRAS синтезується на основі порівняння векторів ЕРС, а не потокозчеплень. У [9] досліджена динаміка полеорієнтованої системи керування АМ з нечіткими регуляторами, у якій коло зворотного зв'язку за швидкістю реалізовано через спостерігач швидкості типу MRAS з обчисленням векторного добутку оцінок векторів потокозчеплень. У цій роботі продемонстрована тільки асимптотична стійкість такої системи керування. При цьому в динамічних режимах регулювання швидкості присутня значна помилка ідентифікації швидкості спостерігачем. У статті [10] представлена адаптивна система спостереження за швидкістю MRAS на основі струмів статора АМ. Обмірювані струми використовуються як еталонна модель для спостерігача швидкості, щоб уникнути використання операції чистого інтегрування. Двошарова нейронна мережа використовується як адаптивна модель для ідентифікації вектора струму статора. Такий спостерігач показав стабільну роботу в режимі рекуперативного гальмування. У [11] функція адаптації спостерігача швидкості визначається як векторний добуток векторів потокозчеплення ротора і прирощення струму статора. Щоб уникнути накопичення помилки в інтеграторах рівнянь еталонної моделі, у структуру спостерігача швидкості вбудований ідентифікатор активного опору фазних обмоток статора АМ.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У розглянутих літературних джерелах проводиться структурний синтез і пропонуються різні варіанти структури спостерігача швидкості як адаптивної системи з еталонною моделлю. При цьому у всіх структурах спостерігача швидкості присутній інтеграл від функції адаптації, одержання аналітичного виразу якої є основною задачею структурного синтезу. При цьому до інтегральної складової без достатнього обґрунтування додається пропорційна складова. Параметри ПІ-регулятора функції адаптації підбираються шляхом багаторазового розрахунку математичних моделей замкнутих бездатчикових систем керування швидкістю асинхронних ЕП. Таким чином, задача параметричного синтезу спостерігачів MRAS для оцінки швидкості не розв'язувалася, і в літературних джерелах відсутні будь-які рекомендації з вибору числових значень коефіцієнтів підсилення ПІ-регулятора в складі спостерігача швидкості.

Мета дослідження полягає в тому, щоб виконати структурний синтез спостерігача швидкості MRAS на основі другої теореми Ляпунова про стійкість руху і викласти розрахункову методику визначення максимально припустимого з умов асимптотичної стійкості числового діапазону, з якого можливо вибирати параметри ПІ-регулятора спостерігача швидкості.

Виклад основного матеріалу. Рівняння рівноваги напруг статорних і роторних кіл асинхронної машини в осях u, v мають вигляд [12]:

$$\vec{U}_s = \vec{I}_s R_s + \frac{d\vec{\Psi}_s}{dt} + j\omega_k \vec{\Psi}_s; \quad \vec{U}_r = \vec{I}_r R_r + \frac{d\vec{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega) \vec{\Psi}_r, \quad (1)$$

де $\vec{U}_s, \vec{U}_r, \vec{I}_s, \vec{I}_r, \vec{\Psi}_s, \vec{\Psi}_r$ – вектори напруг, струмів та потокозчеплень статора і ротора; ω – швидкість обертання ротора АМ в електричних рад/с; ω_k – швидкість обертання ортогональної системи координат, у якій записується система рівнянь через проєкції векторів; R_s, R_r – активний опір фазних обмоток статора і ротора; j – уявна одиниця.

Рівняння потокозчеплень такі:

$$\vec{\Psi}_s = \vec{I}_s L_s + \vec{I}_r L_m; \quad \vec{\Psi}_r = \vec{I}_s L_m + \vec{I}_r L_r. \quad (2)$$

Запишемо рівняння (1) у скалярній формі в осях α, β ($\omega_k = 0$) для АМ з короткозамкненим ротором:

$$u_{s\alpha} = p\Psi_{s\alpha} + R_s I_{s\alpha}; \quad u_{s\beta} = p\Psi_{s\beta} + R_s I_{s\beta}, \quad (3)$$

$$0 = p\Psi_{r\alpha} + \omega\Psi_{r\beta} + R_r I_{r\alpha}; \quad 0 = p\Psi_{r\beta} - \omega\Psi_{r\alpha} + R_r I_{r\beta}. \quad (4)$$

Рівняння потокозчеплень (2) приймають вигляд:

$$\Psi_{s\alpha} = L_s I_{s\alpha} + L_m I_{r\alpha}; \quad \Psi_{s\beta} = L_s I_{s\beta} + L_m I_{r\beta}, \quad (5)$$

$$\Psi_{r\alpha} = L_r I_{r\alpha} + L_m I_{s\alpha}; \quad \Psi_{r\beta} = L_r I_{r\beta} + L_m I_{s\beta}. \quad (6)$$

Зі співвідношень (6) виражаємо проєкція вектора струму ротора:

$$I_{r\alpha} = \frac{\Psi_{r\alpha} - L_m I_{s\alpha}}{L_r}; \quad I_{r\beta} = \frac{\Psi_{r\beta} - L_m I_{s\beta}}{L_r}. \quad (7)$$

Підставляємо вирази (7) у формули (5) і після перетворень одержимо:

$$\Psi_{s\alpha} = \frac{L_m}{L_r} \Psi_{r\alpha} + \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} I_{s\alpha}; \quad \Psi_{s\beta} = \frac{L_m}{L_r} \Psi_{r\beta} + \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} I_{s\beta}. \quad (8)$$

$$\Psi_{s\alpha} = \int (u_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha}) dt; \quad \Psi_{s\beta} = \int (u_{s\beta} - R_s I_{s\beta}) dt. \quad (9)$$

$$\Psi_{r\alpha} = \frac{L_r}{L_m} \int (u_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha}) dt - \frac{\Delta}{L_m} I_{s\alpha}; \quad \Psi_{r\beta} = \frac{L_r}{L_m} \int (u_{s\beta} - R_s I_{s\beta}) dt - \frac{\Delta}{L_m} I_{s\beta}. \quad (10)$$

На підставі співвідношень (3) і (8) можна побудувати найпростіший спостерігач потокозчеплення ротора. З формул (3) визначаються проєкції вектора потокозчеплення статора:

Формули (9) підставляємо у вирази (8) і після перетворень приходимо до наступних формул для знаходження складових вектора потокозчеплення ротора, де $\Delta = L_s L_r - L_m^2$.

З формул (10) випливає, що для ідентифікації вектора потокозчеплення ротора достатньо вимірювати напруги і струми статора АМ. У вирази (4) підставимо значення струмів ротора (7) і після перетворень одержимо такі рівняння потокозчеплень:

$$p\Psi_{r\alpha} = -\frac{R_r}{L_r} \Psi_{r\alpha} - \omega\Psi_{r\beta} + R_r k_r I_{s\alpha}; \quad p\Psi_{r\beta} = -\frac{R_r}{L_r} \Psi_{r\beta} + \omega\Psi_{r\alpha} + R_r k_r I_{s\beta}, \quad (11)$$

де $k_r = L_m / L_r$.

Потокозчеплення ротора можна визначити за моделлю статора (10), для чого потрібно вимірювати струми і напруги статора. Потокозчеплення також можна визначити з моделі ротора (11), для чого потрібно вимірювати струм статора і знати швидкість ротора. Струми й напруги статора вимірюються і тому не варіюються. Потокозчеплення, обчислене за цими двома моделями, буде однаковим, якщо швидкість на вході моделі ротора

буде дорівнювати реальній швидкості ротора. На цій властивості заснована ідея побудови спостерігача швидкості. Модель статора є еталонною й обчислюване за нею потокозчеплення вважається справжнім, тобто збіжним з потокозчепленням АМ. Модель ротора адаптується за потокозчепленням під модель статора. Адаптація моделі ротора здійснюється регулятором, на вході якого порівнюються потокозчеплення моделей і регулятором виробляється сигнал оцінки швидкості ротора $\hat{\omega}$. Знаходження закону адаптації є основною задачею структурного синтезу спостерігача.

Виходячи з умови стійкості спостерігача, визначимо закон адаптації. У матричній формі рівняння (11) електромагнітних процесів у роторі будуть такими:

$$\frac{dX}{dt} = AX + a_{r2l}I_s, \quad (12)$$

$$\text{де } A = \begin{pmatrix} -R_r/L_r & -\omega \\ \omega & -R_r/L_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{r22} & -a_{i22} \\ a_{i22} & a_{r22} \end{pmatrix}; \quad a_{r22} = -R_r/L_r; \quad a_{i22} = \omega.$$

Коефіцієнти матриці об'єкта A залежать від параметрів схеми заміщення і реальної швидкості ротора. Вираз моделі ротора буде:

$$\frac{d\hat{X}}{dt} = \hat{A}\hat{X} + a_{r2l}I_s, \quad (13)$$

де $\hat{X} = \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_{r\alpha}^R & \hat{\Psi}_{r\beta}^R \end{pmatrix}^T$ – оцінка потокозчеплення ротора, $\hat{A}$ – оцінка матриці об'єкта.

Якщо вважати параметри схеми заміщення АМ постійними і відомими, то рівняння моделі ротора відрізняються від незбуреного рівняння ротора тільки тим, що в ньому замість реальної швидкості ω використовується її оцінка $\hat{\omega}$. Тому матриці $\hat{A}$ і A будуть відрізнятися тільки коефіцієнтами, що залежать від швидкості.

Запишемо рівняння помилки потокозчеплення моделі ротора. Для цього введемо позначення помилки визначення потокозчеплення

$$e = X - \hat{X} = \begin{pmatrix} \Psi_{r\alpha} \\ \Psi_{r\beta} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_{r\alpha}^R \\ \hat{\Psi}_{r\beta}^R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta\Psi_{r\alpha} \\ \Delta\Psi_{r\beta} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

При еталонній моделі статора можна записати

$$\begin{pmatrix} \Delta\Psi_{r\alpha} \\ \Delta\Psi_{r\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_{r\alpha}^S - \hat{\Psi}_{r\alpha}^R \\ \hat{\Psi}_{r\beta}^S - \hat{\Psi}_{r\beta}^R \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Матриця помилки об'єкта:

$$\Delta A = \hat{A} - A = \begin{pmatrix} a_{r22} & -\hat{a}_{i22} \\ \hat{a}_{i22} & a_{r22} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a_{r22} & -a_{i22} \\ a_{i22} & a_{r22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\Delta\omega \\ \Delta\omega & 0 \end{pmatrix}, \quad (16)$$

де $\Delta\omega = \hat{\omega} - \omega$.

Віднімаємо з рівняння ротора двигуна рівняння моделі ротора

$$\frac{dX}{dt} - \frac{d\hat{X}}{dt} = AX - \hat{A}\hat{X}. \quad (17)$$

Підставивши в це рівняння $X = e + \hat{X}$ і $\hat{A} = \Delta A + A$, одержимо рівняння, що описує відхилення спостерігача

$$\frac{de}{dt} = Ae - \Delta A\hat{X}. \quad (18)$$

Для роботи спостерігача процес, що описується системою (18), повинний залишатися стійким. Одержимо умови стійкості з аналізу функції Ляпунова.

Для рівняння (18) як функцію Ляпунова запишемо позитивно визначену функцію

$$V = e^T e + \frac{(\hat{\omega} - \omega)^2}{\lambda} = \Delta \Psi_{r\alpha}^2 + \Delta \Psi_{r\beta}^2 + \frac{\Delta \omega^2}{\lambda}. \quad (19)$$

Знайдемо повну похідну за часом функції (19):

$$\frac{dV}{dt} = \frac{d}{dt} \left(e^T e + \frac{\Delta \omega^2}{\lambda} \right) = \left(\frac{de^T}{dt} \right) e + e^T \left(\frac{de}{dt} \right) + \frac{1}{\lambda} \left(\frac{\partial (\hat{\omega} - \omega)^2}{\partial \hat{\omega}} \frac{d\hat{\omega}}{dt} + \frac{\partial (\hat{\omega} - \omega)^2}{\partial \omega} \frac{d\omega}{dt} \right). \quad (20)$$

Вважаємо, що адаптація здійснюється швидше, ніж змінюється частота обертання ротора. Тоді швидкість ротора ω можна вважати умовно постійною, а похідну $d\omega/dt$ рівною нулю. У цьому випадку вираз для похідної (20) запишеться так

$$\frac{dV}{dt} = \left(\frac{de^T}{dt} \right) e + e^T \left(\frac{de}{dt} \right) + \frac{2}{\lambda} \Delta \omega \frac{d\hat{\omega}}{dt}. \quad (21)$$

З урахуванням (18) вираз (21) запишеться таким чином

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= (Ae - \Delta A \hat{X})^T e + e^T (Ae - \Delta A \hat{X}) + \frac{2}{\lambda} \Delta \omega \frac{d\hat{\omega}}{dt} = \\ &= e^T A^T e + e^T A e - \hat{X}^T \Delta A^T e - e^T \Delta A \hat{X} + \frac{2}{\lambda} \Delta \omega \frac{d\hat{\omega}}{dt}. \end{aligned} \quad (22)$$

Якщо підставити вирази матриць у співвідношення (22), то після перетворень одержимо

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= -\frac{2}{T_r} \left((\hat{\Psi}_{r\alpha}^S)^2 + (\hat{\Psi}_{r\alpha}^R)^2 - 2\hat{\Psi}_{r\alpha}^S \hat{\Psi}_{r\alpha}^R + (\hat{\Psi}_{r\beta}^S)^2 + (\hat{\Psi}_{r\beta}^R)^2 - 2\hat{\Psi}_{r\beta}^S \hat{\Psi}_{r\beta}^R \right) + \frac{2}{\lambda} \Delta \omega \frac{d\hat{\omega}}{dt} + \\ &+ 2\Delta \omega (\hat{\Psi}_{r\beta}^R \hat{\Psi}_{r\alpha}^S - \hat{\Psi}_{r\alpha}^R \hat{\Psi}_{r\beta}^S) = -\frac{2}{T_r} (\Delta \Psi_{r\alpha}^2 + \Delta \Psi_{r\beta}^2) + 2\Delta \omega (\hat{\Psi}_{r\beta}^R \hat{\Psi}_{r\alpha}^S - \hat{\Psi}_{r\alpha}^R \hat{\Psi}_{r\beta}^S) + \frac{2}{\lambda} \Delta \omega \frac{d\hat{\omega}}{dt}. \end{aligned} \quad (23)$$

Виділимо у виразі (23) два доданки:

$$dV/dt = S_1 + S_2,$$

де

$$S_1 = -\frac{2}{T_r} (\Delta \Psi_{r\alpha}^2 + \Delta \Psi_{r\beta}^2); \quad S_2 = 2\Delta \omega (\hat{\Psi}_{r\beta}^R \hat{\Psi}_{r\alpha}^S - \hat{\Psi}_{r\alpha}^R \hat{\Psi}_{r\beta}^S) + \frac{2}{\lambda} \Delta \omega \frac{d\hat{\omega}}{dt}. \quad (24)$$

Проаналізуємо знак похідної dV/dt . Вираз S_1 завжди негативний. Тому для забезпечення негативної визначеності похідної функції V достатньо надати величині S_2 нульове значення, тобто

$$S_2 = -2\Delta \omega (\hat{\Psi}_{r\alpha}^R \hat{\Psi}_{r\beta}^S - \hat{\Psi}_{r\beta}^R \hat{\Psi}_{r\alpha}^S) + \frac{2}{\lambda} \Delta \omega \frac{d\hat{\omega}}{dt} = 0. \quad (25)$$

Звідси

$$\frac{1}{\lambda} \frac{d\hat{\omega}}{dt} = \hat{\Psi}_{r\alpha}^R \hat{\Psi}_{r\beta}^S - \hat{\Psi}_{r\beta}^R \hat{\Psi}_{r\alpha}^S. \quad (26)$$

Запишемо вираз (26) у такому вигляді

$$\hat{\omega} = \lambda \int (\hat{\Psi}_{r\alpha}^R \hat{\Psi}_{r\beta}^S - \hat{\Psi}_{r\beta}^R \hat{\Psi}_{r\alpha}^S) dt = \lambda \int \begin{vmatrix} \hat{\Psi}_{r\alpha}^R & \hat{\Psi}_{r\beta}^R \\ \hat{\Psi}_{r\alpha}^S & \hat{\Psi}_{r\beta}^S \end{vmatrix} dt = \lambda \int (\hat{\Psi}_r^R \times \hat{\Psi}_r^S) dt. \quad (27)$$

Формула (27) являє собою закон адаптації для системи (18), який можна забезпечити, якщо в регулюючому адаптері використовувати І-регулятор, а краще більш швидкодіючий ПІ-регулятор. Вираз (27) визначає структуру спостерігача без параметричного синтезу, який складається у визначенні параметра λ .

Розв'язуємо рівняння спостерігача відносно похідних оцінюваних величин. З рівнянь статора (10), що представляють еталонну модель, випливає:

$$p\hat{\Psi}_{r\alpha}^S = \frac{1}{k_r}(u_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha}) - \frac{\Delta}{L_m} p I_{s\alpha}; \quad p\hat{\Psi}_{r\beta}^S = \frac{1}{k_r}(u_{s\beta} - R_s I_{s\beta}) - \frac{\Delta}{L_m} p I_{s\beta}. \quad (28)$$

Рівняння адаптивної моделі ротора (11), разом з (26) утворюють таку систему:

$$\begin{aligned} p\hat{\Psi}_{r\alpha}^R &= -\frac{R_r}{L_r}\hat{\Psi}_{r\alpha}^R - \hat{\omega}\hat{\Psi}_{r\beta}^R + R_r k_r I_{s\alpha}; \\ p\hat{\Psi}_{r\beta}^R &= -\frac{R_r}{L_r}\hat{\Psi}_{r\beta}^R + \hat{\omega}\hat{\Psi}_{r\alpha}^R + R_r k_r I_{s\beta}; \\ p\hat{\omega} &= \lambda(\hat{\Psi}_{r\alpha}^R \hat{\Psi}_{r\beta}^S - \hat{\Psi}_{r\beta}^R \hat{\Psi}_{r\alpha}^S). \end{aligned} \quad (29)$$

Підсистема (28) описує незбурений рух, а підсистема (29) – збурений. Праві частини еталонної моделі (28) цілком вимірюються, тому її рівняння у відхиленнях вироджуються в нуль: $p\Delta\hat{\Psi}_{r\alpha}^S = p\Delta\hat{\Psi}_{r\beta}^S = 0$. Рівняння у відхиленнях адаптивної моделі (29):

$$\begin{aligned} p\Delta\hat{\Psi}_{r\alpha}^R &= -\frac{R_r}{L_r}\Delta\hat{\Psi}_{r\alpha}^R - \Delta\hat{\omega}\hat{\Psi}_{r\beta,\infty}^R - \Delta\hat{\Psi}_{r\beta}^R \hat{\omega}_\infty; \\ p\Delta\hat{\Psi}_{r\beta}^R &= -\frac{R_r}{L_r}\Delta\hat{\Psi}_{r\beta}^R + \Delta\hat{\omega}\hat{\Psi}_{r\alpha,\infty}^R + \Delta\hat{\Psi}_{r\alpha}^R \hat{\omega}_\infty; \\ p\Delta\hat{\omega} &= \lambda\hat{\Psi}_{r\beta}^S \Delta\hat{\Psi}_{r\alpha}^R - \lambda\hat{\Psi}_{r\alpha}^S \Delta\hat{\Psi}_{r\beta}^R, \end{aligned} \quad (30)$$

де $\hat{\Psi}_{r\alpha,\infty}^R$, $\hat{\Psi}_{r\beta,\infty}^R$, $\hat{\omega}_\infty$ – незбурені значення змінних.

Характеристичне рівняння системи (30) запишеться так

$$|A - pE| = \begin{vmatrix} -\frac{R_r}{L_r} - p & -\hat{\omega}_\infty & -\hat{\Psi}_{r\beta,\infty}^R \\ \hat{\omega}_\infty & -\frac{R_r}{L_r} - p & \hat{\Psi}_{r\alpha,\infty}^R \\ \lambda\hat{\Psi}_{r\beta}^S & -\lambda\hat{\Psi}_{r\alpha}^S & -p \end{vmatrix} = 0. \quad (31)$$

Після розкриття визначника характеристичне рівняння буде

$$\begin{aligned} p^3 + 2\frac{R_r}{L_r}p^2 + \left(\frac{R_r^2}{L_r^2} + \omega_\infty^2 + \lambda\hat{\Psi}_{r\alpha}^S \hat{\Psi}_{r\alpha,\infty}^R + \lambda\hat{\Psi}_{r\beta}^S \hat{\Psi}_{r\beta,\infty}^R \right) p + \left(\lambda\frac{R_r}{L_r} \hat{\Psi}_{r\alpha}^S \hat{\Psi}_{r\alpha,\infty}^R + \right. \\ \left. + \lambda\frac{R_r}{L_r} \hat{\Psi}_{r\beta}^S \hat{\Psi}_{r\beta,\infty}^R + \lambda\omega_\infty \hat{\Psi}_{r\beta}^S \hat{\Psi}_{r\alpha,\infty}^R - \lambda\omega_\infty \hat{\Psi}_{r\alpha}^S \hat{\Psi}_{r\beta,\infty}^R \right) = 0. \end{aligned} \quad (32)$$

У сталому режимі незбурені значення змінних збігаються з змінними еталонної моделі, тобто маємо рівності:

$$\omega_\infty = \omega, \quad \hat{\Psi}_{r\alpha,\infty}^R = \hat{\Psi}_{r\alpha}^S, \quad \hat{\Psi}_{r\beta,\infty}^R = \hat{\Psi}_{r\beta}^S. \quad (33)$$

З урахуванням (33) коефіцієнти характеристичного рівняння (32) такі:

$$\begin{aligned} a_0 &= 1; \quad a_1 = 2 \frac{R_r}{L_r}; \quad a_2 = \frac{R_r^2}{L_r^2} + \omega_\infty^2 + \lambda (\hat{\Psi}_{r\alpha}^S)^2 + \lambda (\hat{\Psi}_{r\beta}^S)^2 = \frac{R_r^2}{L_r^2} + \omega^2 + \lambda \Psi_r^2; \\ a_3 &= \lambda \frac{R_r}{L_r} \left((\hat{\Psi}_{r\alpha}^S)^2 + (\hat{\Psi}_{r\beta}^S)^2 \right) + \lambda \omega (\hat{\Psi}_{r\alpha}^S \hat{\Psi}_{r\beta}^S - \hat{\Psi}_{r\beta}^S \hat{\Psi}_{r\alpha}^S) = \lambda \frac{R_r}{L_r} \Psi_r^2. \end{aligned} \quad (34)$$

Модуль потокозчеплення ротора знаходиться за формулою:

$$\Psi_r = \frac{U_m}{\omega_0 (1 + L_{s\sigma} / L_m)}, \quad (35)$$

де U_m – амплітуда фазної напруги статора, В; ω_0 – кругова частота мережі, рад/с.

Одержали характеристичне рівняння спостерігача, коефіцієнти якого залежать від параметра інтегратора

$$p^3 + 2 \frac{R_r}{L_r} p^2 + \left(\frac{R_r^2}{L_r^2} + \omega^2 + \lambda \Psi_r^2 \right) p + \lambda \frac{R_r}{L_r} \Psi_r^2 = 0. \quad (36)$$

Вивчення коренів характеристичного рівняння (36) показало, що система рівнянь збуреного руху (30) стійка при виконанні умови $\lambda > 0$, що також впливає з вимоги позитивної визначеності функції Ляпунова (19). Аналіз показав, що при будь-яких значеннях параметра інтегратора $\lambda > 0$ рівняння (36) має один негативний дійсний корінь і два комплексно-сполучених корені з негативною дійсною частиною. Тоді перехідний процес збуреного руху відповідний рівнянню (36) буде представлений такою функцією часу:

$$\eta(t) = Ae^{-\alpha t} + (B \cos \beta t + C \sin \beta t) e^{-\gamma t}, \quad (37)$$

де α – абсолютне значення дійсного кореня; γ, β – абсолютні значення дійсної і уявної частин пари комплексно-сполучених коренів.

При початкових умовах $\eta(0) = \eta_0$, $\eta'(0) = \eta''(0) = 0$ постійні інтегрування:

$$A = \frac{(\gamma^2 + \beta^2) \eta_0}{(\gamma - \alpha)^2 + \beta^2}; \quad B = \frac{\alpha(\alpha - 2\gamma) \eta_0}{(\gamma - \alpha)^2 + \beta^2}; \quad C = \frac{\alpha(\beta^2 - \gamma^2 + \alpha\gamma) \eta_0}{\beta[(\gamma - \alpha)^2 + \beta^2]}. \quad (38)$$

У досліджуваному випадку виконуються умови $\beta \gg \alpha$, $\beta \gg \gamma$. Тому коефіцієнти B та C на два порядки менше коефіцієнта A і прямують при $\beta \rightarrow \infty$ до $A = \eta_0$, $B = C = 0$. Таким чином, тривалість загасання збурень визначається головним чином негативним дійсним коренем $(-\alpha)$.

З рівняння (36) випливає, що його коефіцієнти залежать від модуля вектора потокозчеплення ротора Ψ_r , кутової швидкості ротора ω в електричних рад/с і параметру λ . Стандартні закони частотного або векторного керування забезпечують рівність потокозчеплення ротора номінальному значенню, розрахованому за формулою (35). Тому досліджувалася залежність величини кореня $(-\alpha)$ від параметра λ при різних фіксованих значеннях швидкості ω . Графіки зазначеної залежності представлені на рис. 1. При $\lambda \rightarrow \infty$ дійсний корінь рівняння (36) асимптотично наближається до границі відношення $-a_3/a_2$, яке дорівнює $-R_r/L_r = -I/T_r$. Графіки побудовані для фіксованих значень швидкостей ротора рівних 10, 50, 100, 150 рад/с. Графік червоного кольору відповідає самій низькій

швидкості з перерахованих, а графік синього кольору – найвищій швидкості. Корінь $(-\alpha)$ досягає практично граничного значення і стає незалежним від швидкості при $\lambda > 2 \cdot 10^5$. Тому в системах частотного керування для якісного спостереження швидкості коефіцієнт підсилення інтегратора λ потрібно брати не менше вказаного значення.

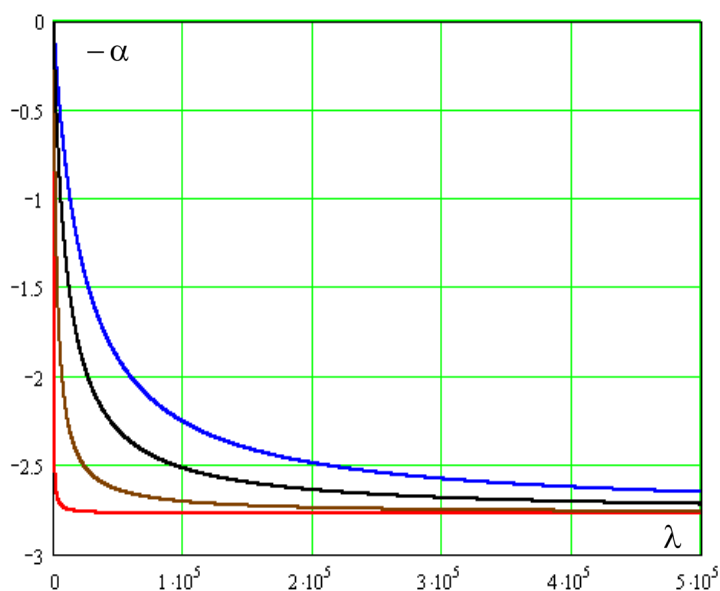


Рис. 1. Залежність дійсного кореня рівняння (36) від коефіцієнта підсилення інтегратора

Джерело: розроблено автором.

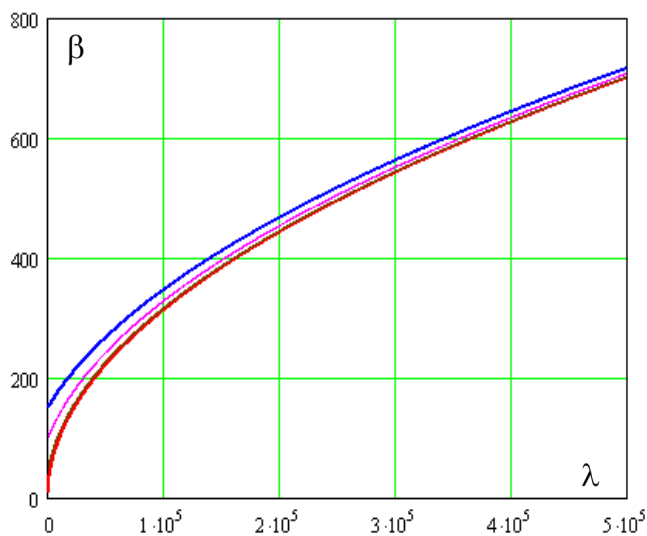


Рис. 2. Залежність уявної частини коренів рівняння (36) від коефіцієнта підсилення інтегратора

Джерело: розроблено автором.

На рис. 2 представлені графіки залежності уявної частини комплексно-сполучених коренів від параметра інтегратора при різних значеннях швидкості ротора. Близькість графіків один до одного вказує на те, що параметр β , а отже, частота коливальних складових процесу вгасання збуреного руху, не залежить від швидкості ротора. При цьому

параметр β монотонно зростає при збільшенні параметра інтегратора λ . Наявність комплексно-сполучених коренів і велика величина їх уявної частини пояснює, чому процес спостереження швидкості при наявності тільки інтегральної складової супроводжується малими високочастотними коливаннями оцінки швидкості ротора близько її справжнього значення. Тому в реальних спостерігачах швидкості не обмежуються тільки інтегральною складовою регулятора λ , а вводять у його склад ще пропорційну складову.

Якщо використовувати ПІ-регулятор у складі спостерігача швидкості, то в системі рівнянь (29) зміниться останнє рівняння і система набуде вигляду:

$$\begin{aligned} p\hat{\Psi}_{r\alpha}^R &= -\frac{R_r}{L_r}\hat{\Psi}_{r\alpha}^R - \hat{\omega}\hat{\Psi}_{r\beta}^R + R_r k_r I_{s\alpha}; \\ p\hat{\Psi}_{r\beta}^R &= -\frac{R_r}{L_r}\hat{\Psi}_{r\beta}^R + \hat{\omega}\hat{\Psi}_{r\alpha}^R + R_r k_r I_{s\beta}; \\ p\hat{\omega} &= \tau p(\hat{\Psi}_{r\alpha}^R \hat{\Psi}_{r\beta}^S - \hat{\Psi}_{r\beta}^R \hat{\Psi}_{r\alpha}^S) + \lambda(\hat{\Psi}_{r\alpha}^R \hat{\Psi}_{r\beta}^S - \hat{\Psi}_{r\beta}^R \hat{\Psi}_{r\alpha}^S), \end{aligned} \quad (39)$$

де τ – коефіцієнт підсилення пропорційної складової ПІ-регулятора векторного добутку векторів $\vec{\Psi}_r^S$ та $\vec{\Psi}_r^R$.

Розглянемо похідну від векторного добутку векторів за умови, що модуль вектора потокозчеплення ротора не змінюється

$$p(\hat{\Psi}_{r\alpha}^R \hat{\Psi}_{r\beta}^S - \hat{\Psi}_{r\beta}^R \hat{\Psi}_{r\alpha}^S) = p[\vec{\Psi}_r^R \times \vec{\Psi}_r^S] = p(|\vec{\Psi}_r^R| \cdot |\vec{\Psi}_r^S| \sin \varphi) = |\vec{\Psi}_r^R| \cdot |\vec{\Psi}_r^S| \cos \varphi = \vec{\Psi}_r^R \cdot \vec{\Psi}_r^S. \quad (40)$$

При прийнятих допущеннях одержали, що похідна від векторного добутку векторів дорівнює скалярному добутку цих векторів. Через проекції векторів скалярний добуток записується так

$$\vec{\Psi}_r^R \cdot \vec{\Psi}_r^S = \hat{\Psi}_{r\alpha}^R \hat{\Psi}_{r\alpha}^S + \hat{\Psi}_{r\beta}^R \hat{\Psi}_{r\beta}^S. \quad (41)$$

Тоді останнє рівняння системи (39) набуде вигляду:

$$p\hat{\omega} = \tau(\hat{\Psi}_{r\alpha}^R \hat{\Psi}_{r\alpha}^S + \hat{\Psi}_{r\beta}^R \hat{\Psi}_{r\beta}^S) + \lambda(\hat{\Psi}_{r\alpha}^R \hat{\Psi}_{r\beta}^S - \hat{\Psi}_{r\beta}^R \hat{\Psi}_{r\alpha}^S), \quad (42)$$

яке у відхиленнях запишеться в такий спосіб

$$\begin{aligned} p\Delta\hat{\omega} &= \tau\hat{\Psi}_{r\alpha}^S \Delta\hat{\Psi}_{r\alpha}^R + \tau\hat{\Psi}_{r\beta}^S \Delta\hat{\Psi}_{r\beta}^R + \lambda\hat{\Psi}_{r\beta}^S \Delta\hat{\Psi}_{r\alpha}^R - \lambda\hat{\Psi}_{r\alpha}^S \Delta\hat{\Psi}_{r\beta}^R = \\ &= (\tau\hat{\Psi}_{r\alpha}^S + \lambda\hat{\Psi}_{r\beta}^S) \Delta\hat{\Psi}_{r\alpha}^R + (\tau\hat{\Psi}_{r\beta}^S - \lambda\hat{\Psi}_{r\alpha}^S) \Delta\hat{\Psi}_{r\beta}^R. \end{aligned} \quad (43)$$

Система рівнянь збуреного руху спостерігача (30) доповниться доданками в останньому рівнянні й запишеться так:

$$\begin{aligned} p\Delta\hat{\Psi}_{r\alpha}^R &= -\frac{R_r}{L_r}\Delta\hat{\Psi}_{r\alpha}^R - \Delta\hat{\omega}\hat{\Psi}_{r\beta,\infty}^R - \Delta\hat{\Psi}_{r\beta}^R \hat{\omega}_\infty; \\ p\Delta\hat{\Psi}_{r\beta}^R &= -\frac{R_r}{L_r}\Delta\hat{\Psi}_{r\beta}^R + \Delta\hat{\omega}\hat{\Psi}_{r\alpha,\infty}^R + \Delta\hat{\Psi}_{r\alpha}^R \hat{\omega}_\infty; \\ p\Delta\hat{\omega} &= (\tau\hat{\Psi}_{r\alpha}^S + \lambda\hat{\Psi}_{r\beta}^S) \Delta\hat{\Psi}_{r\alpha}^R + (\tau\hat{\Psi}_{r\beta}^S - \lambda\hat{\Psi}_{r\alpha}^S) \Delta\hat{\Psi}_{r\beta}^R. \end{aligned} \quad (44)$$

Характеристичне рівняння системи (44) наступне

$$|A - pE| = \begin{vmatrix} -\frac{R_r}{L_r} - p & -\hat{\omega}_\infty & -\hat{\Psi}_{r\beta,\infty}^R \\ \hat{\omega}_\infty & -\frac{R_r}{L_r} - p & \hat{\Psi}_{r\alpha,\infty}^R \\ \tau\hat{\Psi}_{r\alpha}^S + \lambda\hat{\Psi}_{r\beta}^S & \tau\hat{\Psi}_{r\beta}^S - \lambda\hat{\Psi}_{r\alpha}^S & -p \end{vmatrix} = 0. \quad (45)$$

Якщо прийняти умови сталого режиму роботи (33), то характеристичний поліном перетворимо в такий спосіб

$$\begin{aligned} p^3 + 2\frac{R_r}{L_r}p^2 + \frac{R_r^2}{L_r^2}p + \tau\omega(\hat{\Psi}_{r\alpha}^S)^2 + \lambda\omega\Psi_{r\alpha}^S\Psi_{r\beta}^S + \tau\omega(\Psi_{r\beta}^S)^2 - \lambda\omega\Psi_{r\alpha}^S\Psi_{r\beta}^S + \\ + (\tau\hat{\Psi}_{r\alpha}^S + \lambda\hat{\Psi}_{r\beta}^S)\left(\frac{R_r}{L_r}\hat{\Psi}_{r\beta}^S + p\hat{\Psi}_{r\beta}^S\right) + \omega^2p - (\tau\hat{\Psi}_{r\beta}^S - \lambda\hat{\Psi}_{r\alpha}^S)\left(\frac{R_r}{L_r}\hat{\Psi}_{r\alpha}^S + p\hat{\Psi}_{r\alpha}^S\right) = \\ = p^3 + 2\frac{R_r}{L_r}p^2 + \frac{R_r^2}{L_r^2}p + \omega^2p + \tau\omega\Psi_r^2 + \tau\frac{R_r}{L_r}\Psi_{r\alpha}^S\Psi_{r\beta}^S + p\tau\Psi_{r\alpha}^S\Psi_{r\beta}^S + \lambda\frac{R_r}{L_r}(\Psi_{r\beta}^S)^2 + \\ + p\lambda(\Psi_{r\beta}^S)^2 - \tau\frac{R_r}{L_r}\Psi_{r\alpha}^S\Psi_{r\beta}^S - p\tau\Psi_{r\alpha}^S\Psi_{r\beta}^S + \lambda\frac{R_r}{L_r}(\Psi_{r\alpha}^S)^2 + p\lambda(\Psi_{r\alpha}^S)^2 = \\ = p^3 + 2\frac{R_r}{L_r}p^2 + \left(\frac{R_r^2}{L_r^2} + \omega^2 + \lambda\Psi_r^2\right)p + \left(\lambda\frac{R_r}{L_r}\Psi_r^2 + \tau\omega\Psi_r^2\right). \end{aligned} \quad (46)$$

У підсумку одержали характеристичне рівняння:

$$p^3 + 2\frac{R_r}{L_r}p^2 + \left(\frac{R_r^2}{L_r^2} + \omega^2 + \lambda\Psi_r^2\right)p + \left(\lambda\frac{R_r}{L_r}\Psi_r^2 + \tau\omega\Psi_r^2\right) = 0, \quad (47)$$

коефіцієнти якого залежать від параметрів λ і τ ПІ-регулятора у складі досліджуваного спостерігача швидкості.

Якщо зафіксувати значення швидкості, то для системи з характеристичним рівнянням (47) можна побудувати в площині параметрів λ і τ границю області стійкості. На рис. 3 представлені лінії границі стійкості спостерігача для трьох значень швидкості ротора АМ. Представлена область (λ, τ) розбивалася рівномірною сіткою, у вузлах якої знаходилися корені рівняння (47). Вузли сітки перевірялися по вертикальних напрямках і при перетинанні границі області стійкості дійсна частина хоча б одного кореня рівняння (47) ставала позитивною. Тоді попередня точка приймалася за точку границі стійкості. Границі будувалися для швидкостей 150, 100, 50 рад/с, вийшли практично лінійними і чим менше швидкість, тим границя проходить вище. Тому для забезпечення стійкості у всьому діапазоні регулювання швидкості значення параметрів λ і τ потрібно брати відповідно точкам, які лежать нижче червоної лінії побудованої для найбільшої (номінальної) швидкості. Якщо взяти тільки інтегральну складову, то чим більше λ , тим швидше оцінка швидкості $\hat{\omega}$ сходиться до її реального значення ω . Однак у замкнутих системах регулювання при замиканні негативного зворотного зв'язку за оцінкою швидкості $\hat{\omega}$ відбуваються незначні високочастотні автоколивання оцінки $\hat{\omega}$ близько оцінюваного значення ω . Введення до складу регулятора пропорційної складової τ дозволяє забрати зазначені автоколивання. При цьому, чим більше λ , тим більше значення τ потрібно, щоб

вивести спостерігач зі стійкого стану. Графіки на рис. 3 дозволяють оцінити числові значення коефіцієнтів ПІ-регулятора у складі спостерігача швидкості. З розгляду області нижче червоної лінії випливає, що для якісного оцінювання швидкості параметр τ потрібно брати приблизно у 100 разів менше відповідного параметра λ . Наприклад при $\lambda = 5 \cdot 10^5$ буде $\tau = 5 \cdot 10^3$, а для $\lambda = 2 \cdot 10^5$ доцільно взяти $\tau = 2 \cdot 10^3$.

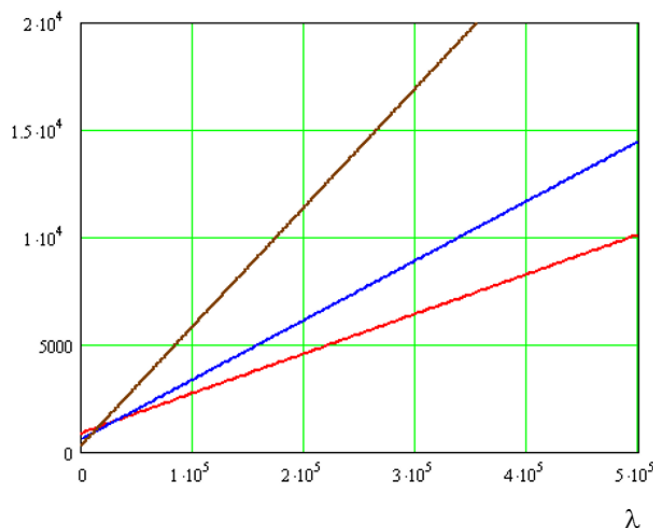


Рис. 3. Границі стійкості в області параметрів ПІ-регулятора для різних значень швидкостей ротора

Джерело: розроблено автором.

В операторному вигляді закон адаптації буде таким

$$\hat{\omega} = \left(\tau + \frac{\lambda}{p} \right) \left(\hat{\Psi}_{r\alpha}^R \hat{\Psi}_{r\beta}^S - \hat{\Psi}_{r\beta}^R \hat{\Psi}_{r\alpha}^S \right). \quad (48)$$

Рівняння (28), (29), (48) після об'єднання в систему утворюють математичну модель спостерігача швидкості, заснованого на векторі потокозчеплення ротора. Структурна схема спостерігача швидкості представлена на рис. 4. Регулюючий адаптер являє собою пропорційно-інтегруючу ланку, на вхід якого подається величина векторного добутку векторів потокозчеплення ротора $\hat{\Psi}_r^R$ і $\hat{\Psi}_r^S$, визначені з моделей ротора (11) і статора (10) відповідно. Геометрично величина векторного добутку двох векторів дорівнює подвоєній площі трикутника між ними. Регулятор (48) підтримує цю площу рівною нулю і тим самим регулятор сполучає вектор потокозчеплення моделі ротора з вектором потокозчеплення моделі статора. Виходом структурної схеми є оцінка швидкості ротора $\hat{\omega}$ в електричних рад/с, що зв'язана з оцінкою реальної швидкості за формулою $\hat{\omega} = N\hat{\omega}_r$, де N – число пар полюсів АМ.

Динаміка синтезованого спостерігача швидкості досліджувалася в системі асинхронного ЕП з частотним скалярним керуванням і ПІД-регулятором швидкості. За основу розрахунку бралися параметри АМ типу 4A132M4У3 з такими паспортними даними: $P_n = 11 \text{ кВт}$, $U_n = 380 \text{ В}$, $n_c = 1500 \text{ об/хв}$. На основі проведених досліджень у середовищі Matlab Simulink розроблена математична модель електропривода з частотним керуванням, у складі якого тільки контур регулювання швидкості, а в колі зворотного зв'язку включений спостерігач швидкості, з виходу якого оцінка швидкості ротора подається на вхід її регулятора. Реалізовано закон частотного керування $U/f = \text{const}$ у всіх режимах

роботи ЕП: пуск до швидкості 140 рад/с без навантаження, потім накид і зняття навантаження і гальмування до зниженої швидкості 50 рад/с. Перехідний процес регулювання швидкості показаний на рис. 5. Тут, крім швидкості ротора, також представлені графіки її оцінки, електромагнітний момент, векторний добуток векторів-оцінок вектора потокозчеплення ротора, модуль вектора потокозчеплення ротора і напруга фази А статора.

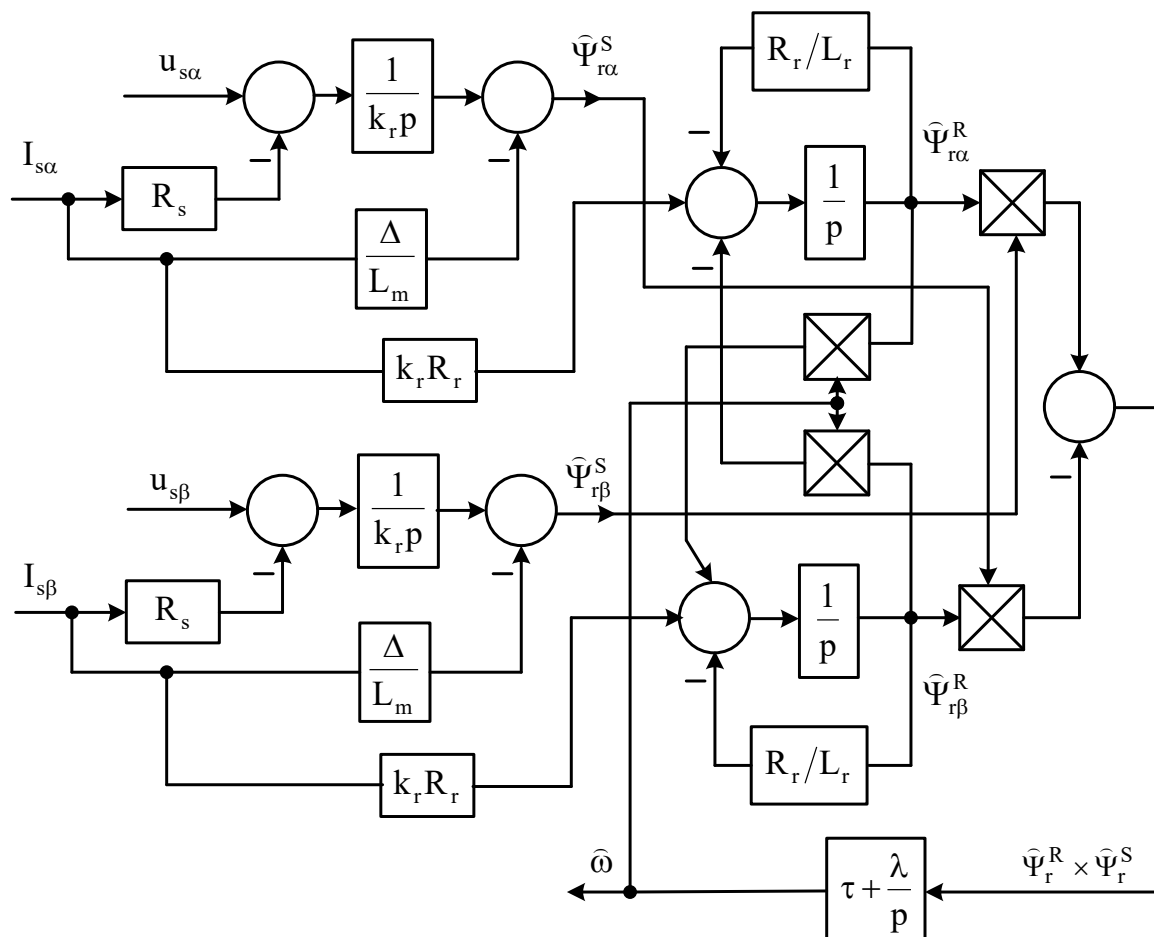


Рис. 4. Структурна схема спостерігача швидкості

Джерело: розроблено автором.

Пуск АМ і наростання магнітного потоку відбуваються одночасно. Після того, як збудження АМ завершилося, у всіх наступних перехідних режимах модуль вектора потокозчеплення ротора Ψ_r змінюється незначно біля свого номінального значення. Параметри ПІ-регулятора в складі спостерігача прийняті, виходячи з аналізу стійкості, проведеного вище, і дорівнюють: $\lambda = 2 \cdot 10^5$, $\tau = 2 \cdot 10^3$. Оцінка швидкості ротора $\hat{\omega}_r$ (графік червоного кольору), що обчислюється спостерігачем, практично збігається з фактичною швидкістю ω_r (графік синього кольору). Для розрізнення цих графіків у збільшеному масштабі представлена коротка ділянка закінчення перехідного процесу частотного пуску при виході швидкості на рівень завдання. Векторний добуток $\hat{\Psi}_r^R \times \hat{\Psi}_r^S$ дорівнює нулю в сталих режимах роботи ЕП, що вказує на рівність оцінки швидкості ротора $\hat{\omega}_r$ та її реального значення ω_r . У перехідних режимах і при дії збурень векторний добуток $\hat{\Psi}_r^R \times \hat{\Psi}_r^S$ відхиляється від нуля через те, що спостерігачу притамана деяка інерційність і оцінка швидкості $\hat{\omega}_r$ в динаміці незначно відстає від фізичної швидкості ротора ω_r .

Інтегральна складова з коефіцієнтом λ виводить у статиці векторний добуток $\hat{\Psi}_r^R \times \hat{\Psi}_r^S$ у нуль за рахунок того, що забезпечує рівність $\hat{\omega}_r = \omega_r$. Якщо брати інші значення параметрів λ та τ з області, що лежить нижче червоного графіка рис. 3, то показники якості перехідних процесів істотно не змінюються в порівнянні з тими, що показані на рис. 5.

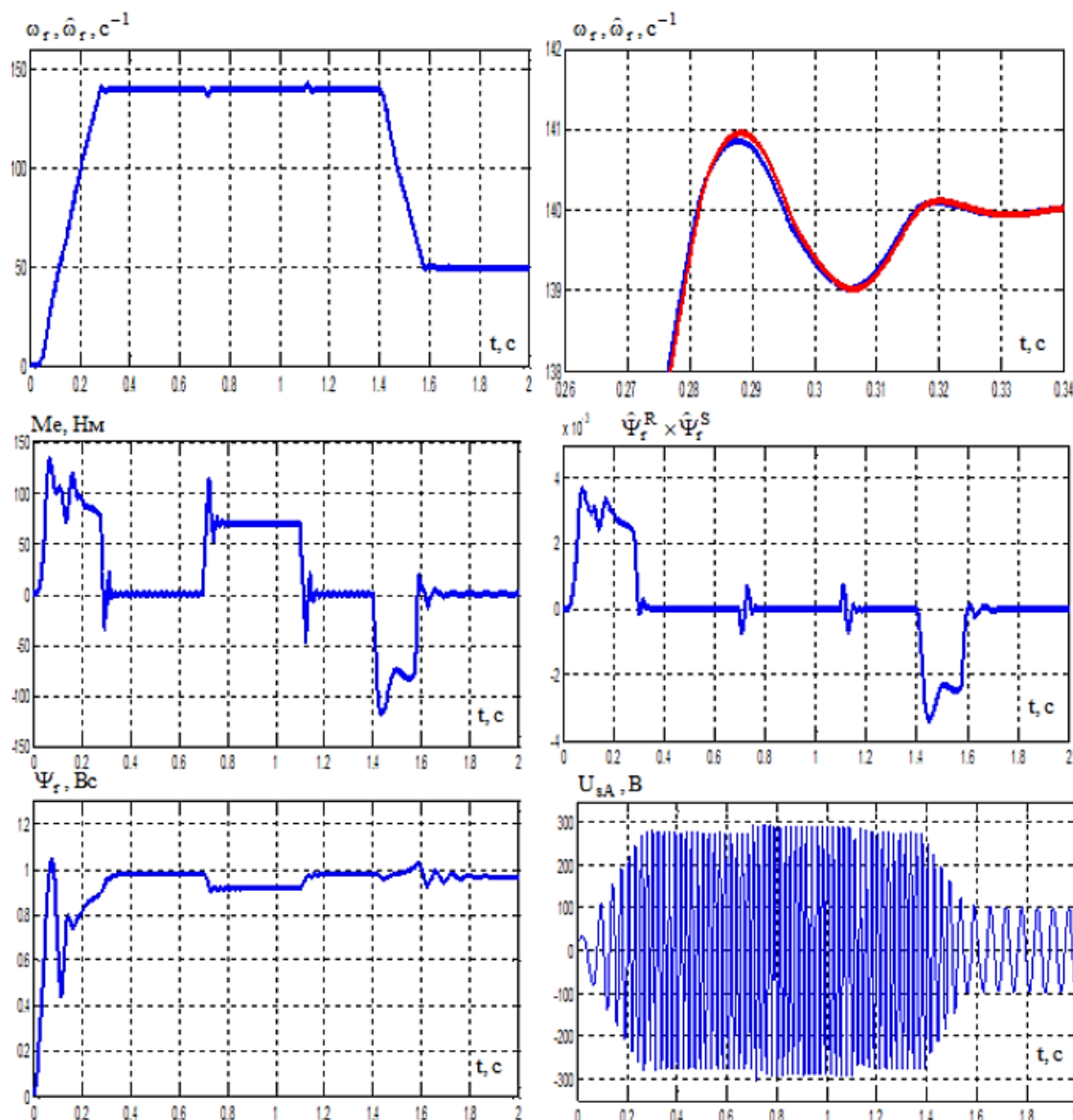


Рис. 5. Графіки перехідних процесів в асинхронному електроприводі при частотному керуванні зі спостерігачем швидкості

Джерело: розроблено автором.

Висновки. У статті в класі систем з еталонною моделлю на підставі другої теореми Ляпунова про стійкість руху здійснений структурний синтез спостерігача швидкості, що як функцію адаптації використовує векторний добуток оцінок вектора потокозчеплення ротора, отриманих з еталонної моделі статора й адаптивної моделі ротора. Запропоновано підхід до визначення параметрів ПІ-регулятора у складі спостерігача швидкості, що спирається на першу теорему Ляпунова про стійкість руху: нелінійні рівняння спостерігача лінеаризуються й отримані класичною методикою області стійкості системи рівнянь першого наближення узагальнюються на вихідну нелінійну систему рівнянь спостері-

гача. З процедури структурного синтезу не впливає необхідності застосовувати пропорційну складову ПІ-регулятора спостерігача швидкості. Однак зазначеним способом доведено, що пропорційна складова підвищує швидкодію спостерігача і визначені її граничні значення за умовою його асимптотичної стійкості. Висока якість ідентифікації швидкості ротора АМ запропонованим спостерігачем зі знайденою структурою і значеннями параметрів, що рекомендуються з визначеного діапазону, підтверджено методом математичного моделювання замкнутого за швидкістю асинхронного ЕП з частотним керуванням і синтезованим спостерігачем у колі зворотного зв'язку.

Список використаних джерел

1. *Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи*. (2005). Либідь.
2. Klyuyev, O., & Sadovoy, A. (2021). Kinetics of excitation of a magnetic field in asynchronous valve cascade. *Collection of Scholarly Papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, 2(37), 34–42. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.37.2020.7>.
3. Hau Huu Vo, Pavel Brandstetter, Chau Si Thien Dong. (2015). MRAS observers for speed estimation of induction motor with direct torque and flux control. *AETA 2015: Recent advances in electrical engineering and related sciences*, 325–335. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-27247-4_29.
4. Accetta, A., Cirrincione, M., Pucci, M., & Vitale, G. (2011). MRAS speed observer for high performance linear induction motor drives based on linear neural networks. *У 2011 IEEE energy conversion congress and exposition (ECCE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ecce.2011.6063997>.
5. El Merrassi, W., Abounada, A., & Ramzi, M. (2021). Advanced speed sensorless control strategy for induction machine based on neuro-MRAS observer. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7615–7621. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.081>.
6. Comanescu, M., & Xu, L. (2006). Sliding-mode MRAS speed estimators for sensorless vector control of induction Machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(1), 146–153. <https://doi.org/10.1109/tie.2005.862303>.
7. Zorgani, Y. A., Koubaa, Y., & Boussak, M. (2016). MRAS state estimator for speed sensorless ISFOC induction motor drives with Luenberger load torque estimation. *ISA Transactions*, 61, 308–317. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2015.12.015>.
8. Mini, R. & Backer, P., & Satheesh, Hariram & Dinesh, M.N. (2015). MRAS speed observer for low speed estimation in sensorless DTC-SVM induction motor drives. 10. 37751–37757.
9. Shareef Sheik, M., & Balaji, K. (2020). Comparison of artificial controller based MRAS speed observer for field oriented control of induction motor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 925, 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/925/1/012019>.
10. Gadoue, S. M., Giaouris, D., & Finch, J. W. (2008). A neural network based stator current MRAS observer for speed sensorless induction motor drives. *У 2008 IEEE international symposium on industrial electronics (ISIE 2008)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/isie.2008.4677079>.
11. Fan, B., Fu, Z., Liu, L., & Fu, J. (2019). The full-order state observer speed-sensorless vector control based on parameters identification for induction motor. *Measurement and Control*, 52(3–4), 202–211. <https://doi.org/10.1177/0020294019827341>.
12. Klyuyev, O., Sadovoi, A., & Sokhina, Y. (2022). Observer of speed and flux linkage in the system of vector control of asynchronous electric drive. *Collection of Scholarly Papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, 2(41), 89–97. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.41.2022.10>.

References

1. Popovych, M.H., Lozynskyi, O.Yu., & Klepikov, V.B. (2005) Elektromekhanichni systemy avtomatychnoho keruvannya ta elektropyvody [Electromechanical automatic control systems and electric drives]. Lybid.
2. Klyuyev, O., & Sadovoy, A. (2021). Kinetics of excitation of a magnetic field in asynchronous valve cascade. *Collection of Scholarly Papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, 2(37), 34–42. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.37.2020.7>.
3. Hau Huu Vo, Pavel Brandstetter, Chau Si Thien Dong. (2015). MRAS observers for speed estimation of induction motor with direct torque and flux control. *AETA 2015: Recent advances in electrical engineering and related sciences*, 325–335. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-27247-4_29.
4. Accetta, A., Cirrincione, M., Pucci, M., & Vitale, G. (2011). MRAS speed observer for high performance linear induction motor drives based on linear neural networks. *У 2011 IEEE energy conversion congress and exposition (ECCE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ecce.2011.6063997>.

5. El Merrassi, W., Abounada, A., & Ramzi, M. (2021). Advanced speed sensorless control strategy for induction machine based on neuro-MRAS observer. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7615–7621. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.081>.
6. Comanescu, M., & Xu, L. (2006). Sliding-mode MRAS speed estimators for sensorless vector control of induction Machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(1), 146–153. <https://doi.org/10.1109/tie.2005.862303>.
7. Zorgani, Y. A., Koubaa, Y., & Boussak, M. (2016). MRAS state estimator for speed sensorless ISFOC induction motor drives with Luenberger load torque estimation. *ISA Transactions*, 61, 308–317. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2015.12.015>.
8. Mini, R. & Backer, P., & Satheesh, Hariram & Dinesh, M.N. (2015). MRAS speed observer for low speed estimation in sensorless DTC-SVM induction motor drives. 10. 37751-37757.
9. Shareef Sheik, M., & Balaji, K. (2020). Comparison of artificial controller based MRAS speed observer for field oriented control of induction motor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 925, 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/925/1/012019>.
10. Gadoue, S. M., Giaouris, D., & Finch, J. W. (2008). A neural network based stator current MRAS observer for speed sensorless induction motor drives. *Y 2008 IEEE international symposium on industrial electronics (ISIE 2008)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/isie.2008.4677079>.
11. Fan, B., Fu, Z., Liu, L., & Fu, J. (2019). The full-order state observer speed-sensorless vector control based on parameters identification for induction motor. *Measurement and Control*, 52(3-4), 202–211. <https://doi.org/10.1177/0020294019827341>.
12. Klyuyev, O., Sadovoi, A., & Sokhina, Y. (2022). Observer of speed and flux linkage in the system of vector control of asynchronous electric drive. *Collection of Scholarly Papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, 2(41), 89–97. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.41.2022.10>.

Отримано 28.05.2025

UDC 62-523:681.513.66

Oleh Kliuiev

PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrotechnic and Electromechanics
Dnipro State Technical University (Kamianske, Ukraine)

E-mail: kluev2006@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4542-3317>. Scopus Author ID: [57217113986](https://orcid.org/57217113986)

SPEED OBSERVER OF AN INDUCTION MACHINE BASED ON THE ROTOR FLUX LINKAGE VECTOR

Currently it is promising to create closed-loop asynchronous electric drives with frequency speed control without a physical speed sensor on the AM shaft and instead use a speed observer. These sensorless electric drive systems have lower cost and dimensions and are more reliable if under operating conditions installing a speed sensor on the AM shaft is difficult or impossible. Well-known speed observers are synthesized as adaptive systems with a reference model (Model Reference Adaptive System – MRAS). These speed observers are most often used to form the adaptation function of the rotor flux linkage vector and estimation is obtained from the reference stator model and the adaptive rotor model. The observer structure is determined using a technique that uses the second Lyapunov theorem on the motion stability. At the same time, the problem of parametric synthesis, which consists in determining coefficients of the PI controller as part of the speed observer, is not even posed and solved in the literary sources known to the author. Therefore, the aim of the article was to propose a method for determining limits of the ranges of possible values of the controller coefficients. The criterion for selecting the controller parameters is the asymptotic stability of the observer. To determine stability of the observer the method of the first Lyapunov theorem on the motion stability was used. The original system of nonlinear equations of the observer was linearized. Then, to construct boundaries of the stability region in the plane of two gain coefficients of the PI controller, roots of the characteristic equation of the linearized system were found in the nodes of the grid of the parameter plane. The need to use not only the integral but also the proportional component of the controller was justified, numerical values of these parameters and their relationship at different values of the rotor speed were determined.

Keywords: asynchronous machine; system with reference model; speed observer; adaptation function; characteristic equation; asymptotic stability.

Fig.: 5. References: 12.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-400-410](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-400-410)

УДК 621.791.927:004.942

Володимир Георгійович Соловійов¹, Ірина Юрївна Романова²¹кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу імпульсних процесів і технологій дугового зварювання
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ, Україна)E-mail: hsova@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1454-7520>, Scopus Autor ID: 58740647500²кандидат технічних наук, заступник завідувача відділу імпульсних процесів і технологій дугового зварювання
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ, Україна)E-mail: romanova@paton.kiev.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7154-1830>, Scopus Autor ID: 57222474743

ПРИЧИНИ ДЕСТАБІЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ У СТАЦІОНАРНОМУ СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

Розглянуто процес електрошлакового наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі стаціонарного типу зі схемою під'єднання до джерела живлення, при якій клема живлення струмопідвідної секції кристалізатора з'єднана з клемою піддону. Таке під'єднання кристалізатора до джерела живлення забезпечує високу продуктивність процесу наплавлення. Однак навіть за підтримки постійної швидкості подачі електрода у шлакову ванну спостерігаються значні коливання струму електрода. Амплітуда цих коливань досягає майже 50 % максимального значення струму з періодичністю 10–25 с. Це свідчить про суттєві коливання температури шлакової ванни у процесі наплавлення. Такі коливання можуть призвести до небажаних змін фізико-механічних і структурних властивостей наплавленого металу. Проаналізовано причини виникнення подібних коливань. Наводяться способи їх зменшення та підвищення стабільності процесу наплавлення.

Ключові слова: стаціонарний струмопідвідний кристалізатор; механізм саморегулювання; мультифізичне моделювання; електрошлакове наплавлення; стабілізація електрошлакового процесу.

Рис.: 7. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. Електрошлакове наплавлення (ЕШН) залишається актуальною технологією для відновлення та зміцнення металевих деталей, особливо з використанням струмопідвідних кристалізаторів (СПК). Його значення обумовлене потребами промисловості у підвищенні експлуатаційних характеристик обладнання та зниженні витрат на ремонт. Незважаючи на обмеження (висока енергоємність, складність підготовки), ЕШН у СПК залишається ключовим методом для машинобудування та металургії через унікальну комбінацію продуктивності, якості та вартісної ефективності. Використання СПК дозволяє керувати структурою металу за рахунок регулювання електромагнітних процесів у шлаковій ванні; розширює технологічні можливості, наприклад, наплавлення шару завтовшки до десятків сантиметрів за один прохід, виробництва біметалевих труб з корозійностійким покриттям, наплавлення прокатних валків та штампів тощо.

Постановка проблеми. Процес ЕШН у стаціонарному СПК вимагає стабільності для забезпечення високої якості наплавленого металу. Стабільність даного процесу визначається рівновагою ключових параметрів: температурою шлакової ванни, швидкістю подачі електрода та силою струму. Однак на практиці величини цих параметрів часто коливаються через теплову інерцію системи або нестабільність джерела живлення. Такі відхилення призводять до неоднорідності структури металу, зниження твердості та утворення мікротріщин. Саме тому виявлення причин дестабілізації та розробка алгоритмів їх компенсації (наприклад, за допомогою адаптивних систем управління) є критично важливими для масового застосування технології у машинобудуванні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [1] розглянуто процес стабілізації температури шлакової ванни (ШВ) за незмінної форми міжелектродного простору, а також питання стабілізації у випадках швидкої та повільної зміни цього простору. Аналізу стабільності роботи кристалізатора присвячено низку робіт, у яких використовуються математичні моделі [2–8]. Наприклад, у [2] наведено тривимірну модель для дослідження профілю та глибини занурення витратного електрода в нестабільних умовах. Електрод змінював форму від плоскодонного до конусоподібного. Глибина його занурення спочатку дещо збільшувалася, а потім постійно зменшувалася через нестійке співвідношення

між швидкостями плавлення та опускання. У [3] шляхом розв'язання математичної моделі отримано розподіл температурного поля та встановлено зв'язок між часом локального затвердіння та міждендритною відстанню в процесі затвердіння зливка. Цей зв'язок розглядається як критерій оцінки якості кристалізації. Модель пропонується використовувати для прогнозування стабільності переплаву та якості зливків. У [4] проведено моделювання безперервного зростання зливка при електрошлаковому перепаві (ЕШП). Зокрема, для верифікації моделі досліджувалися глибина та форма ванни розплаву. Таким чином, запропоновано спосіб аналізу впливу робочих параметрів на перебіг процесу. У [5] показано, що загальний джоулевий нагрів шлаку зростає зі збільшенням його кількості, тоді як середня густина цього нагріву знижується. Менша глибина занурення електрода є кращим вибором для процесу ЕШП, оскільки забезпечує більшу стабільність процесу. У [6] результати моделювання демонструють, що електричний струм тече до бічної стінки кристалізатора, особливо в шарі шлаку. Розподіл джоулевого тепла навколо краплі металу динамічно змінюється в процесі її падіння. Найгарячіша область формується під зовнішнім радіусом кінчика електрода, поруч із границею розділу шлак/метал, а не на самому кінчику електрода. У [7] було оптимізовано швидкість плавлення та показано, що 98 кг/год є відповідною швидкістю плавлення для процесу безперервного спрямованого затвердіння ЕШП з формою діаметром 160 мм. У [8] розглянуто різні техніки та технології наплавлення. Електричний режим наплавлення обирався з урахуванням отримання стабільного електрошлакового процесу. Автори [9] досліджували вплив струмопідводу в СПК на електромагнітні процеси у кристалізаторі для електрошлакового наплавлення металу шляхом математичного моделювання обертання шлакової ванни. Показано, що переміщення по азимуту верхньої клеми кристалізатора, яка приєднана до струмопідвідної секції, відносно її вертикального розрізу суттєво впливає на електромагнітні сили у шлаковій ванні, але не змінює потужність тепловиділення в системі.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У згаданих вище роботах, крім [8, 9], проблеми стабілізації процесу розглядалися переважно для кристалізаторів канонічного типу. Однак для СПК найважливішим дестабілізуючим фактором є зміна міжелектродних відстаней, що не враховувалось в більшості досліджень. Ця зміна виникає при збільшенні висоти наплавленого шару металу та наближенні рівня металевої ванни до графітового футерування струмопідвідної секції кристалізатора (СПСК). На відміну від попередніх робіт, наше дослідження зосереджено на аналізі саме цього аспекту, що дозволяє точніше визначити причини нестабільності та розробити ефективні методи їх усунення для стаціонарних струмопідвідних кристалізаторів. Дана робота є продовженням раніше розпочатих досліджень торцевого ЕШН електродом великого перерізу в струмопідвідному кристалізаторі. У [10] розглядалися та порівнювалися різні технічні рішення з погляду простоти їх реалізації та забезпечення стабільності якості наплавлення. Змінний струм для наплавлення обрано як найпоширеніший при електрошлакових технологіях [11; 12].

Метою дослідження є визначення причин нестабільності плавлення електрода в СПК і розробка шляхів їх усунення.

Виклад основного матеріалу. Для експериментального дослідження процесу ЕШН було розроблено схему підключення джерела живлення до стаціонарного струмопровідного кристалізатора (рис. 1). Схема під'єднання до джерела живлення типу «Е» (із загальним електродом) передбачає з'єднання клеми живлення струмопідвідної секції кристалізатора з клемою піддона. Сигнали у вигляді напруги, пропорційної струмам у колах джерел, знімалися за допомогою вимірювальних струмових шунтів R1 та R2. Напруга на електроді U_e та сигнали струмів СПСК ($I_{\text{спск}}$) і піддону (I_n) вводилися через «Блок узгодження сигналів», що виконує роль захисту від перевантажень і фільтра високочастотних завад, в АЦП з частотою дискретизації 1 кГц і потім передавалися для обробки в комп'ютер.

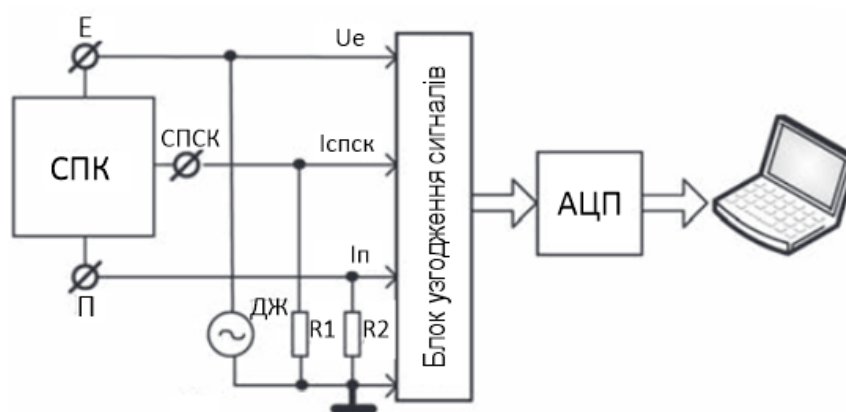


Рис. 1. Схема підключення джерела живлення до стаціонарного струмопровідного кристалізатора

За допомогою програмного забезпечення PowerGraph розраховувалися ефективні (діючі) значення входних сигналів змінного струму, які зберігалися в пам'яті комп'ютера. Струм джерела живлення ($I_{дж}$) обчислювався в комп'ютері шляхом підсумовування струмів СПСК і піддону.

На рис. 2 наведено фрагмент осцилографічного запису зміни струмів та напруги кристалізатора, отриманих у результаті експерименту. Виконувалось наплавлення заготовки з «рідким» стартом із використанням джерела змінного струму ТШП-10 на другому ступені регулювання напруги. Діаметр СПК становить 180 мм, діаметр електрода – 90 мм. Тривалість наплавлення – 550 с при швидкості подачі електрода 22 мм/хв, що забезпечувало продуктивність 132 кг/год. Середня провідність кристалізатора в першій половині процесу наплавлення становила 33 См, а в другій – 31 См. Середня провідність каналу «електрод – СПСК» у першій половині процесу дорівнювала 27 См, а в другій половині – 24 См. Середня провідність каналу «електрод – піддон» становила 5 См.

Експеримент складався з двох частин. Перша частина тривала 6,17 хв, при цьому швидкість подачі електрода становила 26 мм/хв, а продуктивність – 155 кг/год. Друга частина тривала 3 хв, швидкість подачі електрода в цьому випадку становила 14 мм/хв, а продуктивність наплавлення – 84 кг/год. На осцилограмах (рис. 2) чітко видно значні періодичні коливання струму джерела живлення, а також напруги на електроді. Процес наплавлення був нестабільним практично з самого початку. Він супроводжувався коливаннями загального струму з частотою 0,01...0,04 Гц. При цьому режим даного експерименту характеризувався набагато меншою провідністю каналу «електрод–піддон», ніж режим експерименту з наплавлення за схемою типу «П» (с загальним піддоном), при якому клема живлення СПСК з'єднана з клемою електрода. У другій половині процесу, у зв'язку зі зменшенням швидкості подачі електрода у шлакову ванну до 14 мм/хв, режим став стабільнішим. Коливання струмів СПСК і піддону стали частішими, а їх амплітуда відносно зменшилася. Аналіз частоти та амплітуди цих коливань дозволив встановити, що вони корелюють зі змінами провідності в міжелектродних проміжках. Зокрема, збільшення амплітуди коливань струму свідчить про нерівномірне плавлення електрода та зміну площі контакту між електродом і шлаковою ванною, що призводить до нестабільності процесу. Тим не менш, за результатами експериментів, режим наплавлення в СПК стаціонарного типу з під'єднанням джерела живлення за схемою «Е» було визнано найпродуктивнішим.

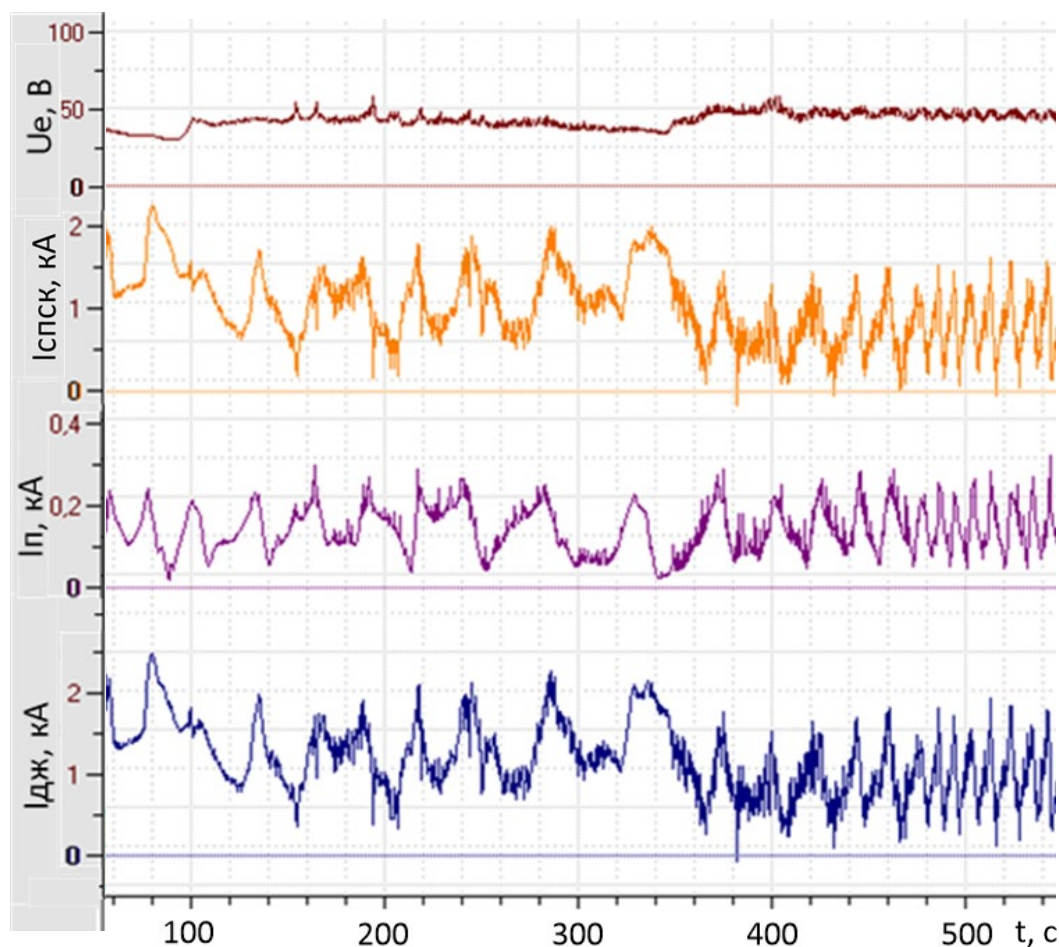


Рис. 2. Осцилограми зміни струмів та напруги кристалізатора, отриманих у результаті експерименту:

U_e – напруга на електроді, В; $I_{спск}$ – струм, що проходить через СПСК, кА; I_n – струм, що проходить через піддон, кА; $I_{дж}$ – струм джерела живлення, кА

Математичне моделювання. На основі експериментальних даних було створено мультифізичну модель СПК для аналізу взаємодії електромагнітних і теплових процесів у шлаковій ванні. Модель враховує конструктивні особливості кристалізатора, включаючи мідну водоохолоджувану втулку, графітове футерування та плавкий електрод. Основною метою моделювання було виявлення зон концентрації теплової енергії та їхнього впливу на стабільність процесу наплавлення.

Мультифізичне моделювання проводилося на графічній тривимірній моделі з урахуванням джоулевого нагріву [13]. Приклади схеми моделі наведено на рис. 3. Модель містить в собі верхню СПСК, що складається з мідної водоохолоджуваної втулки без вертикального розрізу та графітового футерування (ГФ), а також нижню формуючу секцію кристалізатора (ФСК), яка є другою мідною втулкою. Крім того, модель містить плавкий електрод, шлакову ванну, затравку (виріб), піддон, гарнісаж між формуючою секцією та ШВ і виробом, а також азбестову ізоляцію між секціями кристалізатора та піддоном.

У [8] було проведено моделювання впливу струмопідводу на електромагнітні процеси у кристалізаторі. Було показано, що конструкція секційного кристалізатора забезпечує обертання шлаку в ШВ, але суттєво не впливає на її загальний тепловий стан.

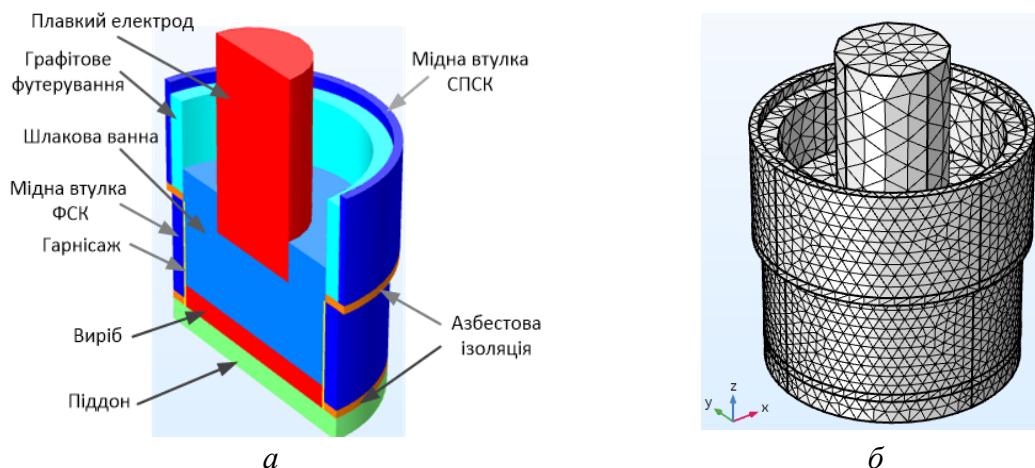


Рис. 3. Мультифізична модель стаціонарного СПК з плавким електродом:
а – структура СПК і б – розрахункова сітка СПК

У процесі наших досліджень електрошлакового наплавлення металу було проведено експеримент, під час якого спостерігалися значні коливання струму джерела живлення та споживаної потужності шлакової ванни (ШВ). Ці коливання досягали майже 50 % від максимального значення (рис. 2). Подальший аналіз виявив, що такі значні коливання струму в кристалізаторі пов'язані з коливаннями електропровідності обох міжелектродних проміжків (електрод-СПСК і електрод-піддон), які, у свою чергу, залежать від коливань величини заглиблення електрода. Важливо зазначити, що примусова циркуляція шлаку у ШВ, яку забезпечує струмопідвід до СПСК, відіграє важливу роль у теплообміні та розподілі домішок. Однак, як було показано в [8], така циркуляція шлаку не має суттєвого впливу на загальний тепловий стан ванни та не може пояснити значні коливання споживаної потужності в такому випадку. Тому при подальшому моделюванні СПК ми вирішили в моделі не застосовувати розрізну струмопідвідну секцію, що забезпечує обертання ШВ у горизонтальній площині, та не розв'язувати гідродинамічну задачу. Натомість ми зосередилися на електромагнітній та тепловій моделях. Такий підхід дозволив нам детальніше дослідити вплив конструктивних параметрів СПК і режимів наплавлення на розподіл температури в шлаковій ванні.

Детальний опис принципів побудови моделі, а також параметри електро- і теплофізичних властивостей матеріалів аналогічні тим, що використані в [13]. У моделі прийняті наступні параметри конструкції: внутрішній діаметр кристалізатора $D_k = 180$ мм; висота СПСК 90 мм; діаметр електрода $D_e = 90$ мм; висота ФСК 88 мм; висота ГФ 80 мм; товщина ГФ 15 мм; висота затравки 15 мм; висота піддона 20 мм; товщина охолоджуваної водою поверхні мідної втулки СПСК 7 мм; товщина гарнісажу на поверхні мідної втулки ФСК 2 мм; товщина охолоджуваної водою поверхні мідної втулки ФСК 15 мм; висота азбестової ізоляційної прокладки 7 мм; відстань від затравки до нижнього краю графітової футеровки $h_{за} = 87$ мм; початкова глибина ШВ 92 мм; заглиблення неплавкого електрода у шлакову ванну (змінна) $h_{зне} = 5 \dots 130$ мм; висота виробу (наплавленого шару) $h_{нш} = 0 \dots 50$ мм. На зазначеній мультифізичній моделі було проведено математичний експеримент з дослідження впливу утворених у СПК двох зон концентрації теплової енергії (які виникли як результат під'єднання СПК до джерела живлення за схемою типу «Е») на процес плавлення електрода. Зони концентрації теплової енергії визначаються наявністю двох основних каналів проходження струму від електрода до СПСК і від електрода до піддона.

Досліджувалися взаємозалежності ключових параметрів процесу. При цьому споживана потужність, величини струмів і напруги, електрична провідність двох каналів проходження струму джерела (канал «електрод-СПСК» і канал «електрод-піддон»), розподіл тепла у ШВ, її рівень відносно нижнього краю ГФ є залежними змінними, а

розташування торця електрода, що плавиться, відносно поверхні наплавлення та висота наплавленого зливка є незалежними змінними. Тому в моделі використовувався неплавкий електрод. Необхідно зазначити, що модель дозволяє визначати усталені значення досліджуваних параметрів, але не обчислює динаміку їх зміни. При аналізі динамічних змін процесу наплавлення використовувалася окрема модель, побудована в пакеті MatLab.

Результати моделювання показали, що зміна глибини занурення торця електрода суттєво впливає на розподіл температури в шлаковій ванні. На рис. 4 наведено розподіл температури у шлаковій ванні для трьох значень заглиблення електрода $h_{\text{зне}} = 60$ (а), 80 (б) і 110 (в) мм при висоті наплавленого зливка $h_{\text{нш}} = 0$ мм.

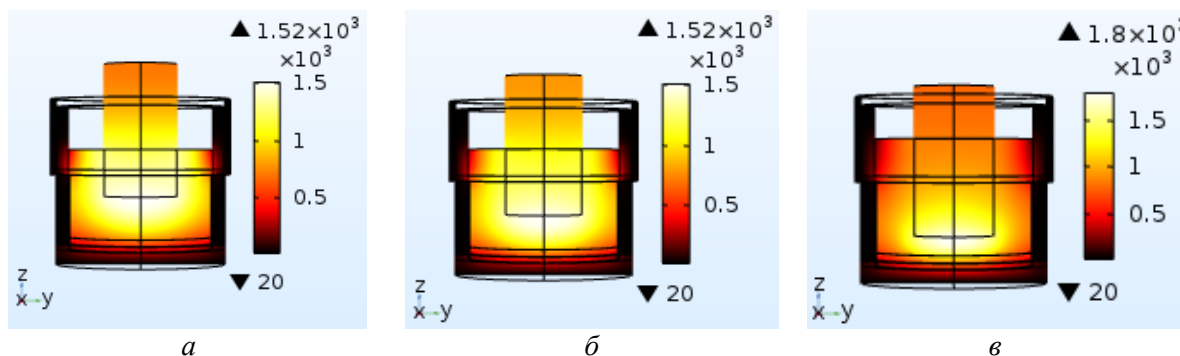


Рис. 4. Розподіл температури у шлаковій ванні для величин заглиблення електрода 60 (а), 80 (б) і 110 (в) мм

Демонструється, як змінюється теплове поле залежно від глибини занурення електрода у шлакову ванну. Розподіл теплового поля набуває форми, близької спочатку до конічної, потім до еліпсоїдної із максимальною температурою поблизу торця електрода. Очевидно, що чим більше заглиблення електрода, тим глибше у шлакову ванну буде зміщуватися область максимальних температур. На рис. 5 наведено розрахунок потужності, що вводиться у шлакову ванну, залежно від величини заглиблення електрода для обох її складових (для каналів «електрод – СПСК» і «електрод – піддон») при трьох значеннях висоти наплавленого зливка $h_{\text{нш}} = 0$ (а), 25 (б) і 50 (в) мм.

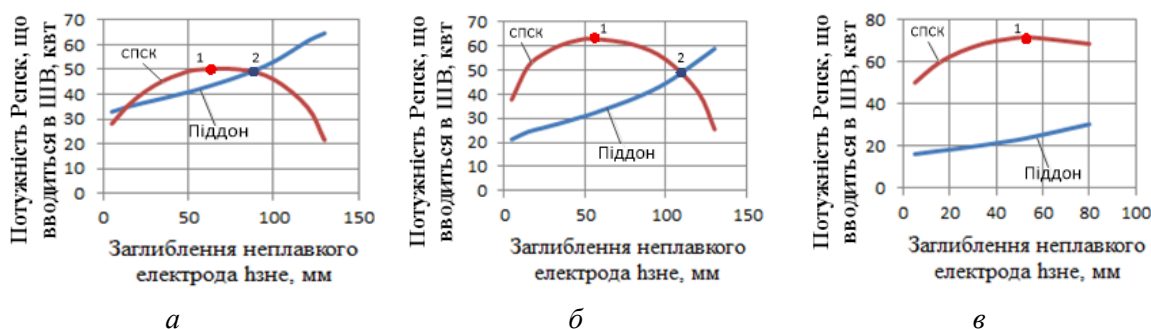


Рис. 5. Залежності зміни потужності, що вводиться у шлакову ванну, від величини заглиблення електрода при висоті наплавленого зливка 0 (а), 25 (б) і 50 (в) мм

На кривій потужності, що виділяється на СПСК, спостерігаємо наявність двох критичних точок 1 і 2. Точка 1 відповідає максимальному значенню потужності, що виділяється на СПСК, $dP_{\text{СПСК}}/dh_{\text{зне}} = 0$. Точка 2 відповідає точці перетину кривих потужностей, що виділяються на СПСК і піддоні. Потужність, що виділяється у ШВ при протіканні струму між електродом і СПСК, при швидкості подачі електрода, що відповідає положенню його торця в діапазоні від 0 мм до положення в критичній точці 2, завжди більша

за потужність, що виділяється струмом, який протікає між електродом і піддоном. Плавлення електрода, положення якого знаходиться в проміжку до критичної точки 2, відбувається в основному по бічній поверхні електрода. За критичною точкою 2 зростає роль тепла, що утворюється за рахунок виділення потужності в міжелектродному проміжку «електрод – піддон». Зі збільшенням висоти наплавленого зливка точка 1 зміщується ліворуч у бік зменшення величини заглиблення неплавкого електрода, а точка 2 зміщується праворуч у бік збільшення значення заглиблення неплавкого електрода. При $h_{\text{нш}} = 50$ мм точка 2 виходить за межі конструкційних можливостей СПК, оскільки можливий перелив шлаку. У межах зміни висоти наплавленого шару 30...50 мм необхідно стежити за швидкістю подачі електрода та поступово її зменшувати. При цьому процес входить у коливальний режим через зміщення процесу ліворуч від критичної точки 2. Коли торець електрода при постійній швидкості подачі опускається у ШВ і досягає рівності швидкості занурення та швидкості плавлення, положення його торця відносно поверхні наплавлення має стабілізуватися. Проте цього не відбувається через відставання в часі зростання температури від зростання потужності, що виділяється на СПСК. Це явище пов'язане з тепловою сталою часу ШВ $\tau_{\text{тсч}}$. Через деякий проміжок часу температура ШВ поблизу торця електрода підвищується, швидкість плавлення збільшується, відстань торця відносно поверхні наплавлення збільшується. Виникає зворотний рух торця електрода до зони концентрації теплової енергії, який є протилежним до напрямку руху самого електрода.

За допомогою мультифізичної моделі проведено аналіз динаміки зміни температури ШВ при зміні положення торця електрода, при цьому визначено теплову сталу часу ШВ $\tau_{\text{тсч}}$. Було отримано відгук температури торця електрода на стрибкоподібну зміну заглиблення неплавкого електрода (рис. 6).

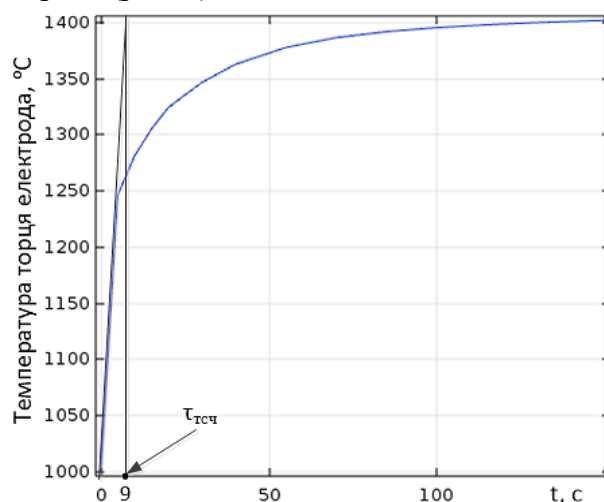


Рис. 6. Відгук температури торця електрода на стрибкоподібну зміну заглиблення неплавкого електрода

Відгук температури торця електрода, тобто інерційного ланцюга першого порядку, що спостерігався в ході математичного експерименту, описується як: $T_{\text{те}}(t) = T_{\text{поч}} + \Delta T(1 - e^{-\tau_{\text{тсч}} t})$, де $T_{\text{те}}(t)$ – температура торця електрода, °C; $T_{\text{поч}}$ – початкова температура, 1000 °C; ΔT – різниця між температурами усталеного (1400 °C) і $T_{\text{поч}}$. У результаті обчислень отримано значення $\tau_{\text{тсч}} \approx 9$ с. Ця величина корелює з експериментальними даними про період коливань зварювального струму з частотою 0,01...0,04 Гц. За-

звичай період для усталеного процесу становить 3...4 значення теплової сталої часу. Значення $\tau_{ТСЧ}$ було використано для аналізу в пакеті MatLab динамічних змін процесу наплавлення. Введення в модель процесу значення теплової сталої часу дозволило отримати зміни в часі струму електрода $I_e(t)$, температури торця електрода $T_{те}(t)$ і величини заглиблення плавкого електрода $h_{зе}(t)$ (рис. 7). З графіка (рис. 7) видно, що в момент часу 20,251 с у позиції 1 струм $I_e(t)$ досягає максимуму при температурі торця $T_{те}(t) = 2254^\circ\text{C}$, що відповідає приблизно половині її максимального значення. У зв'язку з подальшим зростанням температури швидкість плавлення електрода збільшується, заглиблення плавкого електрода зменшується і струм $I_e(t)$ зменшується через зниження електропровідності каналів. Після досягнення температури торця 2179°C (позиція 2), тобто при практично тій же температурі, що й у позиції 1, коли швидкість плавлення електрода та швидкість його подачі вирівнюються, починається зворотний процес. При цьому температура торця зменшується, $h_{зе}$ збільшується і струм $I_e(t)$ також збільшується. Виникає своєрідна «гойдалка» із незатухаючою амплітудою коливань.

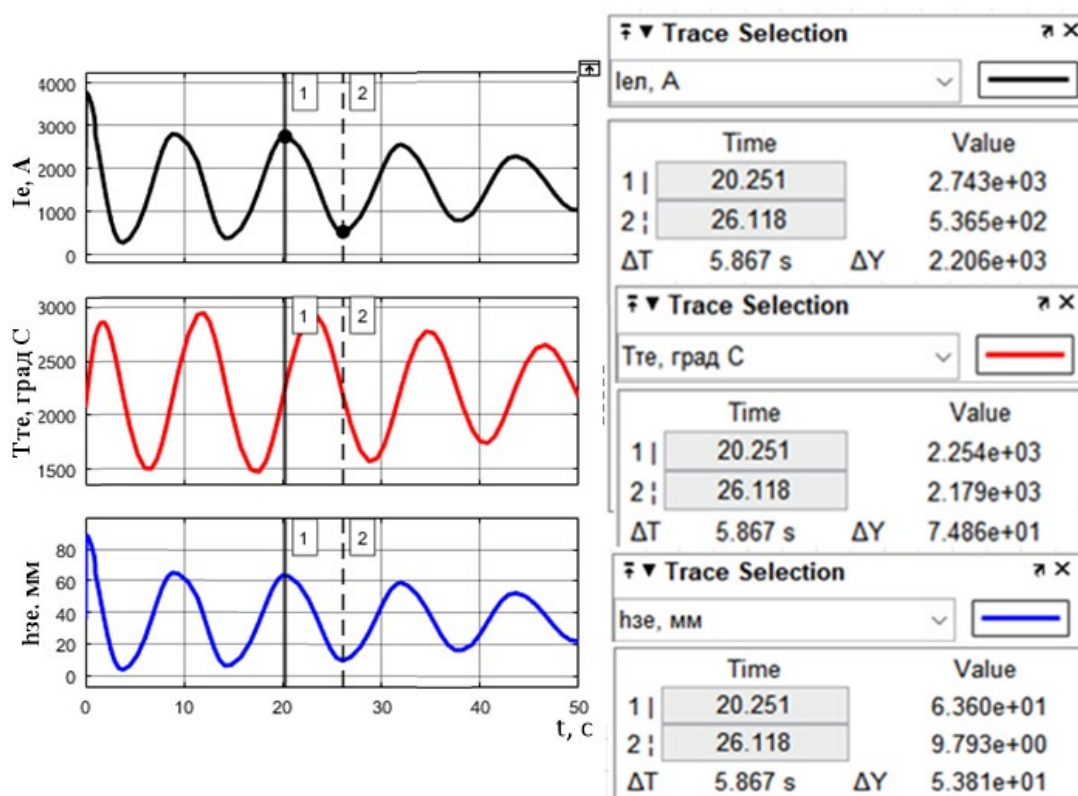


Рис. 7. Зміни в часі функцій $I_e(t)$, $T_{те}$ та $h_{зе}$ з таблицею пояснень

Таким чином, можна стверджувати, що амплітуда коливань струму та електропровідності пов'язана з під'єднанням СПК до джерела струму за схемою із загальним електродом типу «Е» та утворенням двох зон концентрації теплової енергії. Зі збільшенням швидкості подачі електрода (в межах допустимого діапазону) зростає амплітуда коливань заглиблення торця електрода у шлакову ванну. Це пояснюється зменшенням міжелектродного проміжку, що призводить до посилення впливу електропровідності між піддоном і електродом на загальну електропровідність кристалізатора. Водночас вплив електропровідності між струмопідвідною секцією та електродом зменшується. Цей ефект зумовлений наявністю теплової сталої часу шлакової ванни та зворотним впливом зони концентрації теплової енергії, утвореної СПКС, на торець електрода, що рухається до піддона. Зміна глибини занурення торця електрода змінює розподіл теплового поля та потужність,

що виділяється в каналах «електрод–СПКС» і «електрод – піддон». Для стабілізації процесу необхідно враховувати ці особливості та регулювати швидкість подачі електрода залежно від висоти наплавленого шару.

Виявлено, що при збільшенні заглиблення електрода до критичної точки 1 спостерігаються наступні явища:

- зростає амплітуда коливань заглиблення електрода у ШВ при одночасному зменшенні їх частоти;
- посилюється вплив міжелектродної провідності («електрод – СПКС») на плавлення електрода.

З'ясовано, що при подальшому збільшенні заглиблення електрода від критичної точки 1 до критичної точки 2 відбувається наступне:

- зменшується амплітуда коливань заглиблення електрода у ШВ при одночасному збільшенні їх частоти;
- відбувається поступове збільшення міжелектродної провідності («електрод – піддон») з одночасним зменшенням міжелектродної провідності («електрод–СПКС»).

Виявлено, що при досягненні заглиблення електрода критичної точки 2 і подальшому його заглибленні відбувається наступне:

- зменшується міжелектродний проміжок між піддоном і електродом, і, як наслідок, посилюється вплив електропровідності між піддоном і електродом на загальну електропровідність СПК;
- знижується вплив електропровідності між СПКС і електродом на загальну електропровідність СПК;
- зменшується площа бічного плавлення електрода;
- припиняється процес коливань заглиблення електрода у ШВ;
- підвищується ризик перегріву ШВ і закипання шлаку, що потребує корекції швидкості подачі електрода в бік зменшення.

Висновки. 1. Розглянуто причини значної нестабільності заглиблення торця електрода у шлакову ванну. Встановлено, що це явище характерне для схеми під'єднання СПК до джерела струму із загальним електродом для СПКС і піддону (схема типу «Е»).

2. Результати моделювання підтвердили існування двох зон концентрації теплової енергії у шлаковій ванні, які формуються через різницю в потужності струмових каналів «електрод – СПКС» і «електрод – піддон». Ці зони впливають на локальні температурні градієнти та провідність міжелектродних проміжків, що є ключовими факторами нестабільності процесу наплавлення. Для забезпечення стабільності необхідно враховувати ці особливості при проєктуванні режимів ЕШН.

3. Вивчено вплив висоти наплавленого зливка та розташування торця плавкого електрода відносно поверхні наплавлення на ці параметри. На основі проведеного дослідження надано рекомендації щодо ведення процесу наплавлення в зазначених умовах.

4. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку автоматизованої системи керування процесом ЕШН на основі отриманих результатів.

Експерименти з наплавлення проводилися під керівництвом та за участю д.т.н. Ю.М. Кускова (Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України).

Список використаних джерел

1. Волошкевич, Г.З. (1962). Стабилизация электрошлакового процесса. *Автоматическая сварка*, 4, 1–5.
2. Zhang, L., Wen, T., Chen, W. et al. (2021). Mathematical modeling on the initial melting of the consumable electrode during electros slag remelting process. *Metall. Mater. Trans.*, 52, 4033–4045. <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02318-z>.

3. Dong, Yw., Jiang, Zh., & Li, Zb. (2007). Mathematical model for electrosag remelting process. *Journal Iron Steel Res. Int.*, 14, 7–12. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(08\)60042-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(08)60042-4).
4. Weber, V., Jardy, A., Dussoubs, B. et al. (2009). A comprehensive model of the electrosag remelting process: description and validation. *Metall. Mater. Trans.*, 40, 271–280. <https://doi.org/10.1007/s11663-008-9208-9>.
5. Wang, Q., Qi, F., Wang, F. et al. (2015). Numerical investigation on electromagnetism and heat transfer in electrosag remelting process with triple-electrode. *Int. Journal Precis. Eng. Manuf.*, 16, 2467–2474. <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0317-5>.
6. Wang, Q., He, Z., Li, B. et al. (2014). A general coupled mathematical model of electromagnetic phenomena, two-phase flow, and heat transfer in electrosag remelting process including conducting in the mold. *Metall. Mater. Trans.*, 45, 2425–2441. <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0158-0>.
7. Zhang, J., Li, J., & Shi, Cb. (2021). Numerical analysis of role of melting rate on electrosag remelting continuous directional solidification of a die steel. *Journal Iron Steel Res. Int.*, 28, 1617–1624. <https://doi.org/10.1007/s42243-021-00720-0>.
8. Кусков, Ю. М., Грищенко, Т. И. (2019). Формирование металлической ванны при электрошлаковом процессе в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*, 4, 42–45. <https://doi.org/10.15407/as2019.04.07>.
9. Гориславец, Ю. М., Бондар, О. І., Проскудин, В. М., Кусков, Ю. М., Римар, С. В., & Нетьяга А. В. (2022). Вплив струмопідводу на електромагнітні процеси в кристалізаторі для електрошлакового наплавлення металу. *Праці ІЕД НАН України*, 62, 19–24. <https://doi.org/10.15407/publishing2022.62.019>.
10. Кусков, Ю. М., Соловьев, В. Г., & Жданов, В. А. (2017). Торцевая электрошлаковая наплавка электродом большого сечения в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*, 12, 40–45. <https://doi.org/10.15407/as2017.12.05>.
11. Медовар, Б. И., & и др. (Ред.). (1976). *Электрошлаковые печи*. Наукова думка.
12. Патон, Б. Е. (Ред.). (1980). *Электрошлаковая сварка и наплавка*. Машиностроение.
13. Соловйов, В. Г., Кусков, Ю. М., & Романова, І. Ю. (2024). Оптимізація форми металевої ванни при електрошлаковому наплавленні в стаціонарному струмопідвідному кристалізаторі для отримання біметалевих виробів. *Автоматичне зварювання*, 3, 49–58. <https://doi.org/10.37434/as2024.03.07>.

References

1. Voloshkevich, G.Z. (1962). Stabilizatsiya elektroshlakovogo protsesssa [Stabilization of the electrosag process]. *Avtomatycheskaia svarka – Automatic welding*, 4, 1–5.
2. Zhang, L., Wen, T., Chen, W. et al. (2021). Mathematical modeling on the initial melting of the consumable electrode during electrosag remelting process. *Metall. Mater. Trans.*, 52, 4033–4045. <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02318-z>.
3. Dong, Yw., Jiang, Zh., & Li, Zb. (2007). Mathematical model for electrosag remelting process. *Journal Iron Steel Res. Int.*, 14, 7–12. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(08\)60042-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(08)60042-4).
4. Weber, V., Jardy, A., Dussoubs, B. et al. (2009). A comprehensive model of the electrosag remelting process: description and validation. *Metall. Mater. Trans.*, 40, 271–280. <https://doi.org/10.1007/s11663-008-9208-9>.
5. Wang, Q., Qi, F., Wang, F. et al. (2015). Numerical investigation on electromagnetism and heat transfer in electrosag remelting process with triple-electrode. *Int. Journal Precis. Eng. Manuf.*, 16, 2467–2474. <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0317-5>.
6. Wang, Q., He, Z., Li, B. et al. (2014). A general coupled mathematical model of electromagnetic phenomena, two-phase flow, and heat transfer in electrosag remelting process including conducting in the mold. *Metall. Mater. Trans.*, 45, 2425–2441. <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0158-0>.
7. Zhang, J., Li, J., & Shi, Cb. (2021). Numerical analysis of role of melting rate on electrosag remelting continuous directional solidification of a die steel. *Journal Iron Steel Res. Int.*, 28, 1617–1624. <https://doi.org/10.1007/s42243-021-00720-0>.
8. Kuskov, Yu. M., Grishchenko, T. I. (2019). Formirovanie metallicheskoj vannы pri elektroshlakovom protsesse v tokopodvodiaschem kristallizatore [Formation of metal pool in current-supplying mould at electrosag process]. *Avtomatycheskaia svarka – Automated welding*, 4, 42–45. <https://doi.org/10.15407/as2019.04.07>.

9. Goryslavets, Y. M., Bondar, O. I., Proskudin, V. M., Kuskov, Yu. M., Rymar, S. V., & Netyaha, A. V. (2022). Vpliv strumopidvodu na elektromagnitni protsesi v kristalizatori dlia elektroshlakovogo naplavlennia metalu [Influence of electrical current terminals on electromagnetic processes in a mould for electroslag melting of metal]. *Pratsi IED NAN Ukrayini – Proceedings of the IED of the NAS of Ukraine*, 62, 19–24. <https://doi.org/10.15407/publishing2022.62.019>.
10. Kuskov, Yu. M., Soloviov, V. G., & Zhdanov, V.A. (2017). Tortsevaia elektroshlakovaia naplavka elektrodom bolshoho secheniya v tokopodvodiashchem krystallyzatore. [Electroslag surfacing of end faces with large-section electrode in current-supplying mould]. *Avtomaticheskaya svarka – Automated welding*, 12, 29–32. <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.12.05>.
11. Medovar, B. I. et al. (1976). *Elektroshlakovyye pechi [Electroslag furnaces]*. Naukova Dumka.
12. Paton, B.E. (ed.). (1980). *Elektroshlakovaya svarka i naplavka [Electroslag welding and melting]*. Mashinostroenie.
13. Solovyov, V. G., Kuskov, Yu. M., & Romanova, I. Yu. (2024). Optymizatsiia formy metalevoi vanny pry elektroshlakovomu naplavlenni v statsionarnomu strumopidvidnomu krystalizatori dlia otrymannia bimetalovykh vyrobiv. [Optimization of the metal pool shape during electroslag melting in a stationary current-carrying mould for manufacturing of bimetallic products]. *Avtomatichne zvaruvannya – Automated welding*, 3, 49–58. <https://doi.org/10.37434/as2024.03.07>.

Отримано 07.04.2025

UDC 669.117.56.002.6

Volodymyr Solovyov¹, Iryna Romanova²

¹PhD 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 Autor ID: 58740647500

²PhD 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 Autor ID: 57222474743

REASONS OF DESTABILIZATION OF THE ELECTROSLAG MELTING PROCESS IN THE STATIONARY CURRENT-BASED CRYSTALLISER

The paper considers the process of electroslag melting in the stationary type current-carrying crystallizer with a power supply connection scheme in which the power supply terminal of the current-carrying section of the crystallizer is connected to the terminal of the pallet. This type of connection of the crystallizer to the power source ensures high productivity of the melting process. However, even if the electrode feed rate into the slag pool is maintained at the constant rate, significant fluctuations in the electrode current are observed. The amplitude of these fluctuations reaches almost 50% of the maximum current value with a frequency of 10-25 s. This indicates significant fluctuations in the temperature of the slag bath during the melting process. These fluctuations can lead to undesirable changes in the physical, mechanical, and structural properties of the deposited metal. The causes of these fluctuations are analyzed. The ways to reduce them and increase stability of the melting process are presented.

Key words: stationary current-driven crystallizer; self-regulating mechanism; multiphysics modelling; electroslag melting; stabilization of the electroslag process.

Fig.: 7. References: 12.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-411-419](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-411-419)

УДК 533.65.013.622

Сергій Вікторович Єрмолов¹, Юрій Олександрович Денисов²¹аспірант кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)E-mail: sergey.ermolow@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8786-2430>

ResearcherID: MBI-0037-2025

²доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)E-mail: yuri.denisov@stu.cn.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2293-7964>

ResearcherID: G-1144-2016. Scopus Author ID: 56338219200

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ АКУМУЛЯТОРА ТА ГВИНТОМОТОРНОЇ ГРУПИ НА ТРИВАЛІСТЬ ПОЛЬОТУ БПЛА

Розглянуто ключові чинники, які визначають найбільшу тривалість польоту безпілотного літального апарату (БПЛА). Запропоновано модель обчислення енергії, яку споживає апарат у стані зависання. Здійснено розрахунок максимальної тривалості польоту БПЛА, враховуючи ємність та вагу акумулятора, кількість пропелерів, а також діаметр пропелерів для апаратів з різною масою. Продемонстровано, що необмежене збільшення ємності акумулятора не є доцільним, і існує оптимальна точка, яка залежить від співвідношення ваги акумулятора до загальної ваги апарата. Додатково показано, що збільшення діаметра пропелерів значно збільшує час польоту, тоді як збільшення їх кількості не дає такого помітного ефекту.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; мультироторний дрон; режим зависання; гвинтомоторна група; енергоспоживання; електромеханічна ефективність; час польоту.

Рис.: 3. Бібл.: 21.

Актуальність теми дослідження. Застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА), з кожним роком набуває все більшого поширення в багатьох сферах людської життєдіяльності. Не лише військове, а й цивільне використання БПЛА в різних галузях науки, промисловості, лісництві, агрономії, картографії, екології, космічних дослідженнях важко переоцінити [1]. З цієї причини застосування та розвиток БПЛА у різноманітних сферах залишається надзвичайно перспективним у найближчому майбутньому. БПЛА порівняно з пілотованою технікою, мають наступні переваги [2]: відсутність екіпажу та необхідності в наявності систем його життєзабезпечення, великих аеродромах; нижча собівартість вартість і низькі витрати на їх розробку, виробництво та експлуатацію; кращі масогабаритні показники; висока надійність та маневровість; широкий обсяг спеціалізованого спорядження для розміщення на борту. БПЛА впроваджуються в усі сфери людського життя, навіть у ті, де БПЛА не мають пілотованої альтернативи. Деякі моделі мультикоптерів вже застосовуються для доставки товарів, наприклад, компанією Amazon [3], яка проєктує вежу, що слугуватиме злітним майданчиком для дронів-кур'єрів, а також розробляє власний дизайн літальних апаратів-перевізників. Подібну систему доставки також впроваджено і у пошті Швейцарії. Доставка кореспонденції та посилок у важкодоступні села стала значно простішою завдяки використанню безпілотників. Дрон DOFEC уже використовується для гасіння пожеж [4]. Метою його розробки була допомога у гасінні пожеж у висотних та багатоповерхових будинках. Продовжують розроблятися БПЛА нових конструкцій, наприклад, з гібридним крилом. Такі БПЛА завдяки фіксованому/обертovому крилу можуть як швидко долати великі відстані, ковзаючи по повітрю, так і зависати за допомогою чотирьох роторів [5].

Постановка проблеми. В усіх сферах застосування БПЛА актуальною та важливою залишається задача підвищення автономності. Тривалість безперервної роботи та дальність польоту безпосередньо впливають на можливості БПЛА, його здатність виконання завдань та ефективність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Енергоспоживання БПЛА залежить від ваги корисного навантаження, погодних умов і швидкості дрона. Енергоспоживання є критично важливим критерієм під час виконання безпілотником своїх місій і потребує

додаткового вивчення. Проведено багато досліджень, спрямованих на збільшення часу польоту за рахунок підвищення енергоефективності або зменшення енергії, споживаної дроном [6-20]. У [6] автори запропонували роботу, яка збільшує тривалість місії, досліджуючи фактори, що впливають на енергоспоживання безпілотної, такі як рух, вітер та вага корисного вантажу. У роботах [8-10] вони являють собою автоматизовану акумуляторну платформу, яка може вирішити проблему шляхом заміни або зарядки акумулятора багато разів під час місії. У роботі [12] автори пропонують метод, який подовжує витривалість дронів, скидаючи розряджені батареї з дрона під час польоту. У [13] представлено метод, який збільшує витривалість гвинтокрила шляхом зменшення корисного навантаження. Це досягається шляхом поділу батареї на декілька батарей меншої ємності, які послідовно розряджаються і вивільняються. Однак це обмежується додатковою вагою схеми перемикачів та механізму вивільнення. У [15] запропонована проста модель для оцінки витривалості квадрокоптера, що залежить в приміщенні, в той час як у [16] представлена характеристика енергоспоживання гвинтокрилих літальних апаратів, що живляться від LiPo акумуляторів, і точна модель оцінки витривалості. З метою збільшення часу роботи БПЛА запропоновано регулятор висоти на основі стану заряду батареї для шестироторного літального апарату в [17], де розроблено систему моніторингу батареї з метою оцінки стану заряду і подальшого використання його для розрахунку розробленого регулятора. З огляду на керування курсуванням з мінімальним споживанням енергії, автори в [18] оцінюють взаємозв'язок між швидкістю навігації та споживанням енергії в мініатюрному квадрокоптері, який рухається за заданою траєкторією, шляхом експериментального тестування. Пропонується новий контролер слідування за траєкторією, в якому швидкість гвинтокрила є динамічним профілем, що змінюється залежно від геометричних вимог бажаної траєкторії.

Мета дослідження полягає в дослідженні впливу параметрів акумулятора (ємність та маса) та гвинтомоторної групи (кількість пропелерів та їхній діаметр) на максимально можливу тривалість польоту БПЛА різної маси.

Виклад основного матеріалу. Основними елементами, які визначають максимально можливу тривалість польоту БПЛА, є (рис. 1):

1. Акумулятор - чим більша ємність, тим більший час роботи апарату він може забезпечити. Однак, акумулятор більшої ємності буде мати більшу масу, що збільшить загальну масу апарату та вплине на інші льотні характеристики: максимальна швидкість, маневровість, вантажність.

2. Загальна маса – маса самого апарату з акумулятором, маса корисного вантажу. Чим більша маса апарату, тим більшу механічну потужність мають розвивати гвинтомоторні групи, а отже тим більше буде споживання електричної потужності від акумулятора, що зменшує час польоту.

3. Властивості рами – матеріал, з якого виготовлена рама, та конструкція (форма). Матеріал рами визначає її механічні властивості, а також масу. Конструкція рами безпосередньо впливає на її аеродинамічні характеристики, покращення яких, дозволяє збільшити ефективність використання електричної потужності, а отже збільшити тривалість польоту.

4. Потужність двигунів – визначає максимальну вантажопідйомність апарату та його максимальну швидкість. Але збільшення потужності двигунів призводить до зменшення часу польоту.

5. Розмір пропелерів – більші пропелери дозволяють отримати більшу підйомну силу при менших затратах потужності, що збільшує тривалість польоту. Проте максимальний розмір пропелерів часто обмежений розмірами рами БПЛА.

6. Енергоефективність системи електроживлення – визначає, яка частка електричної енергії спожитої з акумулятора, витрачається безпосередньо на обертання гвинтів. Через неідеальність електронних компонентів частина електричної енергії буде втрачатися на нагрів проводів, електронних модулів (польотний контролер, перетворювачі напруги), обмоток двигунів.

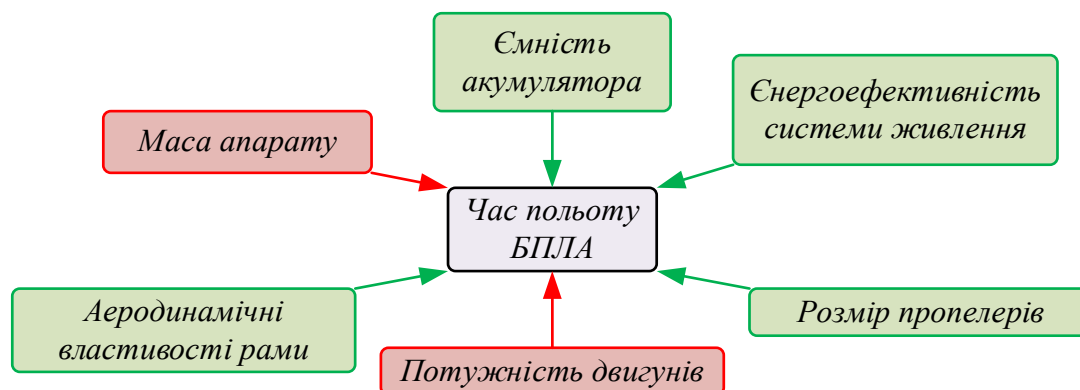


Рис. 1. Основні параметри, що визначають тривалість польоту БПЛА
Джерело: розроблено авторами.

У цій статті буде розглянуто тільки вплив параметрів акумулятора, маси апарату та параметрів гвинтомоторної групи (двигун та пропелер) на максимальний час польоту БПЛА. Для визначення максимального часу T_{MAX} польоту необхідно знати: напругу акумулятора V_B ; електричну ємність акумулятора Q_B та електричну потужність, яку споживають двигуни в режимі зависання P_H :

$$T_{MAX} = V_B \cdot Q_B / P_H. \quad (1)$$

Використовується саме потужність, необхідна для зависання, оскільки вона є верхньою межею споживання енергії [19]. При горизонтальному польоті на апарат діє сила, яка називається поступальною підйомною силою, коли повітря проходить горизонтально через роторну систему. Це підвищує ефективність ротора та зменшує необхідну потужність, порівняно з випадком зависання [19]. Вважається, що потужність, споживана БПЛА під час підйому, польоту та посадки, можна усереднити приблизним значенням, що і становитиме потужність, споживану під час зависання [20]. Згідно з [19] «основне призначення ротора в режимі зависання — забезпечити вертикальну підйомну силу, протилежну вазі апарата». Для створення цієї сили необхідно забезпечити потужність потоку повітря P_F , що визначається за формулою:

$$P_F = T \cdot v_i, \quad (2)$$

де T – тяга, що створюється ротором для утримання апарату в повітрі, дорівнює вазі апарату; v_i – індукована швидкість повітря в режимі зависання.

За допомогою теорії приводного диска [19; 21] швидкість v_i визначається як:

$$v_i = \sqrt{T / (2 \cdot A_p \cdot \rho_{air})} = \sqrt{T / (2 \cdot \pi \cdot (D_p / 2)^2 \cdot \rho_{air})} = \sqrt{2 \cdot T / (\pi \cdot D_p^2 \cdot \rho_{air})}, \quad (3)$$

де ρ_{air} – густина повітря (1.225 кг/м³); A_p , D_p – площа та діаметр диска пропелера.

Підставляючи рівняння (3) у (2), отримуємо:

$$P_F = T \cdot \sqrt{2 \cdot T / (\pi \cdot D_p^2 \cdot \rho_{air})} = \sqrt{2 \cdot T^3 / (\pi \cdot D_p^2 \cdot \rho_{air})}. \quad (4)$$

Тяга T , для одного ротора дорівнює вазі апарата, коли він знаходиться в режимі зависання [19], тобто:

$$T = (m_D + m_B) \cdot g, \quad (5)$$

де m_D , m_B , – маса самого апарату та акумулятора відповідно; g – прискорення вільного падіння (9.8 м/с^2).

Таким чином, рівняння (4) для одного ротора набуде вигляду:

$$P_F = \sqrt{2 \cdot g^3 \cdot (m_D + m_B)^3 / (\pi \cdot D_p^2 \cdot \rho_{air})}. \quad (6)$$

З іншого боку, загальна вага апарата рівномірно розподілена на всіх роторах, тому можна розраховувати споживання енергії під час зависання для N_p роторів таким чином:

$$P_F = \sqrt{2 \cdot g^3 \cdot (m_D + m_B)^3 / (\pi \cdot D_p^2 \cdot N_p \cdot \rho_{air})}. \quad (7)$$

У будь-якій системі електроживлення присутні втрати потужності, а також електрична потужність перетворюється гвинтомоторною групою в механічну не зі стовідсотковою ефективністю. Тому:

$$P_F = \eta \cdot P_H, \quad P_H = P_F / \eta, \quad (8)$$

де η – загальна ефективність, що включає в себе ККД системи електроживлення апарата та ефективність гвинтомоторної групи (зазвичай дорівнює 0,6...0,8).

Акумулятори більшої ємності мають більшу масу. Врахувати зміну маси акумулятори можна через питому масову енергію e_B – кількість енергії на одиницю маси (в сучасних літій-полімерних акумуляторах, які часто використовуються на БПЛА, сягає $250 \text{ Вт} \cdot \text{год/кг}$):

$$m_B = V_B \cdot Q_B / e_B. \quad (9)$$

Підставивши (7) в (1), враховуючи (8) та (9), отримуємо:

$$T_{MAX} = V_B \cdot Q_B \cdot \eta \cdot \sqrt{\pi \cdot D_p^2 \cdot N_p \cdot \rho_{air} / (2 \cdot g^3 \cdot (m_D + V_B \cdot Q_B / e_B)^3)}. \quad (10)$$

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

Таблиця 1 – Список параметрів, що використовувалися в процесі розрахунків, та їхні значення

№	Параметр	Позначення	Величина	Одиниці вимірювання
1	Маса апарата	m_D	1...20	кг
2	Напруга акумулятора	V_B	22,2	В
3	Ємність акумулятора	Q_B	1...200	А*год
4	Питома масова ємність	e_B	250	Вт/кг
5	Діаметр пропелера	D_p	0,1..0,5	м
6	Кількість пропелерів	N_p	3..8	-
7	Густина повітря	ρ_{air}	1,225	кг/м ³
8	Прискорення вільного падіння	g	9,8	м/с ²
9	ККД	η	0,8	-

На рис. 2 показано результати розрахунків відношення маси акумулятора до маси апарата (рис. 2, а) та максимальної тривалості польоту апарата (рис. 2, б-г) залежно від ємності акумулятора (з врахуванням зміни його маси) для апаратів різної маси, а також при різних конфігураціях гвинтів.

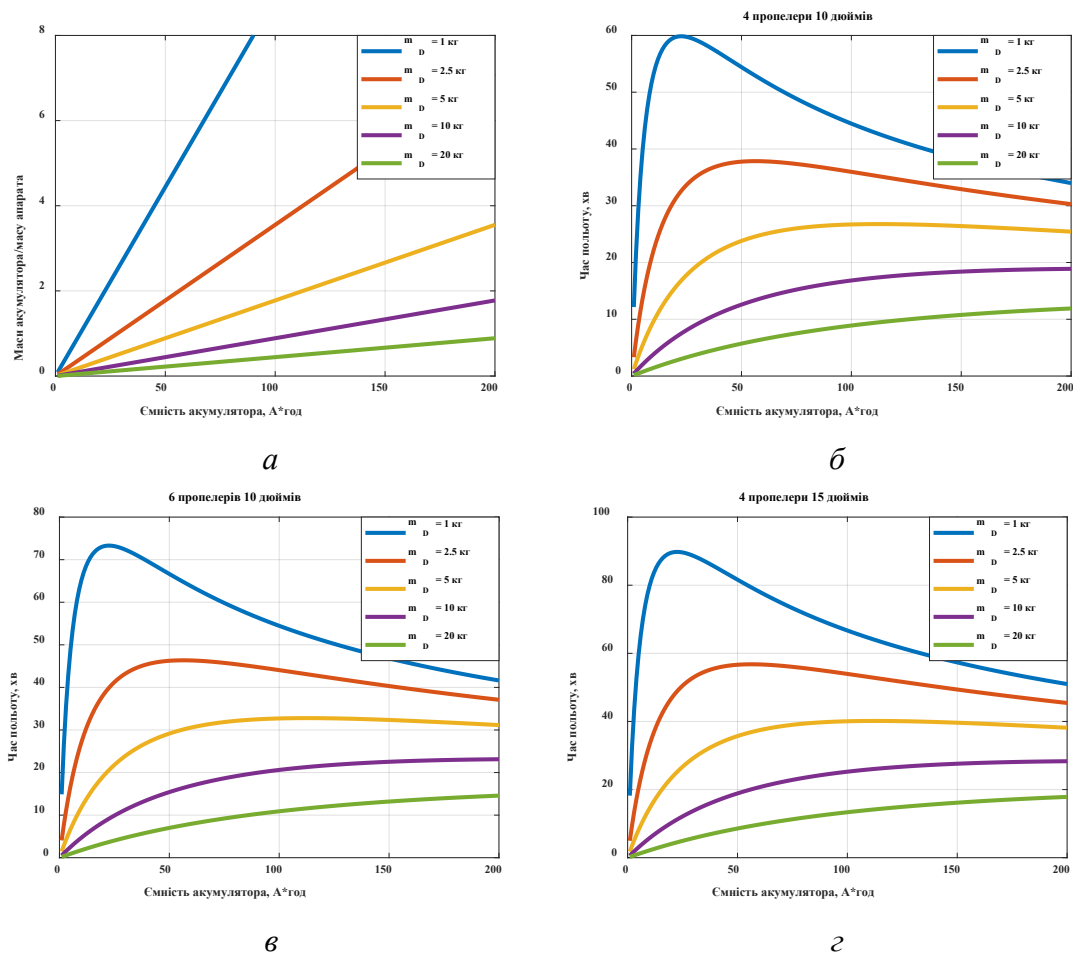


Рис. 2. Графіки залежності від ємності акумулятора для апаратів різної маси:
а – відношення маси акумулятора до маси апарата; б-г – максимальна тривалість польоту апарата з при різних конфігураціях

Джерело: розроблено авторами.

Як видно з рис. 2, збільшення ємності акумулятора дозволяє значно збільшити максимальну тривалість польоту, але тільки до обмеженої величини. Максимум часу припадає на точку, в якій відношення маси акумулятора до маси стає рівним 2. Подальше збільшення ємності акумулятора, а відповідно і його маси, призводить до зменшення часу польоту. Виходячи з цього, для БПЛА різної маси оптимальна ємність акумулятора буде різною (для апарата масою 1 кг оптимальним буде акумулятор масою 2 кг та ємністю 20 А*год, а для апарата масою 5 кг – акумулятор масою 10 кг та ємністю 120 А*год). Звісно, оптимальне відношення маси акумулятора до маси апарата буде залежати також від питомої масової ємності акумулятора та енергоефективності електромеханічної системи. Проте, як можна побачити з рис. 2, б-г, збільшення кількості пропелерів та їхнього діаметра, хоча і дозволяє також збільшити максимальну тривалість польоту, не зміщує точку оптимуму.

На рис. 3 наведено графіки залежності максимальної тривалості польоту від діаметра пропелерів за різної кількості пропелерів для апаратів різної маси та акумуляторами різної ємності.

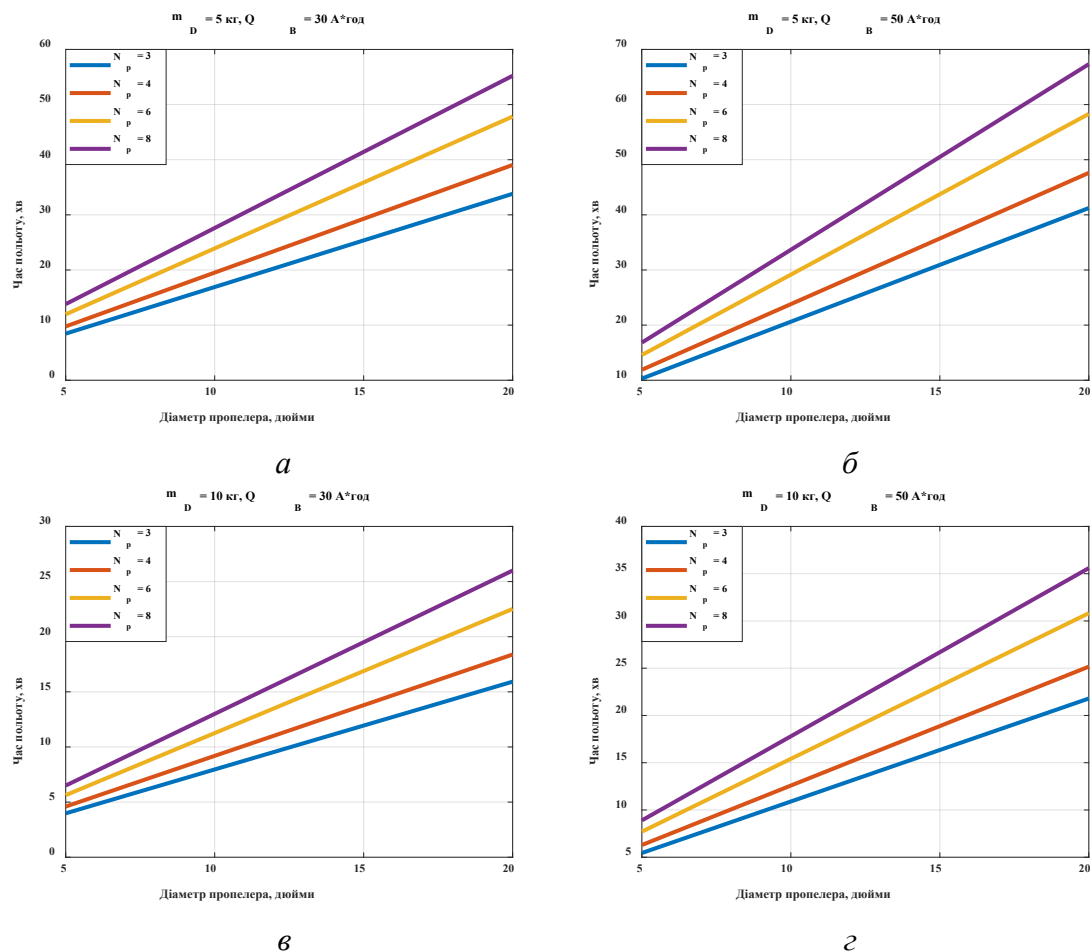


Рис. 3. Графіки залежності максимальної тривалості польоту від діаметра пропелерів за різної кількості пропелерів для апаратів різної маси та акумуляторами різної ємності
Джерело: розроблено авторами.

Як можна побачити з рис. 3, збільшення діаметра пропелерів дозволяє суттєво збільшити тривалість польоту (у 2-3 рази) та отримати більший приріст часу польоту від збільшення ємності акумулятора.

Висновки. Розглянуто основні фактори, що впливають на максимальну тривалість польоту БПЛА. Представлено модель розрахунку потужності, що споживається апаратом в режимі зависання. Виконано розрахунок максимальної тривалості польоту БПЛА залежно від ємності та маси акумулятора, кількості пропелерів, діаметра пропелерів для апаратів різної маси. Показано, що немає сенсу збільшувати ємність акумулятора нескінченно, і існує точка оптимуму, що залежить від відношення маси акумулятора до маси апарата. Також показано, що збільшення діаметра пропелерів помітно збільшує час польоту, в той час як збільшення їх кількості є не настільки ефективним.

Перспектива подальших досліджень. Розглянута модель дозволяє лише приблизно оцінити потужність споживану дроном у режимі зависання і відповідно максимальну тривалість польоту. Використання більш складних та точних моделей дозволить отримати більш коректні результати, дослідити вплив більшої кількості параметрів на польотні характеристики БПЛА. Використання емпіричних даних також дозволить підвищити точність розрахунків.

Список використаних джерел

1. Области застосування безпілотних літальних апаратів. (2021). <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/monographs/article/view/8531>.

2. Книш Б. П., Кулик Я. А., & Барабан М. В. (2018). Класифікація безпілотних літальних апаратів та їх використання для доставки товарів. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, 3, 246-252.
3. *Амазон отримав дозвіл на доставку дронами від влади США (2020)*. <https://retailers.ua/news/tehnologii/10860-amazon-poluchil-razreshenie-na-dostavku-dronami-v-ssha>.
4. *Дрон виявив пожежу та вцілів вогнегасною капсулою у вікно (2021)*. <https://nauka.ua/news/dron-viyaviv-pozhezhu-ta-vciliv-vognegasnoyu-kapsuloyu-u-vikno>.
5. *Агрокоптер, або дрон польовий (2015)*. <https://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/1089-ahrokofter-abo-dron-poloviyi.html>.
6. Citroni, R., Di Paolo, F., & Livreri, P. A. (2019). Novel Energy Harvester for Powering Small UAVs: Performance Analysis, Model Validation and Flight Results. *Sensors*, 19 (8), 1771. <https://doi.org/10.3390/s19081771>.
7. Aleksandrov, D., & Penkov, I. (2012). Energy consumption of mini UAV helicopters with different number of rotors. In *11th International Symposium Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering* (pp. 259–262).
8. Ure, N. K., Chowdhary, G., Toksoz, T., How, J. P., Vavrina, M. A., & Vian, J. (2015). An automated battery management system to enable persistent missions with multiple aerial vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(1), 275–286. <https://doi.org/10.1109/tmech.2013.2294805>.
9. Lee, D. Zhou, J., & Lin, W. T. (2015). Autonomous battery swapping system for quadcopter. In *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 118-124). doi: 10.1109/ICUAS.2015.7152282.
10. Michini, B., et al. (2011). Automated battery swap and recharge to enable persistent UAV missions. In *Infotech@ Aerospace* (p. 1405). American Institute of Aeronautics and Astronautics.
11. Abeywickrama, H. V., Jayawickrama, B. A., He, Y., & Dutkiewicz, E. (2018). Empirical power consumption model for uavs. In *2018 IEEE 88th vehicular technology conference (vtc-fall)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/vtcfall.2018.8690666>.
12. Chang, T., H. Yu (2015). Improving electric powered UAVs' endurance by incorporating battery dumping concept. *Procedia Engineering*, 99, 168-179.
13. Abdilla, A., Richards, A., & Burrow, S. (2015b). Power and endurance modelling of battery-powered rotorcraft. In *2015 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/iros.2015.7353445>.
14. Budhiraja, I., Kumar, N., Tyagi, S., & Tanwar, S. (2021). Energy consumption minimization scheme for noma-based mobile edge computation networks underlaying UAV. *IEEE Systems Journal*, 15(4), 5724 - 5733. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2021.3076782>.
15. Roberts, J. F., Zufferey, J. C., & Floreano, D. (2008). Energy management for indoor hovering robots. In *2008 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/iros.2008.4650856>.
16. Abdilla, A., Richards, A., & Burrow, S. (2015). Power and endurance modelling of battery-powered rotorcraft. In *2015 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/iros.2015.7353445>.
17. Podhradský, M., Coopmans, C., & Jensen, A. (2013b). Battery state-of-charge based altitude controller for small, low cost multirotor unmanned aerial vehicles. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 74(1-2), 193–207. <https://doi.org/10.1007/s10846-013-9894-7>.
18. Gandolfo, D. C., Salinas, L. R., Brandao, A., & Toibero, J. M. (2017). Stable path-following control for a quadrotor helicopter considering energy consumption. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 25(4), 1423–1430. <https://doi.org/10.1109/test.2016.2601288>.
19. Leishman, G. J. (2006). *Principles of helicopter aerodynamics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
20. Torabbeigi, M., Lim, G. J., & Kim, S. J. (2019). Drone delivery scheduling optimization considering payload-induced battery consumption rates. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 97(3-4), 471–487. <https://doi.org/10.1007/s10846-019-01034-w>.
21. Hoffmann, G., Huang, H., Waslander, S., & Tomlin, C. (2007). Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment. In *AIAA guidance, navigation and control conference and exhibit*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2007-6461>.

References

1. Oblasti zastosuvannya bezpilotnykh litalnykh aparativ [Areas of application for unmanned aerial vehicles]. (2021). <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/monographs/article/view/8531>.
2. Knysh, B. P., Lulyk, Ya. A., & Baraban, M. V. (2018). Kласифікація безпілотних літальних апаратів та їх використання для доставки товарів. [Classification of unmanned aerial vehicles and their use for the delivery of goods]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky – Bulletin of Khmelnytsky National University. Technical sciences*, 3, 246-252.
3. Amazon otrymav dozvil na dostavkudronamy vid vldy SShA [Amazon receives permission for drone delivery from US authorities]. (2020). <https://retailers.ua/news/tehnologii/10860-amazon-poluchil-razreshenie-na-dostavku-dronami-v-ssha>.
4. Dron vyjavyv pozhezhn ta vtsilyv vohnehasnoiu kapsuloiu u vikno [A drone detects a fire and shoots a fire extinguishing capsule through a window] (2021). <https://nauka.ua/news/dron-viyaviv-pozhezhn-ta-vciliv-vognegasnoyu-kapsuloiu-u-vikno>.
5. Ahrokopter, abo dron polovyi [An agrocopter or field drone]. (2015). <https://agro-business.com.ua/agro/mechanizatsiia-apk/item/1089-ahrokopter-abo-dron-polovyi.html>.
6. Citroni, R., Di Paolo, F., & Livreri, P. A. (2019). Novel Energy Harvester for Powering Small UAVs: Performance Analysis, Model Validation and Flight Results. *Sensors*, 19 (8), 1771. <https://doi.org/10.3390/s19081771>.
7. Aleksandrov, D., & Penkov, I. (2012). Energy consumption of mini UAV helicopters with different number of rotors. In *11th International Symposium Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering* (pp. 259–262).
8. Ure, N. K., Chowdhary, G., Toksoz, T., How, J. P., Vavrina, M. A., & Vian, J. (2015). An automated battery management system to enable persistent missions with multiple aerial vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(1), 275–286. <https://doi.org/10.1109/tmech.2013.2294805>.
9. Lee, D. Zhou, J., & Lin, W. T. (2015). Autonomous battery swapping system for quadcopter. In *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 118-124). doi: 10.1109/ICUAS.2015.7152282.
10. Michini, B., et al. (2011). Automated battery swap and recharge to enable persistent UAV missions. In *Infotech@ Aerospace* (p. 1405). American Institute of Aeronautics and Astronautics.
11. Abeywickrama, H. V., Jayawickrama, B. A., He, Y., & Dutkiewicz, E. (2018). Empirical power consumption model for uavs. In *2018 IEEE 88th vehicular technology conference (vtc-fall)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/vtcfall.2018.8690666>.
12. Chang, T., H. Yu (2015). Improving electric powered UAVs' endurance by incorporating battery dumping concept. *Procedia Engineering*, 99, 168-179.
13. Abdilla, A., Richards, A., & Burrow, S. (2015b). Power and endurance modelling of battery-powered rotorcraft. In *2015 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/iros.2015.7353445>.
14. Budhiraja, I., Kumar, N., Tyagi, S., & Tanwar, S. (2021). Energy consumption minimization scheme for noma-based mobile edge computation networks underlying UAV. *IEEE Systems Journal*, 15(4), 5724 - 5733. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2021.3076782>.
15. Roberts, J. F., Zufferey, J. C., & Floreano, D. (2008). Energy management for indoor hovering robots. In *2008 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/iros.2008.4650856>.
16. Abdilla, A., Richards, A., & Burrow, S. (2015). Power and endurance modelling of battery-powered rotorcraft. In *2015 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/iros.2015.7353445>.
17. Podhradský, M., Coopmans, C., & Jensen, A. (2013b). Battery state-of-charge based altitude controller for small, low cost multirotor unmanned aerial vehicles. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 74(1-2), 193–207. <https://doi.org/10.1007/s10846-013-9894-7>.
18. Gandolfo, D. C., Salinas, L. R., Brandao, A., & Toibero, J. M. (2017). Stable path-following control for a quadrotor helicopter considering energy consumption. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 25(4), 1423–1430. <https://doi.org/10.1109/tcst.2016.2601288>.
19. Leishman, G. J. (2006). *Principles of helicopter aerodynamics* (2nd ed.). Cambridge University Press.

20. Torabbeigi, M., Lim, G. J., & Kim, S. J. (2019). Drone delivery scheduling optimization considering payload-induced battery consumption rates. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 97(3-4), 471–487. <https://doi.org/10.1007/s10846-019-01034-w>.

21. Hoffmann, G., Huang, H., Waslander, S., & Tomlin, C. (2007). Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment. In *AIAA guidance, navigation and control conference and exhibit*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2007-6461>.

Отримано 23.06.2025

UDC 533.65.013.622

Sergey Yermolov¹, Yuri Denisov²

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

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

ResearcherID: MBI-0037-2025

²Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics,
National University «Chernihiv Polytechnic» (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: den711td@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2293-7964>

ResearcherID: G-1144-2016. Scopus Author ID: 56338219200

INFLUENCE OF BATTERY AND PROPELLER GROUP PARAMETERS ON THE UAV FLIGHT DURATION

The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) is becoming increasingly widespread in many areas of human life every year. Not only military, but also civilian use of UAVs in various fields of science, industry, forestry, agronomy, cartography, ecology, and space research is hard to overestimate. For this reason, the use and development of UAVs in various fields remains extremely promising in the near future. Compared to manned vehicles, UAVs have the following advantages: no crew and no need for life support systems, large airfields; lower cost and low expenses for their development, production and operation; better weight and dimensions; high reliability and maneuverability; a wide range of specialized equipment for placement on board. UAVs are being introduced into all spheres of human life, even those where UAVs have no manned alternative. Some models of multicopters are already being used to deliver goods and extinguish fires. UAVs of new designs continue to be developed.

In all areas of UAV application, the task of increasing autonomy remains relevant and important. The duration of continuous operation and flight range directly affect the capabilities of the UAV, its ability to perform tasks and efficiency.

UAV power consumption depends on the weight of the payload, weather conditions and drone speed. Energy consumption is a critical criterion for a drone to perform its missions and needs to be further studied. Many studies have been conducted to increase flight time by improving energy efficiency or reducing the energy consumed by the drone.

Study the influence of battery parameters (capacity and weight) and propeller group (number of propellers and their diameter) on the maximum possible flight duration of UAVs of different masses.

The main factors affecting the maximum flight duration of a UAV are considered. A model for calculating the power consumed by the device in the hover mode is presented. The maximum flight duration of a UAV is calculated depending on the battery capacity and weight, the number of propellers, and the diameter of the propellers for vehicles of different masses.

It is shown that there is no point in increasing the battery capacity indefinitely, and there is an optimum point that depends on the ratio of the battery mass to the mass of the vehicle. It is also shown that increasing the diameter of the propellers significantly increases the flight time, while increasing their number is not as effective.

Keywords: unmanned aerial vehicle; multi-rotor drone; hover mode; rotorcraft group; power consumption; electromechanical efficiency; flight time.

Fig.: 3. References: 21.

Дмитро Станіславович Захарченко¹, Сергій Анатолійович Степенко²

¹аспірант, молодший науковий співробітник Центру протимінної діяльності Міністерства оборони України
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: dimazakhar@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3009-5648>. ResearcherID: [AFH-3544-2022](https://orcid.org/AFH-3544-2022)

²кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник,
доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: serhii.stepenko@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7702-6776>
ResearcherID: [F-1018-2014](https://orcid.org/F-1018-2014). SCOPUS Author ID: 55570068000

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У СКЛАДІ АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Стационарні сонячні електричні станції, що складаються з масиву сонячних панелей – одні з найбільш вагомих складових автономних електричних мереж. Враховуючи різноманітність існуючих топологій та методів відстежування точки максимальної потужності, метою цієї роботи є огляд топологій перетворювачів, класифікація алгоритмів МРРТ та їх порівняльний аналіз. На основі проведеного аналітичного огляду складено порівняльну таблицю для розглянутих алгоритмів. У процесі порівняння основних алгоритмів МРРТ встановлено, що інтелектуальні алгоритми мають певні переваги над базовими. Проте реалізація таких алгоритмів є комплексною і потребує більших обчислювальних ресурсів, що донедавна становило істотну проблему. Автономні електроенергетичні системи, засновані на розподілених незалежних джерелах генерації, привертають все більшу увагу через те, що показують здатність значного заощадження енергії та зменшення викидів забруднюючих речовин завдяки високому поширенню відновлюваних джерел енергії. У порівнянні з використанням електроенергії від традиційних електростанцій, значні зміни у вимогах щодо кількості споживання електроенергії в поєднанні з невизначеністю щодо доступності сонячної та вітрової енергії для необхідного генерування потужності, вимагають впровадження систем зберігання енергії для пом'якшення проблем переривчастості та для виконання вимог пікового споживання електроенергії.

Ключові слова: автономні електричні мережі; електроенергетичні системи; накопичувачі електроенергії; технічні показники; економічні показники; ефективність; фотоелектричні перетворювачі; порівняльний аналіз.

Рис.: 1. Табл.: 2. Бібл.: 22.

Актуальність теми дослідження. Попит на електроенергію та відповідні ціни мають суттєвий вплив на економічну діяльність будь-якої країни. За останнє десятиліття багато розвинених країн швидко переходять до екологічно чистих і дешевих відновлюваних джерел енергії. В останні кілька років енергетичний ринок України постраждав від поступового збільшення розриву між попитом і пропозицією через збільшення споживання та руйнування енергетичної інфраструктури та об'єктів генерації. За даними Інституту відновлювальної енергетики НАН України [1], загальний економічно-доцільний потенціал відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії в Україні становить, приблизно, 454,4 млрд кВт·год, або 59,2 млн т умовного палива на рік. Україна приєдналася до Європейського енергетичного співтовариства та взяла на себе зобов'язання до 2020 року виробляти 11 % електроенергії із відновлюваних джерел енергії та 25 % до 2035 року [2]. Від 2009 року об'єкти відновлюваної енергетики в Україні отримали право на використання зеленого тарифу.

Станом кінець 2020 року сонячна енергетика України становила 6320 МВт загальною номінальною потужністю без урахування близько 407,9 МВт потужностей, які перебувають на окупованій Росією території, які генерують 1,265 млрд кВт·год електроенергії. Частка СЕС на перший квартал 2021 року загальній генерації України складає близько 6 %. За оцінками сонячної енергетики України [3], сонячних електростанцій потужністю приблизно 800-850 МВт було встановлено у 2024 році. У 2025 році сонячна енергетика в Україні продовжує розвиватися, хоча темпи приросту дещо сповільнилися порівняно з попередніми роками. Загальна встановлена потужність сонячних електростанцій в Україні перевищує 7 ГВт, а частка сонячної генерації в загальному енергобалансі становить близько 6 %. Спостерігається зростання кількості малих та середніх сонячних електростанцій, особливо в сегменті домашніх господарств, причому кількість

"просьюмерів" (домогосподарств, що виробляють електроенергію для власних потреб та продають надлишки в мережу) перевищила 45000 одиниць.

В Україні річне надходження сонячного випромінювання перебуває на одному рівні з країнами, які активно використовують сьогодні сонячні колектори (Швеція, Німеччина, США тощо).

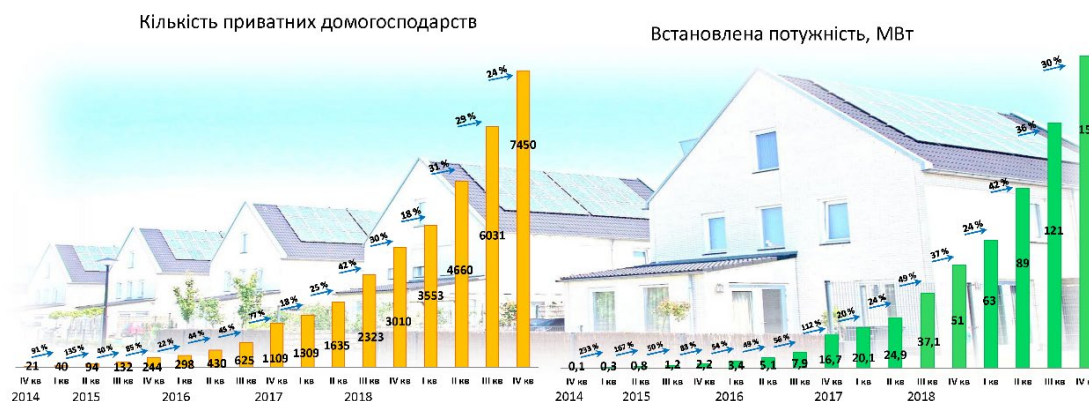


Рис. 1. Динаміка збільшення кількості сонячних електроустановок приватних домогосподарств

Джерело: [4].

Фотоелектричні (PV) системи є одними з найбільш швидкозростаючих сфер відновлюваної енергії (ВДЕ) у світі завдяки прогресу технологій сонячних батарей [5]. У 2019 році глобальне виробництво сонячної енергії становило від 120 до 140 ГВт, а Китай і Німеччина були найбільшими виробниками сонячних фотоелектричних систем [6].

Постановка проблеми. Глобальне суспільство значно прискорює впровадження відновлюваних джерел енергії та їх інтеграцію в існуючу мережу, щоб протидіяти зростаючим екологічним проблемам, зокрема збільшенню викидів вуглекислого газу минулого століття. Відновлювані джерела енергії мають величезний потенціал для скорочення викидів вуглекислого газу, оскільки вони практично ніколи не виробляють вуглекислий газ чи інші забруднювачі. З іншого боку, на ці джерела енергії зазвичай впливають географічне розташування, погода та інші фактори стохастичного характеру. Система накопичення енергії в акумуляторах застосовується для зберігання енергії, виробленої ВДЕ, а потім використовуватися регулярно та в межах, необхідних для зменшення впливу переривчастого характеру відновлюваних джерел енергії.

В умовах російсько-української війни та вимушених відключень електроенергії, внаслідок пошкодження об'єктів генерації та розподілення енергосистеми України, використання відновлювальних джерел енергії в поєднанні з можливістю тривалого та в достатній ємності зберігання електроенергії питання поширеного використання ESS здобуває додаткової актуальності.

На сьогодні є різноманіття систем накопичення електроенергії. Усі вони відрізняються за техніко-експлуатаційними та економічними показниками, мають як переваги, так і недоліки. Отримання найкращого рішення у виборі правильної ESS залежить від багатьох параметрів системи генерації на накопичення відновлювальної енергії, а також потреб кінцевого користувача. Розглядаються такі показники, як капітальні витрати (CAPEX), ефективність проходження в обидві сторони (η_{RTE}), глибина розряду (DOD), термін служби та кількість циклів тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні два десятиліття були розроблені різні технології систем накопичення енергії (ESS) для різних застосувань, таких як мобільні телефони, електричні транспортні засоби та автономні електроенергетичні системи, такі як мікромережі та системи полігенерації, зазвичай організовані з використанням сонячної фотоелектричної енергії [7].

У роботі [8] проаналізовано особливості та сформульовано рекомендації щодо найбільш ефективного використання систем накопичення енергії в розподільних системах і мікросистемах в умовах розширення впровадження локальних відновлюваних джерел енергії. Узагальнено інформацію щодо різних технологій акумулювання енергії та сформульовано рекомендації щодо ефективного їх застосування для різних додатків в електроенергетиці. Розглянуто функції, які можуть і повинні вирішувати системи накопичення енергії в розподільних мережах, у результаті чого обґрунтовано доцільність формування гібридних систем накопичення. На основі аналізу бібліографії та розгляду міжнародного досвіду визначено завдання, які потребують подальших поглиблених досліджень для обґрунтованого вибору структури, параметрів, місць розміщення та режимів роботи гібридних систем накопичення енергії з урахуванням специфіки побудови та режимів роботи вітчизняних систем розподілу електричної енергії за умов інтеграції в них різноманітних локальних джерел енергії.

У статті [9] відзначено вирішальне систем акумуляторного накопичення енергії для модернізації існуючих енергетичних систем, запропоновано вирішення ключових проблем, пов'язаних з мінливістю відновлюваних джерел енергії, та підвищення стабільності та стійкості мережі. У цій роботі можна ознайомитись з дослідженням різноманітного застосування ESS у різних масштабах, від використання на рівні мікроприладів до великомасштабних комунальних та мережових систем надання послуг, підкреслюючи їхню адаптивність та трансформаційний потенціал. Це дослідження також включає передові застосування, такі як мобільне накопичення енергії, використання акумуляторів другого терміну служби та інноваційні моделі, такі як накопичення енергії як послуга та спільне використання накопичувачів енергії.

Авторами статті [10] системи акумуляторного накопичення енергії розглядаються як перспективна технологія для вирішення виникаючих технічних складнощів, що привертає значну увагу в останні роки. Зокрема, вони викликають дедалі більший інтерес у контексті гібридних установок PV-BESS, що забезпечує різні переваги як для житлових, так і для нежитлових кінцевих користувачів. Ця робота надає детальний огляд аспектів, пов'язаних з ESS, зосереджуючись на застосуванні, розробках та тенденціях досліджень гібридних установок у секторі кінцевих користувачів. У зв'язку з цим надається чіткий огляд акумуляторного накопичення енергії, особливо як розподіленого енергетичного ресурсу, а також детальний опис гібридних установок PV-BESS, їхніх доступних конфігурацій та переваг.

У матеріалах оглядової статті [11] представлено сучасний стану систем накопичення енергії в акумуляторах та визначення їхніх переваг та недоліків. Водночас це допомагає дослідникам та інженерам у цій галузі знайти більш оптимальну конфігурацію для конкретного застосування. Це дослідження пропонує ретельний аналіз системи накопичення енергії в акумуляторах з урахуванням хімічних властивостей акумуляторів, силової електроніки та підходів до управління. У цій статті також запропоновано детальний аналіз застосувань систем накопичення енергії на основі акумуляторів та досліджуються недоліки найкращих архітектур систем накопичення енергії на основі акумуляторів, щоб визначити області, які потребують подальшого вивчення.

ESS забезпечують поєднання послуг балансування та регулювання в рамках інтелектуальної мережі для підвищення її стійкості та гнучкості. Підтримка прийнятного стану та найвищої норми прибутку вимагає динамічного моделювання активу та ретельної оптимізації. Авторами статті [12] порівнюються технічні витрати та економічна вигода від використання акумуляторів у динамічній частоті та діях механізму балансування в інтелектуальній мережі. Як тематичне дослідження вони використовують послуги, придбані National Grid у Великій Британії. Запропонована методологія дає найоптимальніший сценарій участі в обслуговуванні, враховуючи динамічну деградацію та змінне ціноутворення на електроенергію протягом дня. Крім того, вона рекомендує найоптимальніший графік відправлення та декларації цін для акумулятора протягом дня та року, використовуючи алгоритм оптимізації рою частинок та історичні дані.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Метою роботи є комплексний аналіз техніко-експлуатаційних, економічних та екологічних показників, пов'язаних із застосування широкого спектра ESS у складі автономних електроенергетичних систем на основі фотоелектричних перетворювачів.

Дана робота здебільшого присвячена детальному та комплексному аналізу критеріїв, що описують продуктивність ESS щодо цілей стійкості та енергетичної безпеки. Запропонований комплекс показників представлений у вигляді систему індикаторів та застосований для вибраних систем зберігання енергії. Це призводить до матриці рішень для проблеми багатокритеріального аналізу рішень.

Мета статті. Метою даного матеріалу є проведення дослідження елементів накопичення електроенергії у складі автономних електроенергетичних систем на основі фотоелектричних перетворювачів.

Виклад основного матеріалу. Оскільки технології накопичення енергії мають сприяти покращенню енергетичної стабільності, пріоритети енергетичної політики ЄС можуть бути взяті за основу для побудови набору індикаторів. Пріоритети енергетичної політики ЄС включають: безпеку постачання, конкурентоспроможність, доступність енергії та екологічну стійкість. У світлі цих рекомендацій ми розглядаємо три групи показників, що описують ефективність технологій зберігання енергії: технологічні, економічні та екологічні критерії [13].

Техніко-економічні характеристики елементів накопичення.

Проаналізовано три основні категорії систем накопичення енергії (ЕЕС):

Літій-іонні (Li-Ion) ESS на основі літію демонструють високу щільність енергії порівняно з іншими системами, даючи водночас відносно високу потужність розряду та відмінну ефективність процесів заряду/розряду. Поточна щільність енергії для технологій літій-іонних елементів коливається від 200 Вт·год/л до 735 Вт·год/л для конфігурації NMC/LMO [14]. Вартість коливається від 473 до 1260 доларів США/кВт·год для систем на основі літій-титанового оксиду та від 200 до 840 доларів США/кВт·год для літій-іонних акумуляторів іншої хімії. Глибина розряду даних накопичувачів коливається від 80 до 100 %, тоді як оцінка ефективності літій-іонних технологій для процесів заряду/розряду становить від 92 до 96 %. З роками спостерігалось зниження капітальних витрат [15], і їх використання у стаціонарних автономних електроенергетичних системах стає більш конкурентоспроможним. Дійсно, масштаб розгортання Li-Ion ESS є вищим, ніж інші технології ESS, через їх домінування в електромобілях і стаціонарних автономних електроенергетичних системах. Серед різних літій-іонних технологій розглядаються літій-нікель-марганець-кобальт, літій-оксид марганцю (NMC-LMO) і літій-залізо-фосфат (LIP). Перший тип є звичайним вибором для застосувань у стаціонарних автономних електроенергетичних системах і електромобілях завдяки зниженому використанню дорогого кобальту при збереженні продуктивності. Літій-залізо-фосфатний тип Li-Ion накопичувача демонструє перевагу перед NMC-LCO завдяки кращій термічній стабільності, невід'ємній безпеці та довшому життєвому циклу, але він має нижчу щільність енергії, викликану нижчою електричною та іонною провідністю фосфату заліза.

Свинцево-кислотні (LA) ESS є найстарішими і найбільш широко використовуваними типами накопичувачів електроенергії [16]. Вони мають найнижчу капітальну вартість, але, як недолік, вони важкі, громіздкі, характеризуються низькою щільністю енергії та низькою глибиною розряду (DOD). Свинцево-кислотні ESS мають щільність енергії від 50 Вт·год/л до 100 Вт·год/л і термін служби від трьох до п'ятнадцяти років або від 250 до 2500 еквівалентних повних циклів заряду/розряду [15]. До 2030 року очікується покращення характеристик даного типу накопичувача, покращивши термін служби до 5000 еквівалентних повних циклів заряду/розряду. Очікувані вдосконалення виробничих процесів можуть

дозволити цій технології досягти вартості, яка все ще може бути конкурентоспроможною в застосуванні в стаціонарних автономних електроенергетичних системах. Очікується, що до 2030 року вартість установки свинцево-кислотних ESS знизиться зі 105–475 доларів США/кВт-год до 50–240 доларів США/кВт-год. LA накопичувачі енергії за конструкцією можуть бути залитими (Flooded-Lead Acid або FLA), вони вважаються еталонною технологією через зрілість свою та великий досвід експлуатації, навіть незважаючи на те, що їх життєвий цикл низький і виникають проблеми з обслуговуванням, та герметичні (Valve Regulated Lead Acid або VRLA), вони водонепроникні та автономні, тому будуть більш оптимальні для об'єктів, на яких тривалий час не проводиться обслуговування накопичувачів, а також є більші перепади навколишніх температур.

Проточні батареї (FB) ESS є найбільш вивченою технологією ESS за останнє десятиліття завдяки їх масштабованості, придатності для великомасштабних застосувань і збільшеному досвіду виробництва [15]. Поточна щільність енергії коливається від 15 Вт-год/л до 70 Вт-год/л, а вартість установки коливається від 315 до 1680 доларів США/кВт-год. Очікується, що до 2030 року витрати знизяться до 108–576 доларів США/кВт-год. FB показує значний тривалий термін служби та найвищий DOD, близький до 100 %. Як недолік, FB є дорогими через складну архітектуру системи, але це можна компенсувати їх довшим терміном служби. Поки що FB показали низьку ефективність зворотного зв'язку. Ванадієво-відновна проточна батарея (VRF) і цинк Розглядаються бромідні батареї (ZBF). VRFB привертає увагу, оскільки очікується, що до 2030 року не перевищить 360 доларів США/кВт-год із середнім вартість 120 дол. комерціалізація технологій. У табл. 1 наведено всі згадані варіанти технології для порівняння з їх основними показниками ефективності.

Таблиця 1 – Різні типи ЕЕС та їх властивості [15]

Тип акумуляторної батареї	Ефективність заряду/розряду (%)	Глибина розряду (%)	Строк придатності (років)	Кількість циклів
Li NMC-LCO	95	90	12	2000
LIP	92	90	12	2500
LT	96	95	15	10000
FLA	82	50	9	1500
VRLA	80	50	9	1500
VRF	70	100	12	13000
ZBF	70	100	10	10000

Технологічні показники технологій зберігання енергії дозволяють оцінити надійність технологій та їхню здатність забезпечувати безпеку енергопостачання. Економічні показники дозволяють врахувати питання конкурентоспроможності та доступності шляхом врахування витрат, пов'язаних зі встановленням технологій зберігання енергії та, у свою чергу, їхнього впливу на ціни на енергію. Крім питання доступності, ці характеристики визначають вплив конкретних технологій зберігання енергії на конкурентоспроможність економіки. Індикатори впливу на навколишнє середовище дозволяють вирішувати екологічну стійкість. Соціальний вимір не представлено окремою групою індикаторів, однак вимір доступності є найбільш актуальним із соціального погляду. Таким чином, соціальний вимір сталості технологій зберігання енергії в нашому випадку охоплюється економічними показниками. Технічні показники для оцінки зберігання енергії включають:

1. Номінальна потужність вимірюється в МВт. Він показує потужність установки. Цей критерій є максимальним, оскільки вища потужність забезпечує більшу гнучкість у раціоналізації енергопостачання.

2. Енергетичний рейтинг – це тривалість розряду, виміряна в годинах. Кращим є довший період розряду, оскільки це дозволяє краще приборкати дефіцит енергії.

3. Час відповіді вказує час, необхідний для активації установки. Вимірюється за лінгвістичною шкалою. Нижчі значення є кращими, оскільки кращим є швидке реагування на шоки попиту та пропозиції енергії.

4. Щільність енергії вимірює кількість енергії для одиниці фізичного розміру установки. Вимірюється на одиницю ваги у Вт·год/кг. Бажана більш висока щільність. Час саморозряду вказує на частку потужності, втраченої протягом періоду часу, якщо установка не використовується. Цей показник вимірюється у відсотках на добу. Очевидно, що нижчі значення є бажаними.

5. Ефективність передачі в обидві сторони – це відношення кількості енергії, яку може надати установка, до кількості енергії, спожитої під час попереднього заряджання. Критерій вимірюється у відсотках. Бажано вищі значення.

6. Термін служби - це період часу, протягом якого установка може працювати. Вимірюється в роках. Більші значення свідчать про більшу довговічність установки.

7. Кількість циклів роботи (заряджання та розряджання) відображає довговічність установки. Бажано більший кількість циклів.

Економічні показники включають два типи витрат, пов'язаних із потужністю (номінальною потужністю) та кількістю поставленої енергії. Ці витрати можуть відрізнятися через властивості установок, наприклад, для технологій, орієнтованих на короткочасне зберігання, порівняно з тими, які орієнтовані на тривале зберігання. Розглядаються два критерії:

1. Вартість електроенергії вимірюється в євро/кВт і відображає загальну вартість встановлення. Нижчі витрати є кращими.

2. Вартість енергії вимірюється в євро/кВт-год і відображає витрати на енергопостачання. Нижчі значення більш бажані.

Екологічний показник. Вважається, що плив на навколишнє середовище оцінюється на основі огляду літератури. Застосовується якісна шкала з п'ятьма рівнями (від відсутності впливу до дуже сильного впливу). Бажаним є мінімальний вплив на навколишнє середовище.

Техніко-економічні та екологічні характеристики основних технологій накопичення енергії, розглянутих вище, представлені в табл. 1. Ці дані були отримані шляхом комбінування різних джерел. Можна висловити кілька зауважень щодо природи проблеми оцінки технологій зберігання енергії. По-перше, критерії пов'язані з різними одиницями вимірювання. По-друге, критерії мають різні напрямки оптимізації. По-третє, деякі показники оцінюються в лінгвістичних шкалах (наприклад, вплив на навколишнє середовище), які пов'язані з невизначеністю. Таким чином, використання нечітких методів MCDM необхідне для успішного вирішення проблеми вибору технології зберігання енергії з огляду на цілі енергетичної сталості. Таблиця 2 визначає перетворення лінгвістичних міток у нечіткі числа.

Розглядаючи конкретні технології, можна помітити, що як рівні, так і розкиди рейтингів відрізняються. Наприклад, такі технології, як PHS і CAES, призначені для великомасштабних застосувань зі значеннями номінальної потужності понад 100 МВт. Однак першу технологію можна розширити до вищого ступеня, і, таким чином, верхня межа номінальної потужності приблизно в 16 разів перевищує відповідне значення для технології CAES. Інтервал для деякої альтернативи за певним критерієм може бути покритий кінцевими точками інтервалів для іншої альтернативи. Наприклад, Вартість енергії CAES коливається від 10 до 120 євро/кВт-год, тоді як інтервал для технології NaNiCl становить від 70 до 150 євро/кВт-год. Ці випадки ілюструють необхідність застосування теорії нечітких чисел для вирішення проблеми пріоритизації систем зберігання енергії.

У таблиці 2 наведені детальні техніко-економічні характеристики різних технологій накопичення енергії.

Таблиця 2 – Техніко-економічні та екологічні характеристики технологій накопичення енергії [17-23]

Технологія	Технічна характеристика							Економічна характеристика		Екологічна характеристика
	Час розряду, год	Здатність реагувати на навантаження	Щільність енергії, Вт·год/кг	Саморозряд (%/день)	Ефективність передачі в обидві сторони, %	Тривалість життя, років	Життєві цикли, кількість	Вартість електроенергії, €/кВт	Вартість електроенергії €/кВт·год	Екологічний вплив
Hydrogen	24	Середня	80	2	50	5	10000	550...1600	1...15	Високий
PHS	24	Середня	0.5	0.0001	85	50	50000	500...3600	50...150	Дуже високий
CAES	24	Велика	30	0.0001	54	25	50000	400...1150	10...120	Дуже високий
Flywheel	0.25	Середня	5	20	95	20	100000	100...300	1000...3500	Дуже низький
SMES	33	Мала	0.5	15	95	20	10000	100...400	700...7000	Дуже високий
Supercap	1	Мала	0.1	2	98	20	1000000	100...400	300...4000	Низький
Pb-acid	3	Дуже мала	30	0.3	95	3	1000	200...650	50...300	Дуже високий
NiCd	1	Дуже мала	40	0.6	91	15	3000	350...1000	200...1000	Дуже низький
Li-ion	1	Дуже мала	75	0.3	100	5	10000	700...3000	200...1800	Низький
NaS	2	Дуже мала	150	20	90	10	4500	700...2000	200...900	Низький
NaNiCl	1	Дуже мала	125	15	90	10	2500	100...200	70...150	Дуже низький
VRB	10	Мала	75	10	85	5	10000	2500...2500	100...1000	Дуже високий
ZnBr	10	Мала	60	1	75	5	2000	500...1800	100...700	Дуже низький
Molten salt	24	Велика	80	1	60	5	10000	200...300	30...60	Низький

Компонентну модель ESS було розроблено з урахуванням робочих параметрів, таких як заряд (η_{Ch}) і ефективність розряду (η_{Dch}), які визначають стан заряду ESS (SOC), DOD, який встановлює мінімальний і максимальний SOC, номінальну ємність E_N , струм I і напругу V кола, календарний термін служби та кількість циклів. Неявні рівняння пов'язують вищезазначені параметри з сімейством ESS (тобто літій-іонний, окисно-відновний ванадій) і номінальною ємністю. Авторами розроблено прийняття функціональних кореляцій, що представляють БД ESS.

Згідно з належним чином перевіреною характеристикою моделі ESS, прийнятою для вирішення проблем оптимальної диспетчеризації та зобов'язань одиниць [24; 25], електричні параметри, такі як генерований струм і напруга, не обговорюються в цьому розділі, навіть якщо вони були взяті до уваги авторами та вбудовані в ESS DB. Відповідно до вищезазначених робочих параметрів ESS, SOC ESS на кожному кроці часу ($t + 1$) виражається як співвідношення між фактично накопиченою енергією ESS (E_{ESS}) на момент часу ($t + 1$) та номінальною потужністю.

$$SOC_{ESS}(t + 1) = \frac{E_{ESS}(t+1)}{E_n}. \quad (1)$$

SOC у цій статті визначається як безрозмірний параметр і враховує DOD. Мінімальне та максимальне значення SOC вводяться для обмеження області здійсненності розв'язку. Відповідно до вищезазначеного, обмеження нерівності, введені для розв'язання ODP, виражаються рівнянням (2):

$$SOC_{ESS}^{min} \leq SOC_{ESS}(t + 1) \leq SOC_{ESS}^{max}. \quad (2)$$

У результаті рівняння енергозбереження ємність ESS (виражена в кВт·год) на етапі часу ($t + 1$) визначається як потужність ESS на етапі часу (t) плюс енергія, введена в ESS під час фази заряду:

$$E_{Ch} = P_{Ch} \cdot \Delta t = P_B^- \cdot \eta_{Ch} \cdot \Delta t, \quad (3)$$

або мінус енергія, отримана від ESS, під час фази розряду:

$$E_{Dch} = P_{Dch} \cdot \Delta t = \frac{P_B^+}{\eta_{Dch}} \cdot \Delta t, \quad (4)$$

де P_B^- і P_B^+ – потужність, що вводиться та береться від шини електрики відповідно. Для кожного часового кроку потужність ESS виражається за формулою:

$$E_{ESS}(t + 1) = E_{ESS}(t) + E_{Ch} - E_{Dch}. \quad (5)$$

Для забезпечення рівняння енергозбереження протягом усього періоду роботи ЕЕС введено обмеження рівності. Взавши за основу добу з 48 інтервалами (24 години), (рівняння(6)) нав'язує, що енергетичний вміст ESS у момент часу 0 такий самий, як і в момент часу 48, щоб система могла працювати без дефіциту енергії наступного дня. Якщо період роботи заснований на тижні, місяцях або роках, обмеження будуть адаптовані до належного значення кроку в кінці часу:

$$E_{ESS}(t = t_{START}) = E_{ESS}(t = t_{END}) \rightarrow E_{ESS}(0) - E_{ESS}(48). \quad (6)$$

Висновки. Сучасні системи резервного електропостачання характеризуються скороченням розрахункового терміну служби через швидке старіння. У процесі все більшого розповсюдження відновлюваних джерел енергії, їх інтеграції до існуючої мережі та зростаючої загрози для функціонування традиційних систем генерації в умовах російсько-української війни запропонований багатокритеріальний аналіз техніко-експлуатаційних, економічних та екологічних показників для широкого спектра систем накопичення електроенергії. Описані основні типи систем накопичення енергії та їх складових. Визначений широкий спектр параметрів для складових систем накопичення електроенергії та наведені економічна та екологічна характеристики. З огляду на наведені параметри можна зробити вибір щодо найбільш пристосованої системи накопичення електроенергії для конкретних умов використання з урахуванням балансу переваг та недоліків.

Список використаних джерел

1. Кудря, С. О. (2024). *Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України*. Інститут відновлюваної енергетики НАНУ. <https://doi.org/10.36296/atlas-2024>.
2. Корольчук, Ю. (2013, 14 липня). *Відновлювана енергетика: перспективи України*. Радіо Свобода. <https://www.radiosvoboda.org/a/25044801.html>.
3. Interfax-Ukraine. (2025, 9 січня). *Потужності СЕС у 2024 р. зросли на 800-850 МВт - голова АСЕУ*. Інтерфакс-Україна. <https://interfax.com.ua/news/press-conference/1039623.html>.
4. 7 лютого – публічний звіт Голови Держенергоефективності Сергія Савчука «Розвиток сфери енергоефективності та «зеленої» енергетики в Україні: Підсумки 2018 р. і плани на 2019 рік». (б. д.). Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. <https://sace.gov.ua/news/7-liutogo-publicinii-zvit-golovi-derzenergoefektivnosti-sergiia-savcuka-rozvitok-sferi-energoefektivnosti-ta-zelenoyi-energetiki-v-ukrayini-pidsumki-2018-r-i-plani-na-2019-rik>.
5. Camarasa, C., Kalahasthi, L. K., & Rosado, L. (2020). Drivers and barriers to energy-efficient technologies (EETs) in EU residential buildings. *Energy and Built Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.08.002>.
6. Jäger-Waldau, A. (2019). *Pv status report 2019*, Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/326629>.
7. Anuphappharadorn, S., Sukchai, S., Sirisamphanwong, C., & Ketjoy, N. (2014). Comparison the economic analysis of the battery between lithium-ion and lead-acid in PV stand-alone application. *Energy Procedia*, 56, 352–358. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.167>.
8. Zharkin, A. F., Popov, V. A., Yarmoliuk, O. S., & Natalych, V. O. (2023). Features of organization and use of energy storage systems in distribution networks. *POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology*, (3). <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2022.271492>.
9. May, G. J., Davidson, A., & Monahov, B. (2018). Lead batteries for utility energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*, 15, 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.11.008>.
10. Chatzigeorgiou, N. G., Theocharides, S., Makrides, G., & Georghiou, G. E. (2024). A review on battery energy storage systems: Applications, developments, and research trends of hybrid installations in the end-user sector. *Journal of Energy Storage*, 86, 111192. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111192>.
11. Rey, S. O., Romero, J. A., Romero, L. T., Martínez, À. F., Roger, X. S., Qamar, M. A., Domínguez-García, J. L., & Gevorkov, L. (2023). Powering the future: A comprehensive review of battery energy storage systems. *Energies*, 16(17), 6344. <https://doi.org/10.3390/en16176344>.
12. Kirli, D., & Kiprakis, A. (2020). Techno-economic potential of battery energy storage systems in frequency response and balancing mechanism actions. *The Journal of Engineering*, 2020(9), 774–782. <https://doi.org/10.1049/joe.2019.1053>.
13. Wimmmler, C., Hejazi, G., Fernandes, E. d. O., Moreira, C., & Connors, S. (2015). Multi-Criteria decision support methods for renewable energy systems on islands. *Journal of Clean Energy Technologies*, 3(3), 185–195. <https://doi.org/10.7763/jocet.2015.v3.193>.
14. Lai, C. S., & McCulloch, M. D. (2017). Levelized cost of electricity for solar photovoltaic and electrical energy storage. *Applied Energy*, 190, 191–203. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.153>.
15. IRENA (2017), *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>.
16. May, G. J., Davidson, A., & Monahov, B. (2018b). Lead batteries for utility energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*, 15, 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.11.008>.
17. *European Commission* (2014d). *Energy Storage. Thematic Research Summary*. https://energy.ec.europa.eu/publications/study-energy-storage_en.
18. *EASE/EERA* (2013a). *Joint EASE/EERA Recommendations for European Energy Storage Technology Development Roadmap towards 2030*. http://www.ease-storage.eu/tl_files/ease-documents/Stakeholders.
19. *EASE/EERA* (2013 b), *Joint EASE/EERA recommendations for European Energy Storage Technology Development Roadmap towards 2030; Technical Annex*. www.ease-storage.eu/tl_files/ease-documents.
20. Beaudin, M., Zareipour, H., Schellenberglobe, A., & Rosehart, W. (2010). Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review. *Energy for Sustainable Development*, 14(4), 302–314. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.09.007>.

21. Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3), 291–312. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>.
22. Schoenung, Susan & Hassenzuhl, William. (2003). Long-vs. Short-Term Energy Storage Technologies Analysis A Life-Cycle Cost Study A Study for the DOE Energy Storage Systems Program. Sandia Report SAND.
23. DG ENER Working Paper (2013). The future role and challenges of Energy Storage. http://ec.europa.eu/energy/infrastructure/Ccc/energy-storage/2013/energy_storage.pCf.
24. Tazvinga, H., Zhu, B., & Xia, X. (2015). Optimal power flow management for distributed energy resources with batteries. *Energy Conversion and Management*, 102, 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.015>.
25. Nosrat, A., & Pearce, J. M. (2011). Dispatch strategy and model for hybrid photovoltaic and trigeneration power systems. *Applied Energy*, 88(9), 3270–3276. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.044>.

References

1. Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh dzherel enerhii Ukrainy [Atlas of the energy potential of renewable energy sources of Ukraine]/ *Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NANU - Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine*. <https://doi.org/10.36296/atlas-2024>.
2. Korolchuk, Yu. (2013, 14th of July). Vidnovliuvana enerhetyka: perspektyvy Ukrainy [Renewable energy: prospects for Ukraine]. *Radio Svoboda – Radio Svoboda*. <https://www.radiosvoboda.org/a/25044801.html>
3. Interfax-Ukraine. (2025, 9th of January). Potuzhnosti SES u 2024 r. zrosly na 800-850 MVt - holova ASEU [SPP capacities to increase by 800-850 MW in 2024 - Head of ASEU]. *Interfax Ukrainy – Interfax of Ukraine*. <https://interfax.com.ua/news/press-conference/1039623.html>.
4. 7th of February – publichnyi zvit Holovy Derzhenerhoefektyvnosti Serhiia Savchuka «Rozvytok sfery enerhoefektyvnosti ta «zelenoi» enerhetyky v Ukraini: Pidsumky 2018 r. i plany na 2019 rik». (n.d.). [Public report of the Head of the State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine Serhii Savchuk "Development of Energy Efficiency and Green Energy in Ukraine: Results of 2018 and Plans for 2019" (n.d.). *Derzhavne ahentstvo z enerhoefektyvnosti ta enerhozberezhennia Ukrainy – State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine*. <https://sae.gov.ua/news/7-liutogo-publichnyi-zvit-golovi-derzhenergoefektivnosti-sergiia-savchuka-rozvitok-sferi-energoefektivnosti-ta-zelenoyi-energetiki-v-ukrayini-pidsumki-2018-r-i-plani-na-2019-rik>.
5. Camarasa, C., Kalahasthi, L. K., & Rosado, L. (2020). Drivers and barriers to energy-efficient technologies (EETs) in EU residential buildings. *Energy and Built Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.08.002>.
6. Jäger-Waldau, A. (2019). *Pv status report 2019*, Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/326629>.
7. Anuphappharadorn, S., Sukchai, S., Sirisamphanwong, C., & Ketjoy, N. (2014). Comparison the economic analysis of the battery between lithium-ion and lead-acid in PV stand-alone application. *Energy Procedia*, 56, 352–358. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.167>.
8. Zharkin, A. F., Popov, V. A., Yarmoliuk, O. S., & Natalych, V. O. (2023). Features of organization and use of energy storage systems in distribution networks. *POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology*, (3). <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2022.271492>.
9. May, G. J., Davidson, A., & Monahov, B. (2018). Lead batteries for utility energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*, 15, 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.11.008>.
10. Chatzigeorgiou, N. G., Theocharides, S., Makrides, G., & Georghiou, G. E. (2024). A review on battery energy storage systems: Applications, developments, and research trends of hybrid installations in the end-user sector. *Journal of Energy Storage*, 86, 111192. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111192>.
11. Rey, S. O., Romero, J. A., Romero, L. T., Martínez, À. F., Roger, X. S., Qamar, M. A., Domínguez-García, J. L., & Gevorkov, L. (2023). Powering the future: A comprehensive review of battery energy storage systems. *Energies*, 16(17), 6344. <https://doi.org/10.3390/en16176344>.
12. Kirli, D., & Kiprakis, A. (2020). Techno-economic potential of battery energy storage systems in frequency response and balancing mechanism actions. *The Journal of Engineering*, 2020(9), 774–782. <https://doi.org/10.1049/joe.2019.1053>.

13. Wimpler, C., Hejazi, G., Fernandes, E. d. O., Moreira, C., & Connors, S. (2015). Multi-Criteria decision support methods for renewable energy systems on islands. *Journal of Clean Energy Technologies*, 3(3), 185–195. <https://doi.org/10.7763/jocet.2015.v3.193>.
14. Lai, C. S., & McCulloch, M. D. (2017). Levelized cost of electricity for solar photovoltaic and electrical energy storage. *Applied Energy*, 190, 191–203. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.153>.
15. IRENA (2017), Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>.
16. May, G. J., Davidson, A., & Monahov, B. (2018b). Lead batteries for utility energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*, 15, 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.11.008>.
17. European Commission (2014d). Energy Storage. Thematic Research Summary. https://energy.ec.europa.eu/publications/study-energy-storage_en.
18. EASE/EERA (2013a). Joint EASE/EERA Recommendations for European Energy Storage Technology Development Roadmap towards 2030. http://www.ease-storage.eu/tl_files/ease-documents/Stakeholders.
19. EASE/EERA (2013 b), Joint EASE/EERA recommendations for European Energy Storage Technology Development Roadmap towards 2030; Technical Annex. www.ease-storage.eu/tl_files/ease-documents.
20. Beaudin, M., Zareipour, H., Schellenberglobe, A., & Rosehart, W. (2010). Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review. *Energy for Sustainable Development*, 14(4), 302–314. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.09.007>.
21. Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3), 291–312. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>.
22. Schoenung, Susan & Hassenzahl, William. (2003). Long-vs. Short-Term Energy Storage Technologies Analysis A Life-Cycle Cost Study A Study for the DOE Energy Storage Systems Program. Sandia Report SAND.
23. DG ENER Working Paper (2013). The future role and challenges of Energy Storage. http://ec.europa.eu/energy/infrastructure/Ccc/energy-storage/2013/energy_storage.pCf.
24. Tazvinga, H., Zhu, B., & Xia, X. (2015). Optimal power flow management for distributed energy resources with batteries. *Energy Conversion and Management*, 102, 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.015>.
25. Nosrat, A., & Pearce, J. M. (2011). Dispatch strategy and model for hybrid photovoltaic and trigeneration power systems. *Applied Energy*, 88(9), 3270–3276. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.044>.

Отримано 23.06.2025

UDC 621.355

Dmytro Zakharchenko¹, Serhii Stepenko²

¹PhD student, junior researcher at the Mine Action Center of the Ministry of Defense of Ukraine
National University "Chernihiv Polytechnic" (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: dimazakhar@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3009-5648>. **ResearcherID:** [AFH-3544-2022](https://orcid.org/0000-0003-3009-5648)

²PhD in electrical engineering, Associate Professor, Leading Research Scientist,
Associate Professor at the Electrical Engineering, Information and Measurement Technologies Department
National University "Chernihiv Polytechnic" (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: serhii.stepenko@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7702-6776>
ResearcherID: [F-1018-2014](https://orcid.org/0000-0001-7702-6776). **SCOPUS Author ID:** [55570068000](https://orcid.org/0000-0001-7702-6776)

RESEARCH OF ELECTRICITY STORAGE ELEMENTS IN AUTONOMOUS ELECTRIC POWER SYSTEMS BASED ON PHOTOELECTRIC CONVERTERS

Stationary solar power plants consisting of an array of solar panels are one of the most important components of autonomous power grids. Given the variety of existing topologies and methods for tracking the maximum power point, the purpose of this work is to review converter topologies, classify MPPT algorithms and their comparative analysis. Based on the analytical review, a comparative table for the considered algorithms was compiled.

By comparing the main MPRT algorithms, it was found that intelligent algorithms have a number of advantages over basic ones. However, implementation of these algorithms is complex and requires more computational resources, which until recently was a significant problem. Autonomous power systems based on distributed independent sources of generation are attracting increasing attention due to the fact that they show the ability to significantly save energy and reduce pollutant emissions due to high prevalence of renewable energy sources (RES).

Compared to the use of electricity from traditional power plants, significant changes in requirements for the amount of electricity consumption, combined with uncertainty about available solar and wind energy for the required power generation, require implementation of energy storage systems to mitigate intermittency problems and to meet requirements of the peak electricity consumption. In the autonomous electric power system, energy storage technologies usually exist in the form of electrochemical energy storage and thermal energy storage.

The cost and technological capabilities of energy storage systems are key parameters that affect optimal design and operation of the system. In this paper, the analysis and study of the technical and economic impact of various storage technologies for optimal design and operation of autonomous electric power systems were conducted.

Key words: autonomous electrical networks; electric power systems; electricity storage devices; technical indicators; economic indicators; efficiency; photovoltaic converters; comparative analysis.

Fig.: 1. Tables: 2. References: 22.

Дмитрій Анатолійович Шокодзько¹, Максим Анатолійович Хоменко²

¹аспірант кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: shokodko.dima@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7953-6947>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехнічних та вбудованих систем Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: mr.homax@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9084-3527>

ВИБІР СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

У статті представлено комплексний підхід до вибору фотоелектричних перетворювачів для автономної сонячної електростанції для забезпечення безперервної зарядки мультироторних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в умовах обмеженого доступу до традиційних джерел енергії. Проведено детальний аналіз параметрів роботи БПЛА, що включає розрахунок кількості зарядок акумуляторів протягом доби, оцінку загальної енергетичної потреби та оптимізацію конфігурації сонячного масиву з урахуванням місцевих кліматичних особливостей. Зокрема, здійснено порівняльний аналіз ефективності різних типів сонячних панелей (монокристалічних, полікристалічних та тонкоплівкових) та вплив технологічних характеристик акумуляторів (LiFePO₄ проти AGM/GEL) на загальну продуктивність системи. Результати дослідження демонструють, що застосування високоефективних сонячних панелей у поєднанні з оптимальними технологіями зберігання енергії дозволяє значно підвищити автономність та оперативність БПЛА, що має важливе значення як у військових, так і в цивільних операціях. Отримані висновки сприяють подальшому вдосконаленню систем живлення та можуть бути використані для розробки надійних і мобільних енергетичних рішень у різних сферах діяльності.

Ключові слова: БПЛА; сонячні панелі; інсоляція; автономні системи живлення; оптимізація енергетичних параметрів.

Рис.: 6. Табл.: 2. Бібл.: 30.

Актуальність теми дослідження. Зростання попиту на використання мультироторних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у військових і цивільних операціях підкреслює необхідність розробки надійних автономних систем живлення. Особливо актуальною є проблема забезпечення безперервної роботи БПЛА в умовах, де традиційні джерела енергії можуть бути недоступні або небезпечні. Використання автономних систем живлення, зокрема сонячних електростанцій, здатних забезпечити бездротову зарядку БПЛА, є перспективним вирішенням цієї проблеми.

У контексті військових операцій, автономні системи живлення можуть забезпечити високу мобільність і тривалість місій, що є критично важливим у ситуаціях, де доступ до традиційних джерел живлення обмежений або неможливий. Крім того, використання бездротових технологій зарядки знижує ризики, пов'язані з необхідністю фізичного контакту із зарядною станцією, що може бути важливим у бойових умовах.

Останні дослідження у сфері автономних систем живлення та бездротових технологій зарядки підтверджують можливість значного підвищення ефективності та автономності мультироторних БПЛА. Проте, інтеграція цих технологій у єдину систему, здатну забезпечити стабільне живлення у складних умовах експлуатації, досі залишається недостатньо вивченою.

Таким чином, дослідження, спрямовані на розробку та оптимізацію автономних систем живлення для мультироторних БПЛА, є актуальними та необхідними. Вони сприятимуть підвищенню ефективності використання БПЛА в різних сферах, включаючи військову, цивільну та гуманітарну діяльність.

Постановка проблеми. Забезпечення безперервного живлення мультироторних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є однією з ключових проблем, з якими стикаються користувачі цих систем у військових і цивільних операціях. Традиційні джерела енергії, такі як акумуляторні батареї, мають обмежену ємність, що обмежує тривалість польотів та потребує частого перезаряджання. Це створює необхідність у наявності стаціонарних зарядних станцій, що в умовах бойових дій або на важкодоступних територіях може бути неприйнятним або небезпечним.

Іншою значною проблемою є залежність від погодних умов, яка впливає на ефективність традиційних джерел енергії, таких як сонячні панелі. Хмарність, пил, і інші фактори можуть значно знижувати ефективність сонячних панелей, що ускладнює стабільне забезпечення живленням БПЛА в умовах польових операцій.

Отже, постає проблема розробки та впровадження автономної системи живлення для мультироторних БПЛА, яка б була здатна забезпечити стабільну роботу БПЛА навіть у складних умовах. Це завдання вимагає інтеграції передових технологій у сфері відновлюваних джерел енергії, електроніки та систем управління, а також проведення детальних розрахунків для оптимізації енергетичних параметрів системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні десять років питання енергетичної автономності безпілотних літальних апаратів (БПЛА) розглядалися переважно у двох напрямках: підвищення ефективності джерел живлення (сонячні панелі, паливні елементи, акумуляторні технології) та організація наземної інфраструктури для швидкого або бездротового поповнення заряду. Узагальнений огляд Sornek та ін. [1] показує, що саме ці два вектори охоплюють понад 80 % публікацій останнього десятиріччя.

У роботі Green та ін. наведено найповніші зведені дані щодо зростання ККД фотоелектричних технологій: монокристалічні Si-елементи сьогодні досягають ≈ 26 % у лабораторних зразках, тоді як тонкоплівкові CdTe/CIGS ≈ 22 % за меншої питомої маси [2]. Bett і Dimroth показали, що III–V-комполімерні елементи (GaAs, GaInP/GaAs) ефективно працюють за підвищених температур і під концентрованою інсоляцією, що особливо цікаво для мобільних сонячних масивів БПЛА-портів, але їхня вартість залишається найвищою [3]. Окремий клас робіт стосується перовскітних елементів: Castro-Hermosa продемонстрував друк гнучких модулів на паперових основах з ефективністю понад 17 %, однак деградаційні процеси скорочують їх ресурс до 1–2 років [4].

Пошуки альтернативних або комбінованих джерел живлення тривають. Shuhayeu та ін. довели, що гібрид «Li-ion + PEM fuel cell» збільшує запас енергії середньої платформи майже у 2,5 рази без критичного приросту маси [5]. Щодо накопичувачів енергії, Cao та ін. показали ресурсність LiFePO₄-батареї > 2000 циклів із ККД > 95 % [6], а Huang та ін. розробили швидкі стратегії заряджання, які не погіршують деградацію комірок [7]. Для стаціонарних рішень досі застосовуються AGM/GEL-акумулятори, але їх сумарний ККД (70–85 %) збільшує габарити фотоелектричного масиву [8].

Щодо інфраструктури заряджання, найпоширенішим залишається дротове живлення (наприклад, штатний 100-Вт блок DJI Mavic 3 Pro [9; 10]). Водночас інтенсивно розробляються безконтактні методи: Ağcal і Doğan створили складану індуктивну станцію з ККД $\approx 97,7$ % при 100 Вт та толерантністю до 10 см зміщення приймача [11]; у фінансованому DARPA проєкті Mahbub досліджуються фазовані антенні ґратки для далекого power-beaming [12]. Концепцію безперервної місії продемонструвала система AutoCharge: десятигодинний експериментальний цикл «політ - самодокування - заряджання - зліт» підтвердив життєздатність рішення [13].

Енергетичний баланс наземних сонячних постів суттєво залежить від регіональної інсоляції; згідно з даними Global Solar Atlas для Чернігівщини середньорічне значення становить 3.61–3.88 кВт·год/м² [14]. Це диктує необхідність оптимізації площі фотомасиву та вибору акумуляторів з урахуванням циклічних навантажень.

Підсумовуючи, сучасні дослідження окреслили ефективні фотоелектричні, паливно-елементні та акумуляторні рішення, а також продемонстрували прототипи індуктивних і радіочастотних систем підзарядки. Водночас інтегровані методики, що одночасно оптимізують конфігурацію джерел, графік польотів і деградацію накопичувачів енергії в реальних польових умовах, залишаються недостатньо розробленими.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри суттєвий прогрес у підвищенні ефективності окремих компонентів системи живлення, комплексне завдання забезпечення безперервної роботи рою БПЛА зі змінним профілем навантаження має низку нерозв'язаних аспектів:

- **Сумісна оптимізація** конфігурації сонячного масиву, вибору типу акумуляторів та графіка польотів / заряджання трьох і більше БПЛА у реальному часі. Наявні моделі зазвичай розглядають або енергобаланс одного БПЛА [5], або лише статичний підбір площі фотополу без урахування динаміки місії [15].

- **Адаптивні MPPT алгоритми** для швидко змінних умов (часткове затінення мобільних панелей, пил, роса). Фізичні прототипи, що враховують такі фактори, у відкритій літературі практично відсутні.

- **Високочастотна бездротова передача енергії (WPT)** у польових умовах, зокрема оцінка ККД та електромагнітної сумісності при живленні кількох БПЛА одночасно. Існуючі демонстрації індуктивних або радіочастотних систем виконані здебільшого в лабораторних умовах і не враховують втрати на рельєф місцевості та потребу в швидкому наведенні [11; 12].

- **Моделювання деградації LiFePO₄ батарей** під дією високих пікових струмів швидкого заряджання («100 Вт за ≤ 1 год») та температурних коливань ($-20...+40$ °C) у польових умовах – опубліковані роботи аналізують переважно кімнатні або лабораторні температури [7].

- **Економічна й логістична складова:** відсутні системні порівняння повної вартості володіння (ТСО) польових сонячних зарядних постів із дизель-генераторними чи гібридними схемами, особливо в контексті військових або рятувальних операцій.

Зазначені прогалини зумовлюють потребу у створенні **інтегрованої методики**, що одночасно охоплює технічні, енергетичні та експлуатаційні показники системи, а також у розробці експериментального прототипу для валідації розрахункових моделей у наближених до реальних умовах.

Мета роботи. Метою цієї статті є розробка та обґрунтування автономної системи живлення для мультироторних безпілотних літальних апаратів (БПЛА), яка забезпечує зарядку в умовах, де традиційні джерела енергії можуть бути недоступні або небезпечні. Зокрема, у роботі поставлено завдання розрахунку параметрів автономної сонячної електростанції, здатної забезпечити стабільне живлення БПЛА протягом тривалих місій, враховуючи змінні погодні умови та особливості експлуатації в польових умовах.

Основними задачами, що вирішуються у статті є:

- Визначення оптимальної кількості зарядок акумуляторів БПЛА, необхідних для забезпечення безперервної роботи протягом доби.

- Розрахунок загальної енергії, необхідної для зарядки акумуляторів у польових умовах.

- Вибір та обґрунтування параметрів сонячних панелей, що забезпечують максимальну ефективність у різних кліматичних умовах.

Досягнення поставленої мети дозволить розробити ефективну та надійну систему живлення для мультироторних БПЛА, що сприятиме підвищенню їхньої автономності та ефективності у військових і цивільних операціях.

Виклад основного матеріалу. Типова структурна схема сонячної автономної системи живлення показана на рис. 1. Вона складається з масиву сонячних панелей, які збирають сонячну енергію та підключені до контролера, що, у свою чергу, відстежує точку максимальної потужності (MPPT) і регулює струм і напругу для максимізації вихідної потужності. Акумулятори накопичують надлишкову енергію. Змінний струм забезпечується шляхом перетворення постійного струму інвертором. DC-навантаження може бути підключене безпосередньо до акумуляторів, а AC-навантаження — до виходу інвертора.

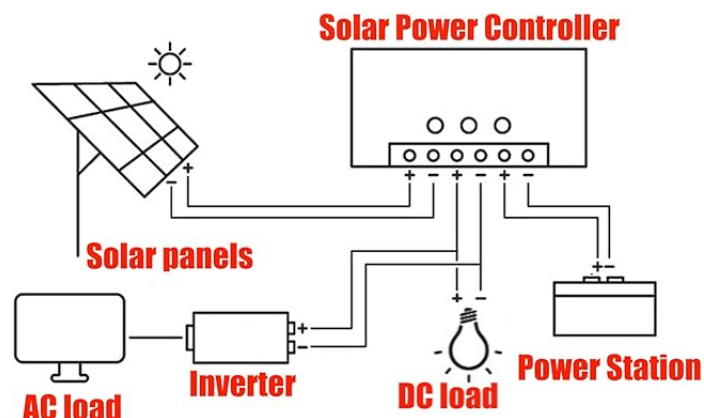


Рис. 1. Типова структурна схема сонячної автономної системи живлення
Джерело: складено авторами.

Ефективність сонячної панелі кількісно визначає її здатність перетворювати сонячне світло в електроенергію. На рис. 2 перераховані різні матеріали сонячних панелей [2]. Монокристалічні (Mono-Si) та полікристалічні (Poly-Si) сонячні панелі широко застосовуються та мають високу ефективність перетворення. Саме вони є найбільш доступними на ринку.

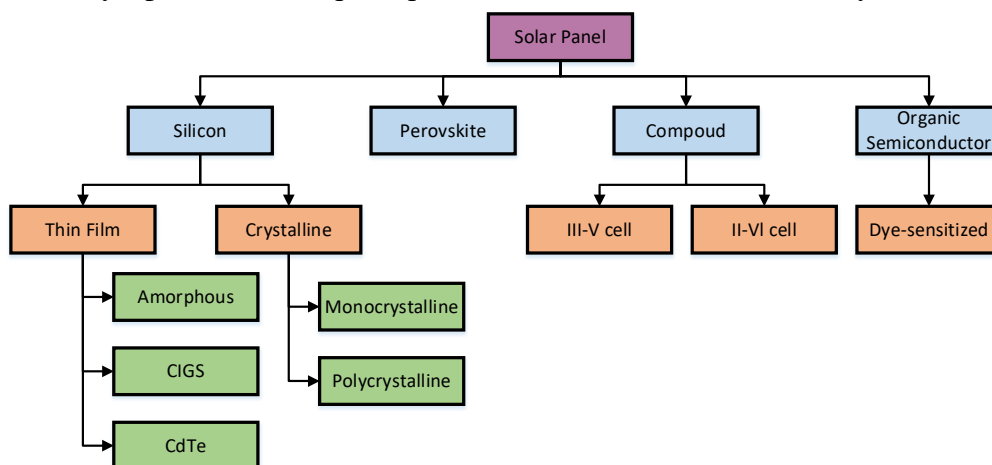


Рис. 2. Типи сонячних панелей

Джерело: [2].

Тонкоплівковий сонячний елемент — це сонячна батарея другого покоління, яка виготовляється шляхом нанесення одного або кількох тонких шарів (тонкої плівки, TF) фотоелектричного матеріалу на підкладку, таку як скло, пластик або метал. Аморфний кремій є некристалічною, алотропною формою кремнію і найбільш розвиненою тонкоплівковою технологією сьогодні. Він має нижчу ефективність перетворення в порівнянні з кристалічними сонячними панелями. Однак його можна виготовляти в різних розмірах і формах, і він використовується в різних сферах застосування.

Тонкоплівкові елементи на основі телуриду кадмію (CdTe) та міді-індію-галію-диселеніду (CIGS) були розроблені в лабораторіях і досягли значного успіху. Деякі зразки CIGS демонструють ККД до 23 % [2]. Однак тонкоплівкові елементи на основі кремнію мають менше проблем, ніж їх аналоги CdTe і CIGS, оскільки останні мають токсичні компоненти (CdTe) або складний у виробництві матеріал (CIGS).

З комбінованих сонячних елементів, які можуть досягти найвищої ефективності, GaAs забезпечує ККД близько 25,1 %. Цей тип сонячних елементів має унікальні особливості, такі як висока радіаційна стійкість і стабільна робота при високих температурах. Через нечутливість до підвищеної температури концентратори часто використовуються

для підвищення ефективності сонячного елемента, змушуючи сонячну батарею працювати при вищій напрузі і більшій щільності струму. Такий підхід виглядає перспективним, але потребує значних витрат на монтаж [3].

Перспективним напрямом розвитку є перовскітні сонячні елементи, які за останні роки набули значної популярності завдяки низькій вартості та високій ефективності перетворення. Очікується, що вони стануть високоефективною та недорогою альтернативою, оскільки можуть виготовлятися простими й швидкими методами, такими як друк [4]. Однак головною проблемою перовскітних елементів є їхня стабільність і довговічність. Матеріал з часом деградує, що призводить до зниження загальної ефективності [16].

На сучасному ринку сонячних панелей найбільш поширеними є Mono-Si, Poly-Si та аморфні панелі завдяки їхній високій стабільності, ефективності перетворення та широкій застосовності [15]. Отже, саме ці три типи панелей і будуть основними об'єктами дослідження.

Для розрахунку параметрів сонячної автономної електростанції, яка забезпечуватиме заряджання акумуляторів типу LiPo4S для БПЛА MAVIC V3 [9], будемо дотримуватися такого плану:

1. Розрахунок кількості необхідних зарядок акумуляторів протягом доби.
2. Розрахунок енергії, необхідної для зарядки акумуляторів протягом доби.
3. Розрахунок кількості сонячних панелей.

1. Розрахунок кількості необхідних зарядок акумуляторів протягом доби:

З документації на БПЛА MAVIC V3 [10] ми маємо такі параметри:

- Ємність акумулятора : 5000 мА·год;
- Стандартна напруга: 15.4 В;
- Енергія: 77 Вт·год;
- Температура заряджання: від 5° до 40° С (від 41° до 104° F);
- Вихідна потужність: 100 Вт;
- Час польоту 46 хвилин;
- Час повного заряду 1 година 20 хвилин.

Кількість зарядок акумуляторів на добу визначається за формулою:

$$N_{\text{зарядок}} = \frac{T_{\text{доб}}}{t_{\text{політ}} + t_{\text{заряд}}} \cdot N_{\text{БПЛА}}; \quad (1)$$

де $T_{\text{доб}}$ — тривалість доби (1440 хвилин), $t_{\text{політ}}$ — час розряду акумулятора під час польоту (хв), $t_{\text{заряд}}$ — час повного заряду акумулятора (хв), $N_{\text{БПЛА}}$ — кількість БПЛА (шт.).

Розглянемо декілька можливих сценаріїв використання з залученням різної кількості БПЛА.

БПЛА може мати два стани: 0 - зарядка (80 хв), 1 – політ(46 хв).

Поведінка одного БПЛА представлено на рис. 3.

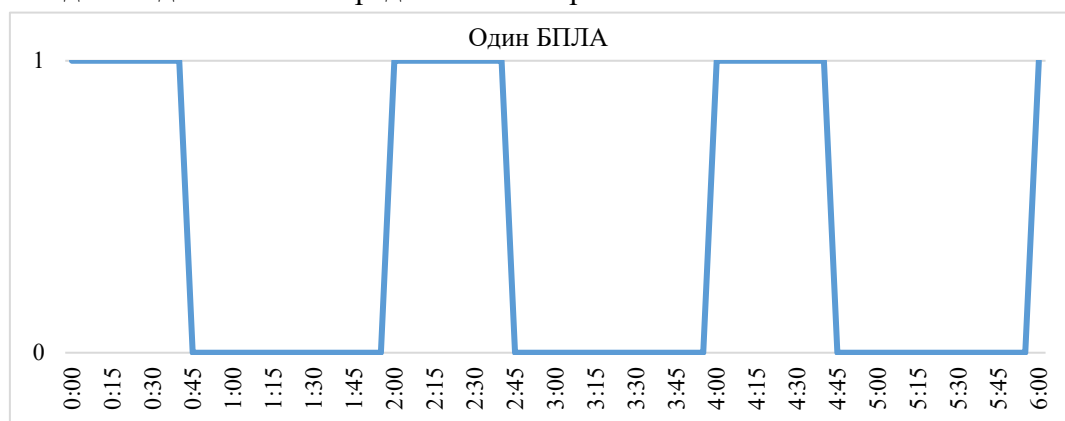


Рис. 3. Часова діаграма роботи одного БПЛА

На основі діаграми роботи одного БПЛА розрахуємо кількість зарядок:

$$N_{\text{зарядок}} = \frac{1440 \text{ хв}}{46 \text{ хв} + 80 \text{ хв}} \cdot 1 \approx 11,43;$$

Це означає, що один БПЛА потребує приблизно 11,43 зарядки на добу.

Поведінка двох БПЛА представлено на рис. 4.

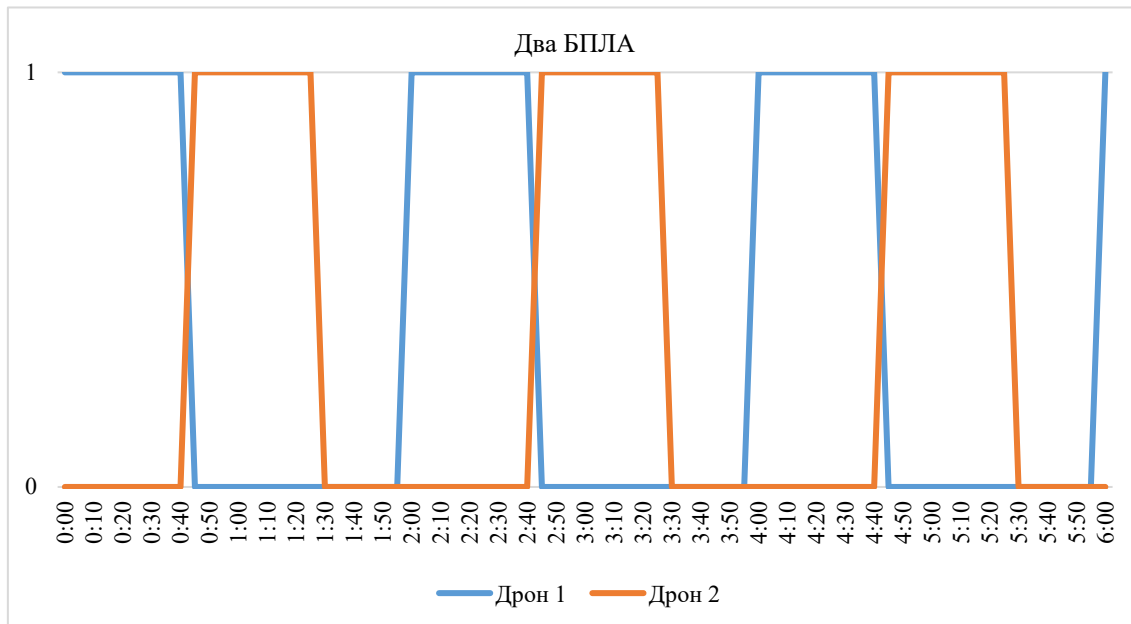


Рис. 4. Часова діаграма роботи двох БПЛА

На основі діаграми роботи двох БПЛА розрахуємо кількість зарядок:

$$N_{\text{зарядок}} = \frac{1440 \text{ хв}}{46 \text{ хв} + 80 \text{ хв}} \cdot 2 \approx 22,86;$$

Це означає, що два БПЛА потребує приблизно 22,86 зарядки на добу.

Поведінка трьох БПЛА представлено на рис. 5.

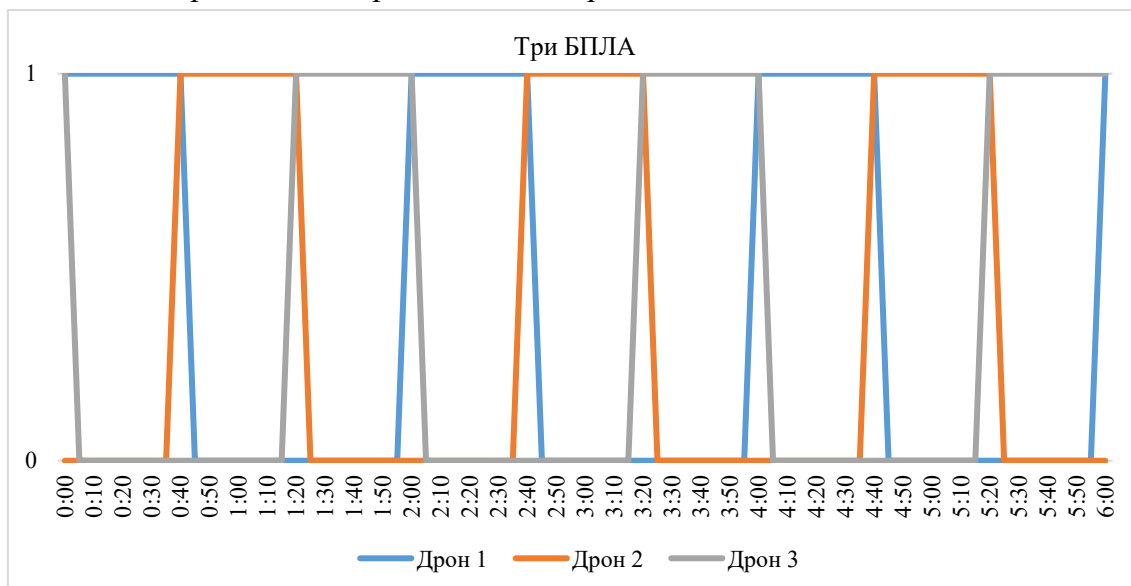


Рис. 5. Часова діаграма роботи трьох БПЛА

На основі діаграми роботи трьох БПЛА розрахуємо кількість зарядок:

$$N_{\text{зарядок}} = \frac{1440 \text{ хв}}{46 \text{ хв} + 80 \text{ хв}} \cdot 3 \approx 34,29;$$

Це означає, що три БПЛА потребує приблизно 34,29 зарядки на добу.
Поведінка чотирьох БПЛА представлено на рис. 6.

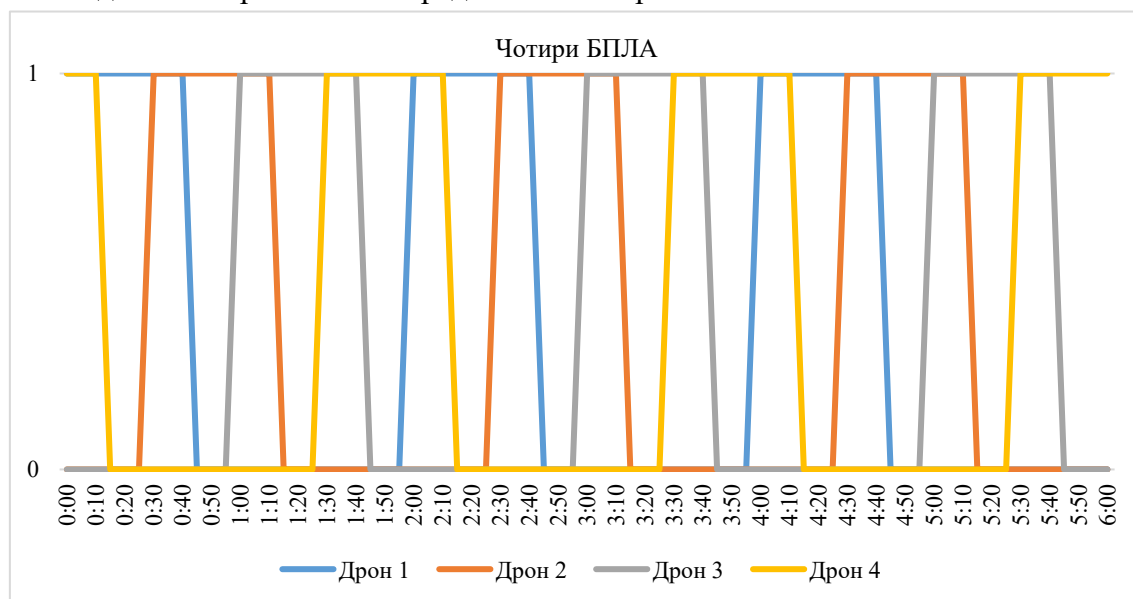


Рис. 6. Часова діаграма роботи чотирьох БПЛА

На основі діаграми роботи чотирьох БПЛА розрахуємо кількість зарядок:

$$N_{\text{зарядок}} = \frac{1440 \text{ хв}}{46 \text{ хв} + 80 \text{ хв}} \cdot 4 \approx 45,71;$$

Це означає, що чотири БПЛА потребує приблизно 45,71 зарядки на добу.

Як можна побачити, то використання лише одного чи двох БПЛА не достатньо для того щоб постійно в небі перебував хоч один, задовільним варіантом є використання від трьох БПЛА, за такої умови можна забезпечити постійну повітряну розвідку.

2. Розрахунок енергії, необхідної для зарядки акумуляторів протягом доби:

Виконаємо розрахунки при використанні трьох БПЛА.

Загальна енергія для зарядки акумуляторів протягом доби розраховується за формулою:

$$E_{\text{заг}} = N_{\text{зарядок}} \cdot E_{\text{зарядки}}; \quad (2)$$

де $E_{\text{заг}}$ – загальна енергія (Вт·год), $N_{\text{зарядок}} = 35$ – кількість зарядок на добу для трьох БПЛА, $E_{\text{зарядки}} = 100$ Вт·год – енергія зарядки.

$$E_{\text{заг}} = 35 \cdot 100 = 3500 \text{ Вт} \cdot \text{год};$$

Це підтверджує необхідність генерації 3 кВт·год енергії для кількох БПЛА.

Джерело: Інструкція до БПЛА Mavic 3 Pro [10].

3. Розрахунок енергії, необхідної для зарядки акумуляторів протягом доби:

Розрахуємо кількість сонячних панелей в залежності від їх типу. Будемо розглядати три типи панелей: Аморфні (тонкопівкові), Mono-Si (монокристалічні) та Poly-Si (полікристалічні).

Виходячи з даних про інсоляцію, розрахуємо необхідну потужність для кожного місяця.

З джерела [14] були взяті наступні дані для Чернігівської області:

Для того щоб отримувати 3.5 кВт (3500 Вт) енергії протягом дня в Чернігівській області, нам потрібно врахувати середню інсоляцію для цієї місцевості.

Згідно з даними, середнє значення глобальної інсоляції на нахиленій площині (GTI) для Чернігова становить **3,61 – 3,88 кВт·год/м²** на день.

Кількість сонячних панелей обчислюється за формулою:

$$N_{\text{панелей}} = \frac{E_{\text{заг}}}{\eta_{\text{панелі}} \cdot \eta_{\text{інвертора}} \cdot \eta_{\text{контролера}} \cdot \eta_{\text{акумулятора}} \cdot A \cdot I}; \quad (3)$$

де $E_{\text{заг}} = 3500 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 3,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ – необхідна добова енергія, $I = 3,61 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$ – середня інсоляція на нахилений площині, A – площа однієї панелі, $\eta_{\text{панелі}}$ – ККД панелі, $\eta_{\text{інвертора}}$ – ККД інвертора (зазвичай 90-95 %), $\eta_{\text{контролера}}$ – ККД контролера заряду (зазвичай 95-98%), $\eta_{\text{акумулятора}}$ – ККД акумулятора (залежить від типу: LiFePO_4 [7] ≈ 95 -98 %, свинцево-кислотні (AGM/GEL) [8] ≈ 70 -85 %).

$\eta_{\text{панелі}}$ розраховується за формулою:

$$\eta_{\text{панелі}} = \frac{P}{A \cdot E}; \quad (4)$$

де P – номінальна потужність панелі (Вт), A – площа однієї панелі (м^2), E – стандартна сонячна інтенсивність ($1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$).

У таблиці 1 наведені параметри для різних панелей.

Примітки:

- Т – Тонкоплівна панель
- П – Полікристалічна панель
- М – Монокристалічна панель

Таблиця 1. – Параметри різних панелей

Назва панелі	Тип	Площа (м^2)	Вага (кг)	Потужність, (Вт)	Потужність, ($\text{Вт}/\text{м}^2$)	Ефективність, η , (%)	Ціна, (\$)
EcoFlow 100W Flexible Solar Panel [17]	Т	0,64566	2,3	100	155	15,48	145
Altek ALF-120W [18]	Т	0,7571	2	120	158,5	15,84	100
NEO Tools 200W [19]	Т	1,12535	4,2	200	177	17,77	370
Axioma Energy AX-100P [20]	П	0,64655	6,5	100	155	15,46	75
Volt Polska 5PVPOL180 [21]	П	0,9916	9,8	180	181,5	18,15	100
Altek ALM-285M-120 [22]	П	1,65168	18,8	285	172,5	17,25	140
Jinko Solar JKM325PP-72 [23]	П	1,94035	22,5	325	167,5	16,74	125
ZMS331 [24]	М	0,57428	6,2	100	175	17,41	88
Axioma Energy AX-200M [25]	М	1,092	12,8	200	183	18,31	130
JA Solar JAM6 [26]	М	1,6335	18,7	300	183,5	18,36	130
Risen RSM40-8-400M [27]	М	1,92238	21	400	208	20,8	90
JA Solar JAM6S30 [28]	М	2,3746	26,3	500	210,5	21,05	74
Longi Solar LR5-72HTH-585M [29]	М	2,58325	27,5	585	226,5	22,64	120
LogicPower LP Half-Cell 700W [30]	М	3,10635	-	700	225	22,53	150

Слід вибирати все обладнання високої ефективності. Для контролерів та інверторів коефіцієнт має бути 95 % і більше. У разі коли ККД для інверторів становить менше ніж 85 %, 15-20 % від загальної потужності масиву, панелі працюватимуть тільки на інвертор. Якщо електроенергія генерується високотехнологічними дорогими панелями, такі втрати неприпустимі.

У табл. 2 представлено результати розрахунків кількості сонячних панелей, їхні сумарні площі, ваги та вартості для двох варіантів акумуляторів:

- LiFePO_4 (ККД ≈ 95 %);
- AGM/GEL (ККД ≈ 85 %).

Таблиця 2 – Результати розрахунків кількості сонячних панелей, їх сумарної площі, ваги та вартості для двох варіантів акумуляторів

Назва панелі	Тип	Кількість при LiFePO ₄ (шт.)	Кількість при AGM/GEL (шт.)	Площа при LiFePO ₄ (м ²)	Площа при AGM/GEL (м ²)	Вага при LiFePO ₄ (кг)	Вага при AGM/GEL (кг)	Вартість при LiFePO ₄ (\$)	Вартість при AGM/GEL (\$)
EcoFlow 100W Flexible Solar Panel [17]	Т	12	13	7,5	8,4	27,6	29,9	1740	1885
Altek ALF-120W [18]	Т	10	11	7,6	8,3	20	22	1000	1100
NEO Tools 200W [19]	Т	6	7	6,8	7,9	25,2	29,4	2220	2590
Axioma Energy AX-100P [20]	П	12	13	7,8	8,4	78	84,5	900	975
Volt Polska 5PVPOL180 [21]	П	7	8	6,9	7,9	68,6	78,4	700	800
Altek ALM-285M-120 [22]	П	4	5	6,6	8,3	75,2	94	560	700
Jinko Solar JKM325PP-72 [23]	П	4	4	7,8	7,8	90	90	500	500
ZMS331 [24]	М	12	13	6,9	7,5	74,4	80,6	1056	1144
Axioma Energy AX-200M [25]	М	6	7	6,5	7,6	76,8	89,6	780	910
JA Solar JAM6 [26]	М	4	5	6,5	8,2	74,8	93,5	520	650
Risen RSM40-8-400M [27]	М	3	4	5,8	7,7	63	84	270	360
JA Solar JAM66S30 [28]	М	3	3	7,2	7,2	78,9	78,9	222	222
Longi Solar LR5-72HTH-585M [29]	М	2	3	5,2	7,7	55	82,5	360	360
LogicPower LP Half-Cell 700W [30]	М	2	2	6,3	6,3	-	-	300	300

Порівняння за типом акумуляторів

Використання акумуляторів LiFePO₄ дозволяє зменшити необхідну кількість сонячних панелей на **5–15 %** порівняно з AGM/GEL. Це проявляється у зниженні:

- **Кількості панелей:** Наприклад, для EcoFlow 100W Flexible Solar Panel необхідно 12 шт. при використанні LiFePO₄ порівняно з 13 шт. при AGM/GEL.
- **Площі масиву:** Зменшення кількості панелей автоматично знижує сумарну площу, що полегшує монтаж і зменшує просторові вимоги.
- **Ваги та вартості:** Менша кількість панелей призводить до зниження загальної ваги конструкції та економії коштів, що особливо важливо для мобільних або тимчасових установок.

Таким чином, вищий ККД акумуляторів LiFePO₄ сприяє ефективнішому використанню генерованої енергії та оптимізації розмірів і витрат системи.

Порівняння за типами сонячних панелей

Аналізуючи результати для різних типів сонячних панелей, можна виділити наступні тенденції:

• Тонкоплівкові панелі (Т):

Для таких панелей, як EcoFlow 100W, Altek ALF-120W та NEO Tools 200W, використання LiFePO₄ дає змогу зменшити кількість одиниць (на 1 шт. менше), що еквівалентно зниженню вимог приблизно на 8–10 %.

• Полікристалічні панелі (П):

Для даної групи спостерігається більш виражена різниця. Наприклад, для панелей Volt Polska 5PVPOL180 та Altek ALM-285M-120 кількість необхідних одиниць з LiFePO₄ акумуляторами знижується на 1 шт. або більше (іноді до 25 % від вихідної кількості при AGM/GEL).

Це говорить про більшу чутливість розрахунків до ефективності акумуляторної системи у випадку полікристалічних панелей.

- **Монокристалічні панелі (М):**

Деякі з монокристалічних моделей (JA Solar JAM66S30 та LP Half-Cell 700W) демонструють однакові параметри незалежно від типу акумуляторів. Це зумовлено високим ККД монокристалічних панелей, які здатні забезпечити необхідну потужність навіть при дещо нижчій ефективності акумуляторної системи.

Проте з більшістю панелей (ZMS331, Axioma Energy AX-200M, JA Solar JAM6, Risen RSM40-8-400M та Longi Solar LR5-72HTH-585M) лишається тенденція де використання LiFePO_4 дає змогу зменшити кількість одиниць (на 1 шт. менше).

Висновки. Проведені розрахунки та аналіз параметрів системи дають змогу зробити такі висновки:

- **Оптимізація системи:** Використання високоефективних сонячних панелей (монокристалічних, полікристалічних та тонкоплівкових) у поєднанні з акумуляторами LiFePO_4 дозволяє зменшити необхідну кількість панелей, що позитивно впливає на загальну площу, вагу та вартість системи. Це є важливим фактором для мобільних та автономних установок.

- **Економічна ефективність:** Зменшення кількості панелей за рахунок використання акумуляторів з вищим ККД дозволяє оптимізувати витрати на обладнання та монтаж, що сприяє впровадженню таких систем у широкомасштабні проекти.

- **Подальший розвиток:** Отримані результати відкривають можливості для подальшої оптимізації параметрів автономних систем живлення та їх інтеграції у різні сфери застосування, що може суттєво покращити ефективність використання БПЛА як у військових, так і в цивільних операціях.

Таким чином, інтеграція високоефективних сонячних панелей з оптимальними акумуляторними технологіями є перспективним підходом для забезпечення автономного живлення БПЛА. Результати дослідження свідчать про практичну доцільність використання LiFePO_4 акумуляторів для зменшення розмірів і вартості системи, що в свою чергу сприяє підвищенню мобільності та оперативності БПЛА в умовах обмеженого доступу до традиційних джерел енергії.

Список використаних джерел

1. Sornek, K., Augustyn-Nadzieja, J., Rosikoń, I. et al. (2025). Status and development prospects of solar-powered unmanned aerial vehicles – A literature review. *Energies*, 18(8), 1924.10.3390/en18081924.
2. Green, M. A., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., & Ho-Baillie, A. W. (2019). Solar cell efficiency tables (version 54). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27(7), 565–575.
3. Bett, F. Dimroth, Stollwerck, G., & Sulima, O. (1999). Iii-v compounds for solar cell applications. *Applied Physics A*, 69(2), 119–129. <https://doi.org/10.1007/s003390050983>.
4. Castro-Hermosa, S., Dagar, J., Marsella, A., & Brown, T. M. (2017). Perovskite solar cells on paper and the role of substrates and electrodes on performance. *IEEE Electron Device Letters*, 38(9), 1278–1281.
5. Shuhayeu P., Martsinchyk A., Martsinchyk K., & Milewski, J. (2024). Investigating PEM fuel cells as an alternative power source for electric UAVs: Modeling, optimization, and performance analysis. *Energies*, 17(17), 4427. doi: 10.3390/en17174427.
6. Cao, Z., Gao, W., Fu, Y. et al. (2024). Second-life assessment of commercial LiFePO_4 batteries retired from EVs. *Batteries*, 10(9), 306. doi: 10.3390/batteries10090306.
7. Green, M. A., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., & Ho-Baillie, A. W. (2019). Solar cell efficiency tables (version 54). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27(7), 565–575.
8. Butler, P. C., Crow, J. T., & Taylor, P. A. (1997). Battery evaluation methods and results for stationary applications. *Telecommunications Energy Conference, INTELEC 97. 19th International, IEEE* (pp. 311–318).

9. Mavic 3 Pro. <https://www.dji.com/global/mavic-3-pro>.
10. Mavic 3 Pro User Manual v1.0 2023.04. https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mavic_3_Pro/DJI_Mavic_3_Pro_User_Manual-EN.pdf.
11. Ağçal, A., & Doğan, T. H. (2024). A novel folding wireless charging station design for drones. *Drones*, 8(7), 289. doi: 10.3390/drones8070289.
12. Mahbub, I. (2024). DARPA project on phased-array power-beaming for UAVs. *DARPA Grant News*. <https://www.darpa.mil>.
13. Saviolo, A., Mao, J. B., Roshan T. M. B., et al. (2023). AutoCharge: Autonomous charging for perpetual quadrotor missions. *arXiv preprint*, arXiv:2306.05111. doi: 10.48550/arXiv.2306.05111.
14. Global Solar Atlas. https://globalsolaratlas.info/map?c=49.70672,30.552979,7&r=UKR:UKR.2_1.
15. Simon Philipps, F. I., & Warmuth, W. (2019). *Photovoltaics report*.
16. Sharma, S., Kumar Jain, K., & Sharma, A. (2015). Solar cells: In research and applications a review. *Materials Sciences and Applications*, 06, 1145–1155.
17. Сонячна панель ZMS330 100W. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/ecoflow-100w-flexible-solar-panel/?tab=about.
18. Сонячна панель ALF-120W. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/altek-alf-120w-gnuchka/?tab=about.
19. Сонячна панель NEO Tools 200W. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/neo-tools-200w-90-144.
20. Сонячна панель Axioma Energy AX-100P. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/axioma-energy-ax-100p.
21. Сонячна панель Volt Polska POLI 180W. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/volt-polska-5pvpoli180/?tab=about.
22. Сонячна панель Altek ALM-285M-120. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/altek-alm120-6-285/?tab=about.
23. Сонячна панель Jinko Solar JKM325PP-72. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/jinko-solar-jkm325pp-72/?tab=about.
24. Сонячна панель ZMS331. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/ecoflow-2100w-rigid-solar-panel-efsolar2100w/?tab=about.
25. Сонячна панель Axioma Energy AX-200M. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/axioma-energy-ax-200m.
26. Сонячна панель JA Solar JAM6. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/ja-solar-jam6l-60300pr/?tab=about.
27. Сонячна панель Risen RSM40-8-400M. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/risen-rsm40-8-400m.
28. Сонячна панель JA Solar JAM66S30. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/ja-solar-jam66s30-500mr/?tab=about.
29. Сонячна панель Longi Solar LR5-72HTH-585M. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/longi-solar-lr5-72hth-585m.
30. Сонячна панель LogicPower LP Half-Cell 700W. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/logicpower-half-cell-700w-35-profl-topcon-n-lp30101/?tab=about.

References

1. Sornek, K., Augustyn-Nadzieja, J., Rosikoń, I. et al. (2025). Status and development prospects of solar-powered unmanned aerial vehicles – A literature review. *Energies*, 18(8), 1924. doi: 10.3390/en18081924.
2. Green, M. A., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., & Ho-Baillie, A. W. (2019). Solar cell efficiency tables (version 54). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27(7), 565–575.
3. Bett, F., Dimroth, Stollwerck, G., & Sulima, O. (1999). Iii-v compounds for solar cell applications. *Applied Physics A*, 69(2), 119–129. <https://doi.org/10.1007/s003390050983>.
4. Castro-Hermosa, S., Dagar, J., Marsella, A., & Brown, T. M. (2017). Perovskite solar cells on paper and the role of substrates and electrodes on performance. *IEEE Electron Device Letters*, 38(9), 1278–1281.

5. Shuhayeu P., Martsinchyk A., Martsinchyk K., & Milewski, J. (2024). Investigating PEM fuel cells as an alternative power source for electric UAVs: Modeling, optimization, and performance analysis. *Energies*, 17(17), 4427. doi: 10.3390/en17174427.
6. Cao, Z., Gao, W., Fu, Y. et al. (2024). Second-life assessment of commercial LiFePO₄ batteries retired from EVs. *Batteries*, 10(9), 306. doi: 10.3390/batteries10090306.
7. Green, M. A., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., & Ho-Baillie, A. W. (2019). Solar cell efficiency tables (version 54). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27(7), 565–575.
8. Butler, P. C., Crow, J. T., & Taylor, P. A. (1997). Battery evaluation methods and results for stationary applications. *Telecommunications Energy Conference, INTELEC 97. 19th International*, IEEE (pp. 311–318).
9. Mavic 3 Pro. <https://www.dji.com/global/mavic-3-pro>.
10. Mavic 3 Pro User Manual v1.0 2023.04. https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mavic_3_Pro/DJI_Mavic_3_Pro_User_Manual-EN.pdf.
11. Ağçal, A., & Doğan, T. H. (2024). A novel folding wireless charging station design for drones. *Drones*, 8(7), 289. doi: 10.3390/drones8070289.
12. Mahbub, I. (2024). DARPA project on phased-array power-beaming for UAVs. *DARPA Grant News*. <https://www.darpa.mil>.
13. Saviolo, A., Mao, J. B., Roshan T. M. B., et al. (2023). AutoCharge: Autonomous charging for perpetual quadrotor missions. *arXiv preprint*, arXiv:2306.05111. doi: 10.48550/arXiv.2306.05111.
14. Global Solar Atlas. https://globalsolaratlas.info/map?c=49.70672,30.552979,7&r=UKR:UKR.2_1.
15. Simon Philipps, F. I., & Warmuth, W. (2019). *Photovoltaics report*.
16. Sharma, S., Kumar Jain, K., & Sharma, A. (2015). Solar cells: In research and applications a review. *Materials Sciences and Applications*, 06, 1145–1155.
17. EcoFlow. (n.d.). ZMS330 100 W Flexible Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/ecoflow-100w-flexible-solar-panel/?tab=about.
18. Altek. (n.d.). ALF-120 W Flexible Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/altek-alf-120w-gnuchka/?tab=about.
19. Neo Tools. (n.d.). 200 W Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/neo-tools-200w-90-144.
20. Axioma Energy. (n.d.). AX-100P 100 W Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/axioma-energy-ax-100p.
21. Volt Polska. (n.d.). POLI 180 W Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/volt-polska-5pvpoli180/?tab=about.
22. Altek. (n.d.). ALM-285M-120 285 W Solar Panel [Product page]. from https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/altek-alm120-6-285/?tab=about.
23. Jinko Solar. (n.d.). JKM325PP-72 325 W Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/jinko-solar-jkm325pp-72/?tab=about.
24. EcoFlow. (n.d.). ZMS331 210 W Rigid Solar Panel [Product page]. Retrieved May 25, 2025, from https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/ecoflow-2100w-rigid-solar-panel-efsolar2100w/?tab=about.
25. Axioma Energy. (n.d.). AX-200M 200 W Solar Panel [Product page]. from https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/axioma-energy-ax-200m.
26. JA Solar. (n.d.). JAM6L-60 300 W Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/ja-solar-jam6l-60300pr/?tab=about.
27. Risen Energy. (n.d.). RSM40-8-400M 400 W Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/risen-rsm40-8-400m.
28. JA Solar. (n.d.). JAM66S30 500 W Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/ja-solar-jam66s30-500mr/?tab=about.
29. Longi Solar. (n.d.). LR5-72HTH-585M 585 W Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/longi-solar-lr5-72hth-585m.
30. LogicPower. (n.d.). LP Half-Cell 700 W TOPCon Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/logicpower-half-cell-700w-35-profl-topcon-n-lp30101/?tab=about.

Отримано 29.04.2025

Dmytrii Shokodko¹, Maksym Khomenko²¹Phd Student of the Department of Electrical Engineering and Information and Measurement Technologies
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)**E-mail:** shokodko.dima@gmail.com. **ORCID** <https://orcid.org/0009-0004-7953-6947>²Associate Professor of Radiotechnic and Embedded Systems Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)**E-mail:** mr.homax@stu.cn.ua. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0001-9084-3527>

SELECTION OF SOLAR PANELS FOR AUTONOMOUS POWER SYSTEMS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

Growing military and civilian reliance on multirotor unmanned aerial vehicles (UAVs) accentuates the need for resilient, field-deployable power supplies capable of continuous operation whenever conventional grids are inaccessible or hazardous. The paper addresses this challenge by proposing the comprehensive methodology for choosing photovoltaic (PV) converters and complementary storage technologies that can sustain round-the-clock wireless charging of UAV batteries under Northern-Ukrainian insolation conditions. The problem is formulated as joint optimisation of the daily number of battery charging cycles, overall-energy demand and PV-array configuration while accounting for climatic variability and flight-mission logistics.

The research objective is to substantiate the autonomous solar power plant sized to support three DJI Mavic 3 class UAVs performing uninterrupted aerial reconnaissance. Methods include energy-balance modelling, scenario scheduling of flight/charge cycles, comparative efficiency analysis of mono-, poly- and thin-film PV modules, and evaluation of two battery chemistries—LiFePO₄ and AGM/GEL—using manufacturer data and recent literature.

The key results show that, for Chernihiv's mean global tilted irradiation of 3.61 kWh m⁻² day⁻¹, a 3.5 kWh daily yield suffices to cover 35 full 100 W charges. LiFePO₄ storage (round-trip $\eta \approx 95\%$) cuts required array area by 5–15 % versus AGM/GEL ($\eta \approx 85\%$), enabling a lighter, cheaper and more mobile installation. Among thirteen commercially available panels analysed, high-efficiency monocrystalline modules ($\eta > 20\%$) teamed with LiFePO₄ batteries minimise total mass (≈ 55 kg) and capital cost (< 400 USD) while meeting mission autonomy. The proposed selection algorithm may be adapted to other regions and fleet sizes, and the findings facilitate rapid deployment of reliable solar-powered UAV charging outposts for defence, rescue and environmental monitoring tasks.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV); solar panels; insolation; autonomous power systems; energy-parameter optimisation.

Fig.: 6. Table: 2. References.: 30.

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-445-453](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-445-453)

УДК 528:332.3

**Костянтин Анатолійович Мамонов¹, Ернест Сергійович Штерндок²,
Володимир Володимирович Касьянов³, Ігор Юрійович Бурвіков⁴,
Даніїл Дмитрович Берднік⁵**

¹доктор економічних наук, професор,

завідувач кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова (Харків, Україна)

E-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0797-2609>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)

E-mail: shterndok@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1107-7401>

³кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)

E-mail: fkasyanow.vladimir@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3506-5982>

⁴здобувач кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)

E-mail: scbkha@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2821-901X>

⁵студент групи М ЗУК 2024-1, спеціальність «Геодезія та землеустрій»

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)

E-mail: berdnikd240@gmail.com

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГЕОДЕЗИЧНОГО КОНТРОЛЮ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ РОБІТ У СИСТЕМІ РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІЙ

У сучасних надзвичайних умовах, які визначаються негативним впливом наслідків агресії РФ, зниженням рівня просторового планування та організації розвитку територій, гальмуються процеси реалізації відновлювальних робіт внаслідок недостатнього рівня здійснення та організації геодезичного контролю. У статті визначені напрями здійснення геодезичного контролю відновлювальних робіт для планування та організації розвитку територій. Виокремлені практичні результати щодо здійснення геодезичного контролю шляхом застосування сучасного геодезичного забезпечення.

Ключові слова: геодезичний контроль; просторове планування та організація розвитку територій; відновлення об'єктів, геодезичні прилади; землеустрій; відновлювальні роботи.

Рис.: 4. Бібл.: 18.

Актуальність теми дослідження. Формування сучасної системи землеустрою, підвищення ефективності використання земель, забезпечення розвитку територій потребує переосмислення підходів до формування геодезичного забезпечення. У сучасних вітчизняних умовах спостерігається уповільнення процесів залучення інвестиційних ресурсів щодо оновлення геодезичних приладів, можливостей відносно розвитку геодезичної мережі. Поглиблюють представлені процеси наслідки агресії рф. Крім того, реформа місцевого самоврядування вказує на необхідність забезпечення просторового планування та організації розвитку територій.

Вирішення проблемних питань відносно відновлення земельно-майнового комплексу характеризуються розробкою та реалізацією, у тому числі здійсненням геодезичного контролю. У цьому контексті слід відзначити, що станом на 01.01.2024 р. сума прямих збитків житлової та нежитлової нерухомості, іншій інфраструктурі, транспортним засобам та товарним запасам перевищила 157 млрд \$ (за сумою заміщення) [1].

Найбільша частка у загальному обсязі прямих збитків завдана житловим будівлям, а саме 37,5 %, або 58,9 млрд \$, та інфраструктурі - 23,4 %, або 36,8 млрд \$ [2].

Отже, комплекс представлених проблем обумовили вибір і актуальність теми дослідження щодо обґрунтування практичних аспектів та використання результатів геодезичного контролю відновлювальних робіт для забезпечення розвитку територій.

Постановка проблеми. У сучасних умовах проблемним питанням є формування напрямів відмовлення земельно-майнового комплексу, зруйнованого внаслідок агресії РФ із застосуванням сучасних технологій геодезичного контролю. Крім того, проблемними залишаються питання формування геодезичного забезпечення для здійснення відновлювальних робіт і формування просторової основи територіального розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нормативно-правове забезпечення щодо формування й застосування системи геодезичних досліджень, використання сучасного геодезичного обладнання представлено у відповідних законах України, постановах Кабінету міністрів, наказах та ін. Формування напрямів та особливостей здійснення регіонального розвитку в аспектів використання земельно-майнового комплексу висвітлено у розробках [2; 3]. Характеристика умов для планування й організації розвитку територій, виявлення територіальних особливостей, враховуючи міжнародний досвід, представлено у роботах [3–6]. Здійснення просторового планування, виокремлення відповідного інструментарію його реалізації, формування моніторингових процедур визначено у [7–10]. Формування напрямів землеустрою у контексті організації розвитку територій, застосування функціонального й інструментального підходів охарактеризовано у розробках [11–12]. Вирішенням питань територіального розвитку використання земель займалися [13–15]. Для забезпечення територіального розвитку особливого значення має застосування геоінформаційних систем, на важливість яких вказується у роботах [16–18].

Таким чином, сукупність теоретичних положень, обумовили визначення практичних аспектів та результатів геодезичного контролю відновлювальних робіт для забезпечення розвитку територій.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. В умовах ведення агресивних воєнних дій, розбалансування територіальних зв'язків, негативного впливу внутрішніх і зовнішніх чинників, проблемними залишаються питання відновлення об'єктів земельно-майнового комплексу. Це пов'язано з недостатнім рівнем сформованого просторового забезпечення для проведення відновлювальних робіт, яке формується шляхом здійснення геодезичного контролю. Слід зазначити, що в контексті забезпечення територіального розвитку на недостатньому рівні вирішуються технологічні питання відносно реалізації геодезичного контролю зруйнованих об'єктів.

Метою статті є визначення напрямів здійснення геодезичного контролю відновлювальних робіт для забезпечення розвитку територій. У дослідженні вирішуються такі завдання:

- характеристика геодезичного забезпечення для проведення відновлювальних робіт;
- виокремлення практичних аспектів щодо здійснення геодезичного контролю відновлювальних робіт.

Методи дослідження. У роботі застосовані методи формування геодезичного забезпечення на основі розробки сукупності етапів: контроль монтажу підсилювальних елементів; моніторинг процесу заміни чи реставрації огорожувальних конструкцій; перевірка вертикальності та просідань у динаміці; виконавчі знімання стану будівлі.

Наукова новизна полягає в удосконаленні методів і моделей формування геодезичного забезпечення на основі розробки комплексних етапів проведення робіт й застосуванні сучасного геодезичного обладнання, що на відміну від існуючих, дозволило запропонувати інструментарій геодезичного контролю відновлювальних робіт для забезпечення розвитку територій.

Практична значущість полягає в обґрунтуванні практичних результатів здійснення геодезичного контролю шляхом застосування сучасного геодезичного забезпечення. Визначені особливості формування напрямів та організації розвитку територій.

Виклад основного матеріалу. Для забезпечення якісного та безпечного відновлення об'єкта земельно-майнового комплексу визначена необхідність у точній оцінці ступеня пошкоджень конструкцій. На початковому етапі відновлювальних робіт проведено попереднє обстеження стану зруйнованих ділянок. За результатами цих обстежень розроблено програму геодезичних знімів, що включала визначення оптимальної схеми закладки опорних пунктів, складення послідовності вимірювань та планування використання сучасних приладів для досягнення максимальної точності.

Спершу було закладено опорні геодезичні пункти на території навколо об'єкта земельно-майнового комплексу (рис. 1).



Рис. 1. Схема закладання пунктів опорної геодезичної мережі

Джерело: розроблено авторами.

Ці пункти слугували стабільною базою для всіх наступних вимірювань, дозволяючи отримувати результат у єдиній системі координат. Від закладених опорних пунктів здійснювалися знімання окремих конструктивних елементів: колон, фасадів, пошкоджених вузлів перекриттів та інших елементів каркасно-монолітної системи будівлі. Зокрема, особливу увагу приділяли геодезичному контролю вертикальності колон, виявленню відхилень огорожувальних конструкцій від проєктного положення та визначенню просідань несучих елементів.

Для виконання комплексу геодезичних робіт застосовувався широкий спектр сучасних приладів. Основним інструментом вимірювань став високоточний електронний тахеометр Leica FlexLine TS07 2" R500 (рис. 2, а), що забезпечує прецизійні кутові та лінійні вимірювання. З його допомогою виконували фіксацію координат основних точок на колонах, балках та інших конструктивних елементах. Для уточнення планово-висотного положення опорних пунктів та інтеграції геодезичних даних у міську систему координат використовувався RTK GNSS-приймач Leica GS07 (рис. 2, б), що дозволяв отримувати високу точність у планових та висотних вимірюваннях. Крім того, застосовувався високоточний нівелір, за допомогою якого визначали різниці висот і виявляли просідання основних несучих елементів будівлі.

Після закінчення польових вимірювань зібрані дані оброблялися у спеціалізованому програмному забезпеченні, де виконувалося вирівнювання та аналіз результатів. На основі цих обчислень було складено докладні схеми відхилень від вертикалі несучих колон (рис. 3), визначено величини деформацій огорожувальних конструкцій, а також зафіксовано місця й обсяги просідань колон і фундаментів. Таким чином, вдалося отримати детальну картину стану конструкцій, що зазнали пошкоджень (рис. 4).



Рис. 2. Прилади для геодезичних зніманих:
високоточний електронний тахеометр Leica FlexLine TS07 2" R500 (а)
та RTK GNSS-приймач Leica GS07 (б)

Джерело: [19].

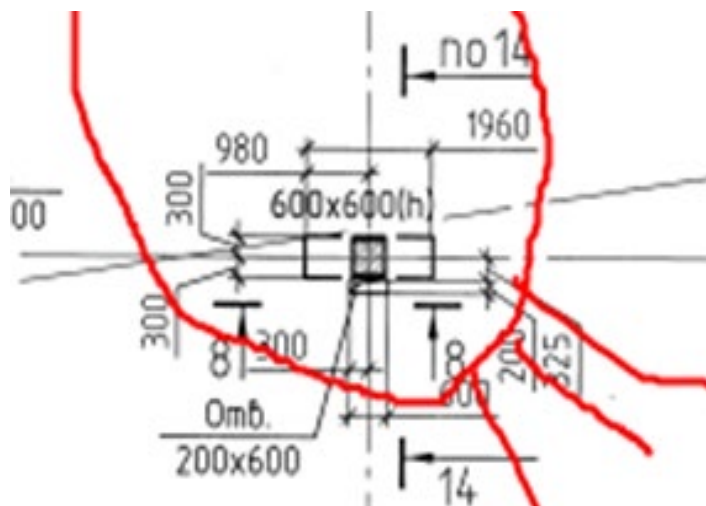


Рис. 3. Фрагмент руйнування несучої колони
Джерело: розроблено авторами.

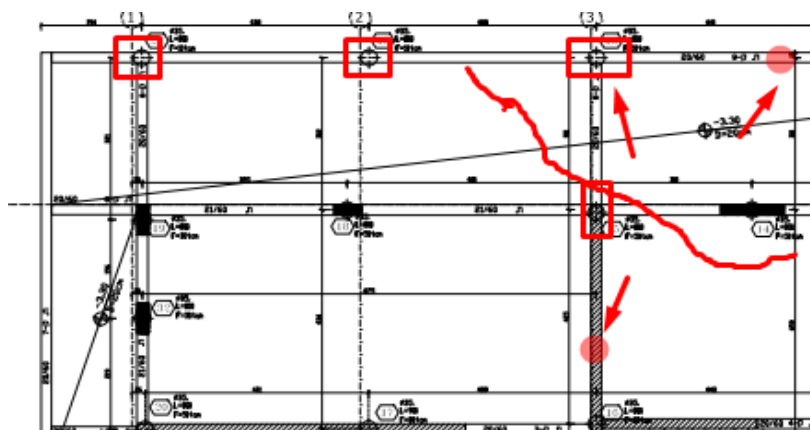


Рис. 4. Фрагмент схеми відхилень несучих колон за результатами геодезичних знімів (вид з тильної сторони об'єкта земельно-майнового комплексу)

Джерело: розроблено авторами.

Комплексний підхід та застосування сучасних технологій надали можливість оперативно визначити пріоритети відновлювальних робіт, прийняти виважені рішення щодо підсилення чи заміни окремих конструктивних елементів та забезпечити максимальну безпеку під час подальших ремонтно-будівельних заходів.

У роботі, застосовуючи геодезичне забезпечення, запропоновані напрями здійснення геодезичного контролю відновлювальних робіт, зокрема на прикладі зруйнованого торгівельно-розважального центру (ТРЦ):

1. Контроль монтажу підсилювальних елементів: при встановленні металевих обойм, розтяжок, анкерів та інших підсилювальних деталей за допомогою геодезичних знімів перевіряється правильність просторового положення конструкцій. За допомогою тахеометра та створених опорних мереж проводилися вимірювання, що дозволяли виявляти будь-які відхилення монтажних елементів від проєктних координат і швидко вносити необхідні корективи.

2. Моніторинг процесу заміни чи реставрації огорожувальних конструкцій: у процесі відновлення фасадів та скляних вітрин, які зазнали руйнувань, застосовувалися контрольні геодезичні знімання, аби гарантувати точне прилягання та герметичність нових панелей, сталевих профілів та вітражних систем. Це дозволяло запобігти виникненню щілин, нерівностей та інших дефектів.

3. Перевірка вертикальності та просідань у динаміці: геодезичні вимірювання виконували періодично протягом усього циклу відновлювальних робіт. Застосування високоточного нівеліра та RTK GNSS-приймача Leica GS07 дозволяло відстежувати можливі вторинні деформації, просідання чи зміщення окремих елементів каркаса під час монтажних операцій і при впливі додаткових навантажень (наприклад, при встановленні важкого обладнання або матеріалів).

4. Виконавчі знімання стану будівлі: По завершенні основних відновлювальних заходів було проведено фінальний комплекс геодезичних знімів. За їхніми результатами складено виконавчі схеми, на яких позначено положення всіх ключових конструкцій будівлі у порівнянні з проєктними даними та отриманими під час попередніх етапів відновлення вимірюваннями. Це надало можливість підтвердити, що відбудовані та підсилені елементи відповідають проєктним параметрам за вертикальністю, відстанями та висотними позначками.

За даними геодезичного забезпечення виконавчих робіт отримані практичні результати. Торговий центр зберіг вигляд, який був до руйнувань. Відбудова тривала 3 місяці. Результати геодезичного контролю:

- отримані виконавчі схеми точного положення колон, балок, огорожувальних конструкцій;
- підтверджено стабілізацію відхилених колон після підсилення: відхилення від вертикалі зведено до мінімально допустимих значень згідно з будівельними нормами;
- огорожувальні конструкції (фасади, вітрини) встановлені з дотриманням проєктних положень, що забезпечило герметичність та естетичну цілісність фасадів;
- усунуто чи суттєво зменшено просідання опорних елементів завдяки своєчасній реакції інженерів на результати геодезичного моніторингу;
- сформовано архів геодезичних даних, який може бути використаний у майбутньому для експлуатаційного контролю, планових обстежень та можливих реконструкцій.

Висновки. Таким чином, завдяки застосуванню сучасних геодезичних приладів і методів вдалося забезпечити ретельний контроль за кожним етапом відновлення ТРЦ. Це не лише гарантувало точне дотримання проєктних рішень, а і сприяло безпечності та надійності конструкцій, підвищуючи довговічність відбудованої споруди та її готовність знову стати важливим осередком міського життя.

У результаті дослідження виокремлені напрями та практичні результати щодо здійснення геодезичного контролю шляхом застосування сучасного геодезичного забезпечення. Встановлено, що процеси розвитку територій залежать від застосування сучасних геодезичних технологій, напрямів просторового планування, рівнів та особливостей здійснення відновлювальних робіт.

Список використаних джерел

1. Київська школа економіки. (2024). *Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України станом на початок 2024 року*. https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24_Damages_Report.pdf.
2. Берданова, О., & Вакуленко, В. (2012). *Стратегічне планування місцевого розвитку. Практичний посібник*. ТОВ «Софія-А». https://despro.org.ua/media/articles/04_book_berdanova_vakulenko_ctrateg_chne_planuvann.pdf.
3. Васильченко, Г., Парасюк, І., & Єременко, Н. (2015). *Планування розвитку територіальних громад*. ТОВ «Підприємство «Ві ен ей».
4. United Nations. (2001). *Indicators of sustainable development: Guidelines and methodologies* (3rd ed.). United Nations.
5. United Nations. (2017). *Global indicator framework for the Sustainable Development Goals and targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development: Annex to the Resolution adopted by the United Nations General Assembly on 6 July 2017. Work of the Statistical Commission pertaining to the 2030 Agenda for Sustainable Development*. https://unstats.un.org/sdgs/indicators/Global%20Indicator%20Framework%20after%202022%20refinement_Eng.pdf.
6. Kłosowski, W., & Warda, Ja. (2001). *Wyspy Szans: Jak budować strategię rozwoju lokalnego*. Stowarzyszenie „Wyspa Szans”.
7. Бурик, З. (2020). Стратегічне планування розвитку територій, як інструмент управління. *Публічне урядування*, 5 (25), 53–62. [https://doi.org/10.32689/2617-2224-2020-5\(25\)-53-62](https://doi.org/10.32689/2617-2224-2020-5(25)-53-62).
8. Бриль, М., Врублевський, О., & Данчева, О. (2018). *Успішна територіальна громада: Будемо разом*. Фактор.
9. Мамонов, К.А., Гой, В.В., & Харів, В.В. (2024). Міжнародний обмін геопросторовою інформацією та співпраця у сфері земельного кадастру. *Український журнал прикладної економіки та техніки*, 9(1), 216–223. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2024-1-36>.
10. Мамонов, К., Гой, В., & Штерндок, А. (2024). Геопросторовий моніторинг використання земель об'єднаних територіальних громад. *Технічні науки та технології*, 1(35), 311–318. <http://tst.stu.cn.ua/article/view/303072>.

- 11.Мамонов, К.А., Гой, В.В., Величко, В.А., & Канівець, О.М. (2024). Інструментарій забезпечення землеустрою об'єднаних територіальних громад. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*, 115(1), 81–88. <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-115.1-081-088>.
- 12.Мамонов, К. А., Ковальчук, В. С., Гой, В. В., & Мамонов, В. К. (2024). Містобудівні чинники територіального розвитку використання земель регіонів. *Науковий вісник будівництва*, 111, 154–159. <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/1804/1769>.
- 13.Мамонов, К. А., Ковальчук, В. С., Фролов, В. О., Штерндок, Е. С., & Войтенко, О. Р. (2024). Територіальний розвиток використання земель регіонів: визначення та теоретичні підходи. *Комунальне господарство міст*, 185(4), 108–112. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-108-112>.
- 14.Bieliatynskyi, A., Mamonov, K., Mingming, Wen, Chang, Liu, & Dymchenko, E. (2022). Formation of the intellectual systems for the territorial development of land administration in the coastal regions. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 30(3), 424–432. <https://doi.org/10.3846/jeelm.2022.17632>.
- 15.Mamonov, K., Velychko, V., Holovachov, V., & Kovalenko, L. (2023). Theoretical and methodological provisions regarding the development and implementation of an integral method for assessing the level of information support of the multipurpose real estate cadastre at the regional level. *Ukrainian Metrological Journal*, 2, 40–51.
- 16.Мамонов, К. А., Пілічева, М. О., Штерндок, Е. С., & Фролов, В. О. (2024). Особливості формування геоінформаційних моніторингових систем використання земель територіальних громад на регіональному рівні. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*, 115(2), 207–213. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/115.2/207.pdf.
- 17.Мамонов, К. А., Паламар, А. Ю., Вяткін, Р. С., & Гой, В. В. (2024). Просторове забезпечення використання нерухомості регіонів для розробки геоінформаційних моніторингових карт. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*, 115(2), 199–206. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/115.2/199.pdf.
- 18.Mamonov, K., Viatkin, R., & Frolov, V. (2023). Land use monitoring of the regions: geoinformation aspects. *Комунальне господарство міст*. 180(6), 98–102. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-98-102>.

References

1. Kyivska shkola ekonomiky [Kyiv school of economics]. (2024). *Zvit pro priami zbytky infrastruktury vid ruinyvan vnaslidok viiskovoi ahresii Rosii proty Ukrainy stanom na pochatok 2024 roku [Report on direct damage to the infrastructure from destruction due the Russian military aggression against Ukraine as of the beginning of 2024]*. https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24_Damages_Report.pdf.
- 2.Berdanova, O., & Vakulenko, V. (2012). *Stratehichne planuvannia mistsevoho rozvytku [Strategic planning of local development]: Praktychnyy posibnyk. K.: TOV «Sofiia-A» – Practical textbook published by Sofiia LLC*, https://despro.org.ua/media/articles/04_book_berdanova_vakulenko_ctrateg_chne_planuvann.pdf.
3. Vasylchenko, H., Parasiuk, I., & Yeremenko, N. (2015). *Planuvannia rozvytku terytorialnykh hromad [Planning of development of territorial communities]*. “Enterprise “VNA” LLC.
4. Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies. (2001). New York: United Nations.
5. Global indicator framework for the Sustainable Development Goals and targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development. Annex to the Resolution adopted by the United Nations General Assembly on 6 July 2017. Work of the Statistical Commission pertaining to the 2030 Agenda for Sustainable Development. (2017).
6. Kłosowski, W., & Warda, Ja. (2001). *WyspySzans: jak budować strategię rozwoju lokalnego. Bielsko-Biała: Stowarzyszenie «Wyspa Szans»*.

7. Buryk, Z. (2020). Stratehichne planuvannia rozvytku terytorii, yak instrument upravlinnia [Strategic planning of territories development as a tool of management]. *Publichne uriaduvannia – Public governance*, 5(25), 53–62. [https://doi.org/10.32689/2617-2224-2020-5\(25\)-53-62](https://doi.org/10.32689/2617-2224-2020-5(25)-53-62).
8. Bryl, M., Vrublevskiy, O., & Dancheva, O. (2018). *Uspishna terytorialna hromada: buduємо разом [Successful territorial community: we build together]*. Faktor.
9. Mamonov, K.A., Goi, V.V., & Khariv, V.V. (2024). Mizhnarodnyy obmin heoprosorovoiu informatsiieiu ta spivpratsia u sferi zemelnogo kadastru [International exchange of geospatial information and cooperation in the field of land cadastre]. *Ukrainskyy zhurnal prykladnoi ekonomiky ta tekhniki – Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology*, 9(1), 216–223. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2024-1-36>.
10. Mamonov, K., Goi, V., & Shterndok, A. (2024). Heoprosorovy monitorynh vykorystannia zemel obiednanykh terytorialnykh hromad [Geospatial monitoring of land use of united territorial communities]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii. – Technical Sciences and Technologies*, 1(35), 311–318. <http://tst.stu.cn.ua/article/view/303072>.
11. Mamonov, K. A., Goi, V. V., Velychko, V. A., & Kanivets, O. M. (2024). Instrumentarii zabezpechennia zemleustroi obiednanykh terytorialnykh hromad [Tools for providing land management of united territorial communities]. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo – Highways and road construction*, 115(1), 81–88. <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-115.1-081-088>.
12. Mamonov, K. A., Kovalchuk, V.S., Goi, V.V., & Mamonov, V.K. (2024). Mistobudivni chynnyky terytorialnoho rozvytku vykorystannia zemel rehioniv [City planning factors of territorial development of land use of regions]. *Naukovyi visnyk budivnytstva – Scientific Bulletin of Construction*, 111, 154–159. <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/1804/1769>.
13. Mamonov, K. A., Kovalchuk, V. S., Frolov, V. O., Shterndok, E. S., & Voitenko, O. R. (2024). Terytorialnyi rozvytok vykorystannia zemel rehioniv: vyznachennia ta teoretychni pidkhody [Territorial development of land use: definition and theoretical approaches.]. *Komunalne hospodarstvo mist – Utilities of the cities*, 185(4), 108–112. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-108-112>.
14. Bieliatynskiy, A., Mamonov, K., Mingming, Wen, Chang, Liu, & Dymchenko, E. (2022). Formation of the intellectual systems for the territorial development of land administration in the coastal regions. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 30(3), 424–432. <https://doi.org/10.3846/jeelm.2022.17632>.
15. Mamonov, K., Velychko, V., Holovachov, V., & Kovalenko, L. (2023). Theoretical and methodological provisions regarding the development and implementation of an integral method for assessing the level of information support of the multipurpose real estate cadastre at the regional level. *Ukrainian Metrological Journal*, 2, 40–51.
16. Mamonov, K.A., Pilicheva, M.O., Shterndok, E.S., & Frolov, V.O. (2024). Osoblyvosti formuvannia heoinformatsiynykh monitorynhovykh system vykorystannia zemel terytorialnykh hromad na rehionalnomu rivni [Features of formation of geoinformation monitoring systems of land use of territorial communities at the regional level]. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo – Highways and road construction*, 115(2), 207–213. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/115.2/207.pdf.
17. Mamonov, K. A., Palamar, A. Iu., Viatkin, R. S., & Hoi, V. V. (2024). Prostorove zabezpechennia vykorystannia nerukhomosti rehioniv dlia rozrobky heoinformatsiynykh monitorynhovykh kart [Spatial provision of use of real estate of regions for the development of geoinformation monitoring cards]. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo.- Highways and road construction*, 115(2), 199–206. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/115.2/199.pdf.
18. Mamonov, K., Viatkin, R., & Frolov, V. (2023). Land use monitoring of the regions: geoinformation aspects. *Komunalne hospodarstvo mist*, 180(6), 98–102. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-98-102>

Отримано 06.06.2025

**Kostiantyn Mamonov¹, Ernest Shterndok², Volodymyr Kasyanov³,
Igor Burvikov⁴, Daniil Berdnik⁵**

¹Doctor of Economic Sciences, Professor of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

E-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-0797-2609>

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

E-mail: shterndok@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1107-7401>

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

E-mail: kasyanow.vladimir@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3506-5982>

⁴Postgraduate Student of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

E-mail: scbkha@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-2821-901X>

⁵Student of Group M ZUK 2024-1, specialty «Geodesy and Land Management
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

E-mail: berdnikd240@gmail.com

PPROVISION OF GEODESIC CONTROL OF RESTORATION WORKS IN THE SYSTEM OF TERRITORIAL DEVELOPMENT

In modern emergencies, which are determined by the negative impact of the consequences of aggression of the Russian Federation, the decrease in the level of spatial planning and organization of territories development, implementation of restorative work due to insufficient level of development and organization of geodetic control are hampered.

As a result of the study, the purpose was to determine the areas of geodetic control of restorative work to ensure development of territories. Geodetic support for renewable work is characterized, practical aspects regarding the implementation of geodetic control of restorative work are highlighted.

Thanks to the use of modern geodetic devices and methods, it was possible to ensure careful control over each stage of the restoration of the object of land and property. This guaranteed accurate adherence to the design decisions, contributed to the safety and reliability of the structures, increasing the durability of the rebuilt structure and its readiness for further use.

To ensure a quality and safe restoration of the object of land and property complex, the need for accurate assessment of the degree of damage of structures is accurate. At the initial stage of restoration work, a preliminary examination of the condition of the destroyed areas was carried out. According to the results of these surveys, a program of geodetic strife was developed, which included the definition of the optimal scheme of laying of strongholds, compiling a sequence of measurements and planning the use of modern devices to achieve maximum accuracy. Based on geodetic measurements, detailed schemes of deviations from the vertical of the load-bearing columns are drawn up, magnitudes of deformations of enclosure structures are determined, and places and volumes of subsidence of columns and foundations are recorded. The presented directions allowed to implement a comprehensive approach to the use of geodetic control of restoration work.

As a result of the study, practical results are distinguished for geodetic control using modern geodetic support. Development of territories, ensuring its spatial planning depend on the formation of a spatial basis, which is created by using modern geodetic systems and technologies, geodetic control of restorative work.

Keywords: geodetic control, spatial planning and organization of territories development, object restoration, geodetic devices, land management, restoration work.

Fig.: 4. References: 18.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-454-462](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-454-462)

УДК 528:004

**Олексій Олександрович Воронков¹, Катерина Олександрівна Долінська²,
Андрій Анатолійович Євдокімов³**

¹кандидат економічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)

E-mail: Voronkov.Oleksii@kname.edu.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6905-0098>

²студентка 1 курсу магістратури кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)

E-mail: Kateryna.Dolinska@kname.edu.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-9836-7836>

³кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)

E-mail: Andriy.Evdokimov@kname.edu.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7538-8922>

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗЕМЕЛЬНОГО ПОКРИВУ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ДАНИМИ

У роботі проведено аналіз земельного покриття басейну річки Десна на основі супутникових даних Sentinel-1 та Sentinel-2 із використанням відкритого продукту ESA WorldCover станом на 2020 та 2021 роки. Дослідження показало, що домінуючими типами землекористування є орні землі, ліси та природні луки. Отримані результати свідчать про стабільність структури земельного покриття в короткотривалій перспективі та демонструють ефективність супутникового моніторингу для просторового аналізу та екологічного оцінювання стану водозбірних територій.

Стаття є публікацією науково-методичного характеру.

Ключові слова: моделювання; земельний покрив; землекористування; дистанційне зондування; супутникові знімки.

Рис.: 1. Табл.: 1. Бібл.: 17.

Актуальність теми дослідження. У сучасних умовах стрімкого зростання антропогенного навантаження на природні ресурси та загострення проблем, пов'язаних із кліматичними змінами, особливої ваги набуває завдання ефективного моніторингу стану земель. Земельний покрив як складова природного середовища безпосередньо впливає на стабільність екосистем, забезпечення продовольчої безпеки, регуляцію гідрологічного циклу та кліматичних процесів. Його просторово-часовий аналіз дозволяє виявляти зміни, викликані як природними чинниками, так і діяльністю людини.

Застосування супутникових знімків Sentinel-1 та Sentinel-2 у поєднанні з відкритими даними ESA WorldCover забезпечує високоточну, регулярну та доступну інформацію про структуру земного покриття на великих територіях. Особливо актуальним є дослідження таких територій, як басейн річки Десна, де природні й антропогенні фактори взаємодіють на міжрівневому екологічному та соціально-економічному рівнях. Отримання достовірної інформації про стан земель дозволяє ухвалювати науково обґрунтовані рішення у сфері просторового планування, охорони довкілля та адаптації до змін клімату.

Таким чином, проведення досліджень земельного покриття із використанням сучасних ГІС-технологій та даних дистанційного зондування Землі є дуже актуальним для сталого управління територіями, збереження біорізноманіття та забезпечення екологічної рівноваги.

Постановка проблеми. Економічне зростання та збільшення чисельності населення призвели до істотних змін у рослинному покритті Землі за останні двісті років, і наявні тенденції свідчать про ймовірне прискорення цих процесів у майбутньому. Ці трансформації відбуваються на тлі довготривалих змін, пов'язаних із коливаннями клімату. Зміна земного покриття може суттєво впливати на здатність планети забезпечувати людську діяльність через надання екосистемних послуг, а також тому, що економічна активність, яка виникає як наслідок таких змін, створює зворотні зв'язки, що впливають на клімат та інші глобальні процеси. У зв'язку з цим виникає потреба в регулярному проведенні систематичного оцінювання земного покриття з достатньою частотою для фіксації як довгострокових змін, так і міжрічної варіативності, а також на такому рівні просторової деталізації, який дозволяє ідентифікувати антропогенні впливи.

Земельний покрив, що охоплює сукупність біотичних і абіотичних компонентів земної поверхні, є ключовою характеристикою земної системи. Його моніторинг має надзвичайну актуальність з кількох причин. По-перше, земельний покрив активно взаємодіє з атмосферою, впливаючи на гідрологічний цикл і енергетичний баланс, що є критично важливим для прогнозування погоди та змін клімату. Більшість кліматичних моделей включають параметризацію земної поверхні, яка базується на цифрових даних про рослинність і дозволяє оцінювати альбедо, шорсткість поверхні, сумарне випаровування та процеси дихання. По-друге, земельний покрив відіграє центральну роль у глобальному вуглецевому циклі, одночасно виступаючи джерелом і поглиначем вуглецю. Процеси збездіснення, повторного заліснення та відновлення лісів мають значний вплив на викиди CO₂ та його абсорбцію, що напряму пов'язано з інтенсивністю парникового ефекту. По-третє, стан земельного покриву відображає наявність життєво важливих ресурсів – їжі, палива, деревини, волокон і місць проживання – та є індикатором рівня надання інших екосистемних послуг, таких як збереження біорізноманіття. Таким чином, систематичне спостереження за земельним покривом є вкрай необхідним для вирішення широкого кола завдань як національного, так і глобального масштабу від управління водозбірними басейнами до забезпечення сільськогосподарської продуктивності. Необхідність такого моніторингу обумовлена складною взаємодією між кліматичними умовами, станом екосистем і соціальними потребами.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На сьогодні опубліковано досить багато результатів наукових робіт за темою дослідження змін земельного покриву за даними супутникових спостережень. Робота [1] присвячена дослідженню змін земельного покриву на території Київської області. Дослідження виконано за методиками конвенції ООН по боротьбі з опустелюванням. У роботі автори використовують національні карти земельного покриву високої роздільної здатності. Як індикатор досягнення нейтрального рівня деградації земель використано тенденції змін земельного покриву.

У дослідженні [2] наведено результати аналізу земельного покриву території України для потреб державного управління та адміністрування. Автори відзначають, що одним із показників наближення до сталого розвитку територій може бути такий показник, як співвідношення між типами землекористування.

У дослідженні [3] за допомогою ГС-технологій здійснюється аналіз стану землекористування та його змін у Житомирській області, а також розглядається вплив російської агресії проти України на ці процеси.

У статті [4] демонструється цей аналіз ґрунтового покриву з використанням хмарних сервісів і даних дистанційного зондування. Співвідносячи ґрунтовий покрив з топографічними змінними, дослідження висвітлює динаміку розподілу ґрунтового покриву та інформує про політичні рішення, демонструючи переваги масштабованих хмарних обчислень для всебічного просторового аналізу.

Автори роботи [5] представили результати аналізу ґрунтового покриву з використанням даних Landsat 8 і Landsat 9. У роботі проаналізовано п'ять класів: рослинність, забудова, чагарники, водні об'єкти та сільське господарство. Алгоритм максимальної правдоподібності класифікував зображення, досягнувши загальної точності 86 % для 2014 року і 90 % для 2023 року.

Колектив авторів [6] представили результати аналізу земного покриву із застосуванням методів неконтрольованої і контрольованої класифікації. В результаті виділено дев'ять категорій землекористування і земного покриву, включаючи аквакультуру, сільське господарство, водно-болотні угіддя і міські території. Автори підкреслюють динамічний взаємозв'язок між змінами в землекористуванні та місцевими екосистемними послугами.

У дослідженні [7] проаналізовано зміни ґрунтового покриття в суббасейні Тойлі, за десять років із використанням знімків Landsat 8 за 2013 і 2022 роки. За результатами виділено дев'ять класів земного покриття. При виконанні дослідження авторами використано контрольований аналіз зображень, що дозволило досягти рівня точності 88,54 %, і підкреслюється важливість розуміння змін земного покриття для екологічного менеджменту і планування.

У роботі [8] показано, що аналіз ґрунтового покриття передбачає вивчення змін у рослинному і нерослинному покритті за допомогою знімків дистанційного зондування. Автори доводять, що аналіз має вирішальне значення для гуманітарної протимінної діяльності, оскільки він допомагає визначити пріоритети очищення територій, оцінюючи масштаб проблеми і необхідні ресурси. Дослідження, представлене в цій статті, використовує матрицю змін і якісні та кількісні характеристики, щоб рекомендувати пріоритети очищення небезпечних територій, підвищуючи ефективність процесу нетехнічного обстеження.

У дослідженні [9] використовувалися методи дистанційного зондування та ГІС для аналізу змін рослинного покриття. При виконанні дослідження було опрацьовано супутникові знімки 1985, 1995, 2010 і 2022 років. Отримані дані свідчать про значну деградацію земель, пов'язану з розробкою кар'єрів.

Аналіз земельного покриття в публікації [10] включає оцінку змін у землекористуванні та земельному покритті, за допомогою супутникових знімків Landsat 5 і Landsat 8 за період з 2000 по 2020 рік. Дослідники аналізують чотири класи земельного покриття: площа рослинності, площа землі, водні об'єкти та пасовища.

У статті [11] представлено підхід до аналізу виявлення змін з використанням методів машинного навчання на класифікаційних картах, отриманих на основі багатоспектральних композитних зображень з фальшивим кольором. Дослідники визначають, що такий підхід дозволяє досягти високої точності класифікації на рівні 98,48 % за допомогою машини опорних векторів (SVM), застосованої до зображень ближнього інфрачервоного діапазону (NIR), отриманих із супутника Sentinel 2.

У дослідженні [12] для аналізу ґрунтового покриття було використано дистанційне зондування землі та географічну інформаційну систему. Аналіз полягав у створенні тематичних карт, які класифікували територію на забудовані землі, сільськогосподарські угіддя, водні об'єкти, ліси та пустирі. Автори підкреслюють важливість інтеграції інформації про ґрунтовий покрив з іншими природними ресурсами для ефективного планування землекористування як на макро-, так і на мікрорівні.

Автори роботи [13] відзначають, що аналіз земного покриття передбачає визначення та картографування фізичних характеристик землі, таких як рослинність, водні об'єкти та міські території, за допомогою наборів даних дистанційного зондування. Цей процес, відомий як картографування земного покриття, має важливе значення для розуміння динаміки землекористування та земного покриття. У дослідженні підкреслюється, що методи векторного аналізу змін забезпечують вищу точність виявлення змін порівняно з традиційними методами, заснованими на алгебрі, що робить їх цінними для ефективної класифікації земельного покриття в сільському господарстві.

У статті [14] обговорюється застосування глибинного навчання, зокрема згорткових нейронних мереж (CNN), для картографування земного покриття з використанням супутникових знімків високої роздільної здатності. Було застосовано три моделі семантичної сегментації - PSPNet, UNet та FPN, які досягли показників перетину над об'єднанням (Intersection over Union, IoU) 91, 78 та 64 % відповідно на наборі даних DeepGlobe.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри значну кількість досліджень, присвячених аналізу змін земельного покриття на основі даних дистанційного зондування Землі, низка важливих аспектів залишається недостатньо вивченою. Зокрема, більшість досліджень зосереджуються на аналізі глобальних або національних тенденцій, тоді

як регіональні особливості трансформацій ландшафтів, зумовлені локальними природно-кліматичними та соціально-економічними умовами, потребують подальшої деталізації.

У межах басейну річки Десна, який характеризується складною структурою землекористування та транскордонним розташуванням, досі обмежена кількість досліджень була присвячена інтегрованому аналізу земельного покриття із застосуванням комбінації оптичних (Sentinel-2) та радарних (Sentinel-1) супутникових даних. Недостатньо вивчено також потенціал використання відкритого продукту ESA WorldCover для оцінювання міжрічної стабільності земельного покриття на локальному рівні з високою просторовою деталізацією.

Крім того, недостатньо опрацьованим залишається питання інтеграції отриманих результатів із системами управління земельними ресурсами для формування практичних рекомендацій щодо просторового планування та збереження екосистем. Також актуальним є дослідження впливу антропогенних змін у структурі земного покриття на екологічну рівновагу водозбірних басейнів.

Таким чином, потребують подальшого вивчення:

- локальні просторово-часові зміни земельного покриття;
- ефективність поєднання мультисенсорних супутникових даних у регіональному масштабі;
- можливості адаптації результатів супутникового моніторингу для управлінських рішень у сфері сталого розвитку.

Мета дослідження (статті). Метою даної роботи є розробка та застосування геоінформаційного моделювання земельного покриття для виявлення просторово-часових змін у межах басейну річки Десна, а також для оцінки впливу природних і антропогенних чинників на структуру ландшафтів з подальшим формуванням науково обґрунтованих рекомендацій щодо сталого управління земельними ресурсами та збереження екологічної рівноваги в регіоні.

Виклад основного матеріалу. В умовах, що постійно змінюються, потреба в точній, своєчасній і високороздільній інформації про землекористування/грунтово-рослинний покрив і його зміни значно зросла. Однак досі регіональні або континентальні карти ґрунтово-рослинного покриття або використовували зображення низької роздільної здатності (>100 м) як вхідні дані, або ґрунтувалися винятково на даних оптичного спостереження Землі з високою роздільною здатністю, таких як Sentinel-2 або Landsat. Використання даних SAR, таких як Sentinel-1, для створення карт ґрунтово-рослинного покриття великих площ все ще перебуває в зародковому стані. Для поліпшення ситуації, за результатами конференції WorldCover 2017 року (<http://worldcover2017.esa.int>), в якій взяли участь понад 400 учасників, Європейське космічне агентство (ЄКА) ініціювало проєкт WorldCover. Ключовим результатом цього проєкту став випуск у жовтні 2021 р. у вільному доступі глобального продукту про ґрунтово-рослинний покрив із роздільною здатністю 10 м на 2020 р., який ґрунтується на даних Sentinel-1 і Sentinel-2, містить 11 класів ґрунтово-рослинного покриття і пройшов незалежну валідацію із загальною глобальною точністю 74,4 %.

Дані ESA WorldCover щодо глобального покриття ґрунтово-рослинного покриття ґрунту ґрунтуються на досвіді GlobCover і CCI Land Cover, розробленому Європейським космічним агентством. (Arino et al. 2008; ESA 2017). Алгоритм, який використовується для створення даних ESA WorldCover, заснований на алгоритмі створення динамічної щорічної карти земельного покриття Глобальної наземної служби програми "Коперник" (CGLS-LC) з роздільною здатністю 100 м (Buchhorn et al., 2020a). Робочий процес CGLS-LC використовує 100-метрові 5-денні дані Proba-V як вхідні дані, які були повторно оброблені в сітку Sentinel-2 UTM разом із даними навчання, отриманими з роздільною зда-

тністю 10 м. Однак для створення даних WorldCover замість даних Proba-V використовуються дані мультиспектральних зображень Sentinel-2 і дані радіолокатора із синтезованою апертурою (SAR) С-діапазону Sentinel-1 [15].

Дискретна класифікаційна карта містить 11 класів і визначена з використанням Системи класифікації ґрунтово-рослинного покриву (LCCS), розробленої об'єднанням національних (UN) продовольчих і сільськогосподарських організацій (FAO). Систему UN-LCCS було спроектовано як ієрархічну класифікацію, що дає змогу адаптувати тематичну деталізацію легенди до обсягу наявної інформації (табл. 1).

Таблиця 1 – Класи ґрунтово-рослинного покриву

Код карти	Клас ґрунтово-рослинного покриву	Кольоровий код (RGB)
10	Лісові масиви	0,100,0
20	Чагарники	255, 187, 34
30	Луки, сінокоси, пасовища	255, 255, 76
40	Оброблювані землі	240, 150, 255
50	Земля під забудовою	250, 0, 0
60	Рідкісна рослинність	180, 180, 180
70	Сніг та лід	240, 240, 240
80	Постійні водойми	0, 100, 200
90	Трав'янисті водно-болотні угіддя	0, 150, 160
95	Мангрові ліси	0, 207, 117
100	Мох та лишайник	250, 230, 160

Джерело: розроблено авторами.

Дані по басейн річки Десна було отримано на інтернет-ресурсі про Основні Річні Басейни Світу із Всесвітнього банку, що забезпечує кордони всіх основних річних басейнів світу у форматі шейп-файлу [16]. Отриманий полігональний шар використовувався як просторовий фільтр для вилучення об'єктів, розташованих за межами визначеної території.

Оскільки річка Десна розташована на території кількох країн, тому для отримання її басейну саме не території України, виконано додаткова геообробка.

У результаті його площа становила 33 316 км², що майже відповідає офіційним даним (33 820 км²).

Дані про глобальний земельний покрив отримано з джерела [17].

Шляхом вибору відповідної частини карти, підготовано дані у форматі GeoTif. Враховуючи географічні координати басейну річки Десна в межах України, до проєкту було інтегровано растрові шари, дані яких зберігаються у спеціалізованих файлах:

- ESA_WorldCover_10m_2020_v100_N48E030
- ESA_WorldCover_10m_2020_v100_N48E033
- ESA_WorldCover_10m_2020_v100_N51E030
- ESA_WorldCover_10m_2020_v100_N51E033

Ці шари було обрано відповідно до координат розташування басейну річки Десна саме на території України.

Шляхом об'єднання вихідних шарів у єдину віртуальну мозаїку з подальшим кропуванням за допомогою векторної маски (межі басейну річки Десна) було сформовано фінальний растровий шар земельного покриву цього водозбору (рис. 1).

У процесі проведення дослідження, було оброблено дані за 2020 та 2021 роки. Таким чином визначено, що на території басейну річки Десна в межах України переважають оброблювані землі, які займають близько 45 % території. На другому місці за площею знаходяться лісові масиви (приблизно 34%), а на третьому – луки, сінокоси та пасовища (майже 19 %). Решта типів земельного покриву представлені у незначних обсягах.



Рис. 1. Растровий шар земельного покрову басейну річки Десна

Джерело: розроблено авторами.

Згідно з припущенням при виконанні цього дослідження, на розглянутому короткому часовому інтервалі істотні зміни в структурі земельного покрову цієї території не спостерігаються.

Висновки. У результаті проведеного дослідження підтверджено високу ефективність використання супутникових даних, зокрема продукту ESA WorldCover, для аналізу земельного покрову на прикладі басейну річки Десна. Застосування даних Sentinel-1 та Sentinel-2 дозволило отримати класифікаційну карту земель з просторовою роздільною здатністю 10 м, що забезпечило точне картографування різних типів земного покрову.

Аналіз показав, що територія басейну річки Десна в межах України здебільшого представлена оброблюваними землями (близько 45 %), лісовими масивами (приблизно 34 %) та луками й пасовищами (майже 19 %). Інші типи покрову мають незначне представлення. На короткому часовому інтервалі (2020–2021 рр.) суттєвих змін у структурі землекористування не зафіксовано, що може свідчити про стабільність земного покрову в цьому регіоні у вказаний період.

Загалом, результати дослідження підкреслюють важливість інтеграції сучасних технологій дистанційного зондування Землі для моніторингу земельного покрову. Такі підходи є ключовими для забезпечення ефективного природокористування, просторового планування та прийняття рішень у сфері охорони навколишнього середовища, управління земельними ресурсами та адаптації до кліматичних змін.

Список використаних джерел

1. Колотій, А. В. (2017). Аналіз змін земного покрову в Україні як індикатор деградації земель. *Індуктивне моделювання складних систем* : зб. наук. пр. МННЦ ІТС НАН та МОН України, 9, 108–114.
2. Путренко, В., & Гапон, С. (2021). Інтелектуальний аналіз землекористування в розрізі територіальних громад України. У *Екологія. Людина. Суспільство* (с. 318–320). КПІ ім. Ігоря Сікорського. <https://doi.org/10.20535/EHS.2021.233529>.
3. Пивовар, П. В., Топольницький, П. П., Скидан, О. В., & Янчевський, С. Л. (2024). Аналіз змін земного покрову на основі ГІС: приклад Житомирської області, Україна. *Космічна наука і технологія*, 29(4), 024–042. <https://doi.org/10.15407/knit2023.04.024>.
4. Strobl, J., & Nazarkulova, A. (2022). Land Cover Cloud Analytics: from Global Services to Regional Insights. *International Journal of Geoinformatics*, 18(6), 1–9. <https://doi.org/10.52939/ijg.v18i6.2451>.
5. Sangita Singh, Kiranmay Sarma. Analyzing the change in land cover dynamics: A case study of Delhi, 03 April 2023, PREPRINT (Version 1). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2743780/v1>.
6. Mukhopadhyay, A., Hornby, D. D., Hutton, C. W., Lázár, A. N., Amoako Johnson, F., & Ghosh, T. (2018). Land cover and land use analysis in coastal bangladesh. In *Ecosystem services for well-being in deltas* (pp. 367–381). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71093-8_20.
7. Suni, M. A., Syukur Asa, Fahrul Himalaya Umar, & Rhamdhani Fitrah Baharuddin. (2023). Analisis perubahan tutupan lahan di sub das toili kabupaten banggai. *Nusantara Hasana Journal*, 2(10), 28–37. <https://doi.org/10.59003/nhj.v2i10.776>.

8. Ibrahim, N., Fahs, S., & AlZoubi, A. (2021). Land cover analysis using satellite imagery for humanitarian mine action and ERW survey. In S. S. Agaian, S. A. Jassim, S. P. DelMarco, & V. K. Asari (Eds.), *Multimodal image exploitation and learning 2021*. SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2589792>.
9. Barchok, F. K., Mabwoga, S. O., & Kirui, S. (2024). Assessment of land cover change due to stone quarrying in narok town ward. *Journal of the Kenya National Commission for UNESCO*, 4(2). <https://doi.org/10.62049/jkncu.v4i2.109>.
10. Saket Raj, Kishan Singh Rawat. Land use and Land cover Analysis using Geographical information system (GIS) and Principal component analysis (PCA), 03 May 2024, PREPRINT (Version 1) available at Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3869619/v1>.
11. Patel, K., Jain, M., Patel, M. I., & Gajjar, R. (2021). A novel approach for change detection analysis of land cover from multispectral FCC optical image using machine learning. In *2021 2nd international conference on range technology (ICORT)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icort52730.2021.9582057>
12. Gope Naik, Dr. V., Ramanarasimha Rao, B., Naresh Kumar K. (2015) An Analysis on Land Use/Land Cover Using Remote Sensing and GIS—A Case Study In and Around Chigicherla Watershed Anantapur District, Andhra Pradesh, India. *International Journal of Scientific Research*, 4(11).
13. Sharma, N., & Chawla, S. (2023). Digital change detection analysis criteria and techniques used for land use and land cover classification in agriculture. In *2023 3rd international conference on advance computing and innovative technologies in engineering (ICACITE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icacite57410.2023.10182604>.
14. Patil, V., N., Z. S., Bhosale, R., Shetty, N., & Shah, V. (2023). Land cover mapping using semantic segmentation models. In *2023 7th international conference on computing, communication, control and automation (ICCUBE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/iccubea58933.2023.10392136>.
15. Zanaga, D., Van De Kerchove, R., Daems, D., De Keersmaecker, W., Brockmann, C., Kirches, G., Wevers, J., Cartus, O., Santoro, M., Fritz, S., Lesiv, M., Herold, M., Tsendbazar, N.-E., Xu, P., Ramoino, F., & Arino, O. (2022). ESA WorldCover 10 m 2021 v200 (Версия v200) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7254221>.
16. *Major river basins of the world | data catalog*. (n.d.). Data Catalog. <https://datacatalog.worldbank.org/dataset/major-river-basins-world>.
17. *ESA WorldCover 2020*. (n.d.). ESA WorldCover 2020. <https://worldcover2020.esa.int>.

References

1. Kolotii, A. V. (2017). Analiz zmin zemnoho pokryvu v Ukraini yak indykator dehradatsii zemel. [Analysis of land cover changes in Ukraine as an indicator of land degradation] *Induktyvne modeliuвання складних систем - Inductive modelling of complex systems*, (9), 108- 114. <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/133645/11-Kolotiy.pdf?sequence=1>.
2. Putrenko, V. V., & Hapon S. V. (2021) Intelktualnyi analiz zemlekorystuvannya v rozrizi terytorialnykh hromad Ukrainy. [Intellectual analysis of land use in the context of territorial communities of Ukraine]. *U Ekologhiia. Liudyna. Suspilstvo* (s. 318–320). KPI im. Ihoria Sikorskoho - In Ecology. Man. Society (pp. 318-320). Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. <https://doi.org/10.20535/EHS.2021.233529>.
3. Pyvovar, P. V., Topolnytskyi P. P., Skydan O. V., & Yanchevskyi S. L. Analiz zmin zemnoho pokrytu na osnovi HIS: pryklad Zhytomyrskoi oblasti. [Analysis of land cover changes based on GIS: the case of Zhytomyr region, Ukraine]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiia – Space Science and Technology*, 29(4), 024–042. <https://doi.org/10.15407/knit2023.04.024>.
4. Strobl, J., & Nazarkulova, A. (2022). Land Cover Cloud Analytics: from Global Services to Regional Insights. *International Journal of Geoinformatics*, 18(6), 1–9. <https://doi.org/10.52939/ijg.v18i6.2451>.
5. Sangita Singh, Kiranmay Sarma. Analyzing the change in land cover dynamics: A case study of Delhi, 03 April 2023, PREPRINT (Version 1). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2743780/v1>.
6. Mukhopadhyay, A., Hornby, D. D., Hutton, C. W., Lázár, A. N., Amoako Johnson, F., & Ghosh, T. (2018). Land cover and land use analysis in coastal bangladesh. In *Ecosystem services for well-being in deltas* (pp. 367–381). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71093-8_20.

7. Suni, M. A., Syukur Asa, Fahrul Himalaya Umar, & Rhamdhani Fitrah Baharuddin. (2023). Analisis perubahan tutupan lahan di sub das toili kabupaten banggai. *Nusantara Hasana Journal*, 2(10), 28–37. <https://doi.org/10.59003/nhj.v2i10.776>.
8. Ibrahim, N., Fahs, S., & AlZoubi, A. (2021). Land cover analysis using satellite imagery for humanitarian mine action and ERW survey. In S. S. Agaian, S. A. Jassim, S. P. DelMarco, & V. K. Asari (Eds.), *Multimodal image exploitation and learning 2021*. SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2589792>.
9. Barchok, F. K., Mabwoga, S. O., & Kirui, S. (2024). Assessment of land cover change due to stone quarrying in narok town ward. *Journal of the Kenya National Commission for UNESCO*, 4(2). <https://doi.org/10.62049/jkncu.v4i2.109>.
10. Saket Raj, Kishan Singh Rawat. Land use and Land cover Analysis using Geographical information system (GIS) and Principal component analysis (PCA), 03 May 2024, PREPRINT (Version 1) available at Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3869619/v1>.
11. Patel, K., Jain, M., Patel, M. I., & Gajjar, R. (2021). A novel approach for change detection analysis of land cover from multispectral FCC optical image using machine learning. In *2021 2nd international conference on range technology (ICORT)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icort52730.2021.9582057>.
12. Gope Naik, Dr. V., Ramanarasimha Rao, B., Naresh Kumar K. (2015) An Analysis on Land Use/Land Cover Using Remote Sensing and GIS—A Case Study In and Around Chigicherla Watershed Anantapur District, Andhra Pradesh, India. *International Journal of Scientific Research*, 4(11).
13. Sharma, N., & Chawla, S. (2023). Digital change detection analysis criteria and techniques used for land use and land cover classification in agriculture. In *2023 3rd international conference on advance computing and innovative technologies in engineering (ICACITE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icacite57410.2023.10182604>.
14. Patil, V., N., Z. S., Bhosale, R., Shetty, N., & Shah, V. (2023). Land cover mapping using semantic segmentation models. In *2023 7th international conference on computing, communication, control and automation (ICCUBE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/iccubea58933.2023.10392136>.
15. Zanaga, D., Van De Kerchove, R., Daems, D., De Keersmaecker, W., Brockmann, C., Kirches, G., Wevers, J., Cartus, O., Santoro, M., Fritz, S., Lesiv, M., Herold, M., Tsendbazar, N.-E., Xu, P., Ramoino, F., & Arino, O. (2022). ESA WorldCover 10 m 2021 v200 (Версія v200) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7254221>.
16. *Major river basins of the world | data catalog*. (n.d.). Data Catalog. <https://datacatalog.worldbank.org/dataset/major-river-basins-world>.
17. *ESA WorldCover 2020*. (n.d.). ESA WorldCover 2020. <https://worldcover2020.esa.int>.

Отримано 22.05.2025

UDC 528:004

Oleksii Voronkov¹, Kateryna Dolinska², Andrii Yevdokimov³¹PhD in Economy Sciences, Associate Professor

Associate Professor, Department of Land Administration and Geoinformation Systems

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: Voronkov.Oleksii@kname.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6905-0098>²Master's student, 1st year, Department of Land Administration and Geoinformation Systems, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)**E-mail:** Kateryna.Dolinska@kname.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-9836-7836>³PhD in Technical Sciences, Associate Professor,

Associate Professor of Department of Land Administration and Geoinformation Systems

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: Andriy.Evdokimov@kname.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7538-8922>**STUDY OF LAND COVER USING SATELLITE DATA**

This study presents the analysis of land cover in the Desna River basin using satellite data from Sentinel-1 and Sentinel-2 based on the open-access ESA WorldCover dataset for 2020–2021. The research focuses on spatial distribution and classification of land cover types within the Ukrainian part of the river Desna basin, utilizing remote sensing and GIS tools to process and interpret the data. Boundaries of the River Desna basin were defined using shapefiles provided by the World Bank, followed by geospatial processing to isolate the relevant Ukrainian territory. The processed data, formatted as GeoTIFF raster layers, were compiled into a virtual mosaic and clipped according to the Desna basin boundary to generate the comprehensive land cover map.

The results indicate that arable lands dominate the area, accounting for approximately 45% of the territory. Forests occupy about 34%, while meadows, hayfields, and pastures represent nearly 19 %. Other land cover types, such as wetlands and artificial surfaces, are present in smaller proportions. The comparative assessment of data from 2020 and 2021 revealed no significant structural changes in land cover during the observed period, supporting the hypothesis of short-term land use stability.

This study highlights the importance of high-resolution satellite data for monitoring and evaluating land use patterns and ecosystem dynamics, especially in transboundary river basins. The integration of optical (Sentinel-2) and radar (Sentinel-1) data enhances classification accuracy and allows for comprehensive environmental assessment. The use of the ESA World-Cover dataset, based on the UN-LCCS classification system, ensures consistency and comparability of results across regions and timeframes. The findings may support sustainable land management, environmental planning, and policy-making at regional and national levels.

Geoinformation modeling of the land cover is a powerful tool for identifying and forecasting changes in natural ecosystems. This study provides important scientific foundations for land resource management and the sustainable development of the Desna River basin. The use of geographic information systems and land cover models enables informed decision-making aimed at preserving biodiversity, mitigating anthropogenic impacts, and fostering a sustainable ecological balance in the region.

Keywords: modeling; land cover; land use; remote sensing; satellite images.

Fig.: 1. Table: 1. References: 17.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-463-471](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-463-471)

УДК 528.8.044.2

Денис Васильович Кухтар¹, Любов Ігорівна Дорош²¹кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри вищої геодезії та астрономії
Національного університету «Львівська політехніка» (Львів, Україна)E-mail: kukhtar3088@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2839-4318>

Scopus Author ID: 57203755866

²кандидат технічних наук, асистент кафедри геодезії та землеустрою

Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (Івано-Франківськ, Україна)

E-mail: liubov.dorosh@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2971-4034>

Scopus Author ID: 57210603240

МЕТОДИКА ОРІЄНТУВАННЯ НАЗЕМНИХ КУТОВИХ ВІДБИВАЧІВ ДЛЯ СУПУТНИКОВОГО РАДІОЛОКАЦІЙНОГО ЗНІМАННЯ

Підготовка території для проведення моніторингу засобами супутникового радіолокаційного зондування розпочинається зі встановлення та орієнтування наземних кутових відбивачів у напрямку на супутник. Від правильності виконання цього етапу залежить надійність та ефективність супутникового радіолокаційного моніторингу. У роботі представлено покроковий алгоритм дій при розгортанні кутових відбивачів на місцевості, який передбачає проектування положення кутових відбивачів, розрахунок елементів орієнтування, методику їхнього встановлення та перевірку ефективності розгортання. Актуальні та необхідні для розрахунків дані отримано з онлайн-ресурсу *Heavens Above*, що надає у вільному доступі інформацію про ефемериди космічних апаратів. Оцінка інтенсивності зворотного розсіювання радіолокаційного сигналу в місці розгортання кутового відбивача виконувалась засобами онлайн-платформи для перегляду та аналізу супутникових знімків *Copernicus Browser*. Сформовані рекомендації та алгоритми є основою для формування нормативних документів та стандартів, які передбачатимуть встановлення на місцевості кутових відбивачів для супутникового радіолокаційного моніторингу.

Ключові слова: деформації; ефективна площа розсіювання; лінія візування супутника; SAR; Sentinel-1.

Рис.: 7. Табл.: 1. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Одним із основних наземних компонентів супутникового радіолокаційного моніторингу є наземні кутові відбивачі. Це пасивні пристрої, завдяки яким забезпечується стабільне та інтенсивне відбиття радіолокаційного сигналу. Його конструкція зазвичай складається з трьох взаємно перпендикулярних металевих площин, що утворюють внутрішній кут 90°. Завдяки такій геометрії, електромагнітна хвиля, багаторазово відбивається від поверхонь і повертається в напрямку джерела випромінювання, тобто до супутника [1; 2]. При цьому кутовий відбивач забезпечує високу ефективну площу розсіювання (RCS – Radar Cross Section), що робить його надійною референсною ціллю для супутникового радіолокаційного моніторингу [3].

Потреба в таких відбивачах виникає при моніторингу деформацій земної поверхні на територіях із низькою когерентністю, що зазвичай вкриті рослинним покривом (наприклад, незабудовані території над шахтними полями [4; 5], зсувонебезпечні ділянки [6] та ін.). Урбанізовані території та інженерні споруди забезпечують якісне й надійне відбиття радіолокаційного сигналу. Проте значення інтенсивності такого сигналу, отриманого із висхідної та низхідної орбіт супутника, може суттєво відрізнятись. Це, у свою чергу, знижує ефективність радіолокаційного моніторингу, кінцевою метою якого є розклад вектора деформацій на вертикальну і горизонтальну компоненти. Тому розгортання мережі наземних кутових відбивачів, які забезпечують підвищення інтенсивності сигналу відразу для висхідної та низхідної орбіт супутника, особливо актуально на інженерних об'єктах та спорудах (геодинамічні полігони, дамби гідроелектростанцій, підземні сховища газу та ін.).

Окремо варто виділити напрямок розроблення перманентних ГНСС станцій, які поєднують конструкцію пілона з кутовими відбивачами. Це дозволить виконувати сумісне опрацювання даних ГНСС-вимірювань та результати супутникового радіолокаційного моніторингу.

Для кожного з наведених прикладів важливо правильно встановити та зорієнтувати у просторі наземні кутові відбивачі, що забезпечить надійність та високу ефективність супутникового радіолокаційного моніторингу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Отриманий авторами практичний досвід розгортання наземних кутових відбивачів підтверджує ефективність застосованих алгоритмів розрахунку параметрів для орієнтування відбивачів на місцевості [7]. Згідно з теоретичними розрахунками [8], наземний кутовий відбивач зі стороною внутрішнього ребра 1 м повинен забезпечувати підвищення інтенсивності зворотного розсіювання на 10 dB. Таких результатів було досягнуто при розгортанні трикутних кутових відбивачів на тестовому майданчику, на дамбі Теремле-Ріцької ГЕС та на навчально-науковому геодезичному полігоні Національного університету «Львівська політехніка» у м. Бережани [9].

При проєктуванні положення кутового відбивача важливо враховувати геометрію і режими знімання радаром супутника. Орієнтують відбивачі таким чином, щоб вони потрапляли у смугу зображення максимальної кількості радіолокаційних супутників. Таким чином кутовий відбивач буде відображатися на максимальній кількості радіолокаційних знімків. Для забезпечення можливості визначення векторів просторових деформацій, за результатами радіолокаційної інтерферометрії, необхідно застосовувати пару відбивачів, які орієнтують окремо для висхідної та низхідної орбіти [7].

Різноманітність форм та конструктивних рішень кутових відбивачів вимагає диференційованого підходу до методики орієнтування. При орієнтуванні на одну з орбіт (висхідну або низхідну), важливо встановити відбивач у напрямку візування супутника. Визначальним параметром для орієнтування відбивача в горизонтальній площині є азимут руху супутника. Відомо, що з урахуванням правостороннього орієнтування радару супутника, для території України азимуту орієнтування відбивача становлять близько 100° для низхідної орбіти та 260° – для висхідної. Таким чином різниця двох напрямків становить 160° .

Світова практика розгортання пунктів для радіолокаційного моніторингу передбачає поєднання двох окремих відбивачів із різницею напрямків центральної осі на 160° , а також використання одного кругового (багатогранного) відбивача, конструкція якого забезпечує різницю напрямків на 180° (рис. 1).

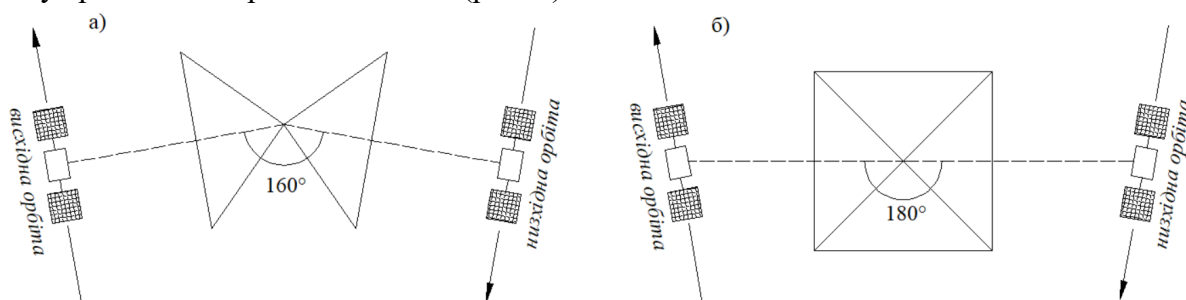


Рис. 1. Схема орієнтування на пункті пари кутових відбивачів (а) та багатогранного відбивача (б)

Джерело: розроблено авторами.

Незважаючи на відхилення центральних осей багатогранного відбивача від нормалей до висхідної та низхідної орбіт (рис. 1, б), така конструкція забезпечує необхідне підвищення інтенсивності розсіювання радіолокаційного сигналу при орієнтуванні в напрямку Схід-Захід [9]. На рис. 2 представлено вигляд кругового чотиригранного відбивача на дамбі Теремле-Ріцької ГЕС та графік інтенсивності розсіювання сигналу після його розгортання в липні 2023 р.

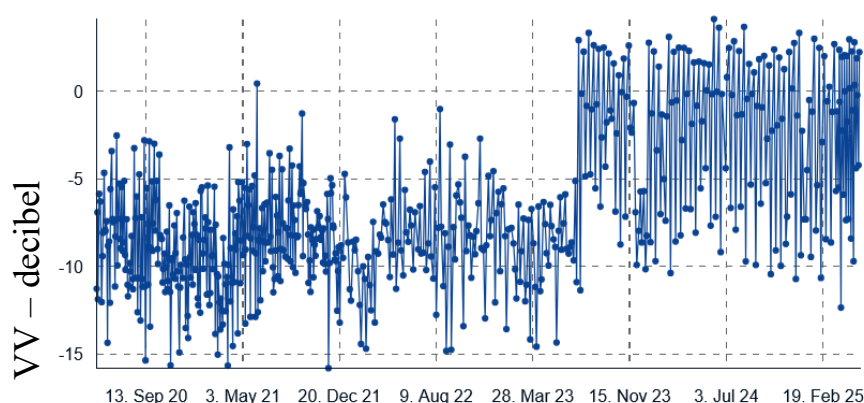


Рис. 2. Круговий чотиригранний кутовий відбивач з довжиною ребра 1,0 м, встановлений на дамбі Теремле-Ріцької ГЕС та графік інтенсивності зворотного розсіювання у місці його розгортання

Джерело: розроблено авторами.

Додатковою перевагою такого відбивача є його компактність у порівнянні з використанням пари відбивачів, що особливо актуально при встановленні на інженерних об'єктах та промислових конструкціях.

У межах виконання наукових проектів ДБ/ГЕОС «Аналіз впливу воєнних дій на просторові деформації Дністровського гідроенергетичного комплексу контактними та дистанційними методами» та «Комплексний моніторинг природних та техногенних незворотних деформаційних процесів території та критичної інфраструктури Рівненської АЕС», Інститутом геодезії НУЛП розроблено комплексний геодезичний пункт. Основне його призначення – об'єднувати в одній просторовій системі результати ГНСС-вимірів, супутникових радіолокаційних спостережень та геометричного нівелювання. Конструкція цього пункту передбачає встановлення двох окремих відбивачів для висхідної та низхідної орбіт супутника. Для цього необхідно точно розрахувати параметри орієнтування кожного із них. На рис. 3 представлено зображення комплексного геодезичного пункту. Трикутна рама для кріплення відбивачів забезпечує різницю напрямків у 160° для точного орієнтування на висхідну та низхідну орбіти супутника Sentinel-1.



Рис. 3. Комплексний геодезичний пункт:

а – основа пункту з рамою для орієнтування відбивачів у потрібному напрямку;

б – пункт зі змонтованим відбивачем для супутникового радіолокаційного моніторингу

Джерело: розроблено авторами.

Важливим питанням надійності результатів радіолокаційного моніторингу є не лише підвищення інтенсивності зворотного розсіювання сигналу в місці розгортання кутового відбивача, але і збереження отриманого значення впродовж усього періоду досліджень. Основною проблемою, яка спричиняє зниження значення інтенсивності сигналу, є затоплення відбивача дощовою водою, обледеніння, заповнення снігом. Тому світовий і вітчизняний досвід розгортання кутових відбивачів передбачає використання різноманітних захисних екранів [10; 11]. На рис. 4 представлено кутовий відбивач, встановлений на навчально-науковому геодезичному полігоні у м. Бережани, який оснащений захисним екраном із монолітного полікарбонату. Цей матеріал не перешкоджає проникненню та розсіюванню радіолокаційного сигналу, однак запобігає накопиченню опадів всередині відбивача.



Рис. 4. Трикутний кутовий відбивач із захисним екраном, встановлений у м. Бережани
Джерело: [9].

Проблема акумуляції опадів всередині відбивача частково вирішується за рахунок розміщення відбивачів на комплексному геодезичному пункті вниз одним із ребер (рис. 3, б). Таким чином, затоплення відбивача дощовою водою повністю виключається, а питання накопичення опадів у вигляді снігу може бути вирішене шляхом встановлення захисного екрана. Дослідження на комплексному геодезичному пункті показали достатнє підвищення інтенсивності зворотного розсіювання радіолокаційного сигналу (рис. 5).

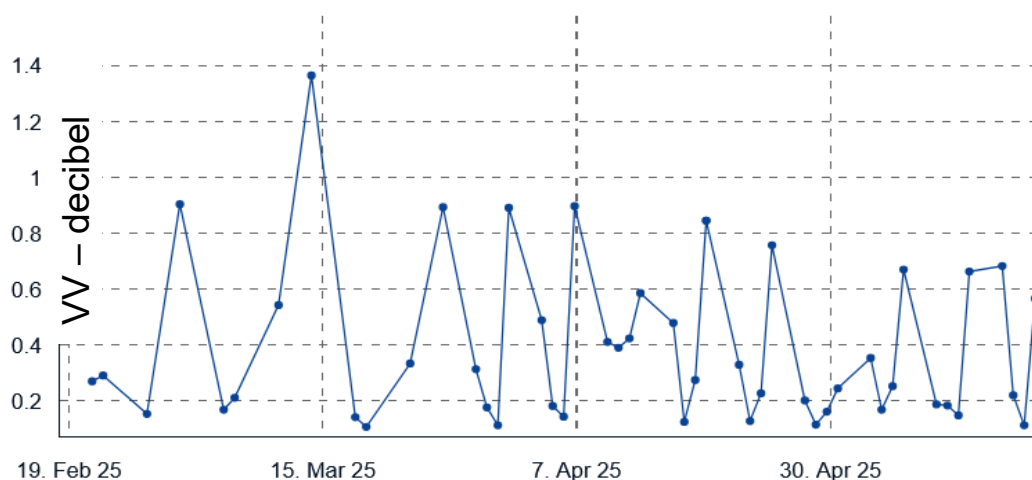


Рис. 5. Часова серія інтенсивності зворотного розсіювання у місці розгортання відбивача для комплексного геодезичного пункту (14.03.2025 р.)

Джерело: розроблено авторами.

З рис. 5 бачимо, що майданчик, де встановлювався відбивач, природно забезпечує достатньо високі значення розсіювання радіолокаційного сигналу. Проте на знімку від 14.03.2025 р. чітко спостерігається підвищення інтенсивності сигналу завдяки розгортанню кутового відбивача на момент спостереження.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. На сьогодні нормативні документи та стандарти щодо застосування даних супутникового радіолокаційного знімання не розроблені. Водночас є широкий запит на використання даних дистанційного зондування, зокрема радіолокаційного знімання, для геодезичного моніторингу інженерних об'єктів на техногенно навантажених територіях. Розбудова наземної інфраструктури для проведення такого моніторингу передбачає розгортання мереж кутових відбивачів з обґрунтованим підходом до вибору місць їхнього встановлення та орієнтування на місцевості.

Метою роботи є формування алгоритму розрахунку параметрів та методики орієнтування наземних кутових відбивачів для забезпечення максимальної ефективності відбиття радіолокаційного сигналу в умовах супутникового знімання.

Виклад основного матеріалу. Методика встановлення наземних кутових відбивачів на місцевості передбачає комплекс заходів пов'язаних з вибором місць встановлення, підбором оптимальної конструкції відбивача, правильним його орієнтуванням на місцевості та перевіркою ефективності його роботи.

Проектування положення відбивача.

При виборі місця для встановлення наземного кутового відбивача, або мережі відбивачів, необхідно забезпечити максимальне підвищення відбиваючої здатності радіолокаційного сигналу. Це досягається завдяки високому значенню ефективної площі розсіювання відбивача, що створює контраст у порівнянні з відбиваючою здатністю решти території. Від цього залежить ефективність роботи відбивача, надійність і точність результатів визначення деформацій.

Попередній аналіз відбиваючої здатності території рекомендується виконувати шляхом аналізу радіолокаційних знімків, отриманих відповідним супутником для висхідних та низхідних орбіт.

Найбільш сприятливими місцями для встановлення відбивачів є відкрита місцевість з невисоким рослинним покривом, відсутність високих споруд, будівель та дерев, які б обмежували видимість на супутник. Найбільш ретельно потрібно підходити до проектування положення відбивачів на промислових майданчиках, забудованій території та кам'янистій місцевості, оскільки такі території мають високий рівень відбиваючої здатності. Найкраще розміщувати відбивачі на незабудовані території (наприклад, неподалік орних земель або на цілині). Таким чином буде забезпечений максимальний контраст відбивача щодо навколишньої території. Остаточний вибір місць встановлення кутових відбивачів виконується після польового рекогносрування місцевості.

Орієнтування наземних кутових відбивачів.

Для правильного розуміння елементів орієнтування кутового відбивача, розглянемо кілька теоретичних питань. Вісь симетрії кутового відбивача – це напрямок максимальної ефективної відбивної здатності, у якому тригранний відбивач найкраще відбиває радіохвилю назад до джерела. Вісь симетрії кутового відбивача, яка проходить точно під кутом 45° до кожної з двох суміжних граней тригранної конструкції. Саме вздовж цього напрямку максимізується інтенсивність зворотного сигналу, який отримує супутниковий радар. Щоб зорієнтувати відбивач на супутник, необхідно сумістити напрямки осі симетрії кутового відбивача (boresight) та напрямку лінії візування супутника (line-of-sight, LOS). Якщо ці два напрямки спрямовано не точно, тоді ефективність сигналу значно знижується.

1. Орієнтування відбивача на місцевості виконують таким чином, щоб його вісь симетрії була спрямована в напрямку положення супутника в момент знімання [12]. На рис.

б представлено схему орієнтування на прикладі тригранного трикутного кутового відбивача. Відомо, що вісь симетрії будь-якого кутового відбивача проходить під кутом 45° між вертикальними гранями та піднята на кут φ :

$$\varphi = \tan^{-1}(1/\sqrt{2}) = 35.26^\circ. \quad (1)$$

Тому для орієнтування відбивача у горизонтальній площині, вісь симетрії повертають від напрямку на північ на величину кута A (азимут спостереження супутника). Нижню грань відбивача підносять на кут θ відносно горизонтальної площини. Величина кута θ визначається як різниця висоти спостереження супутника ε та кута φ [12]:

$$\theta = \varepsilon - \varphi. \quad (2)$$

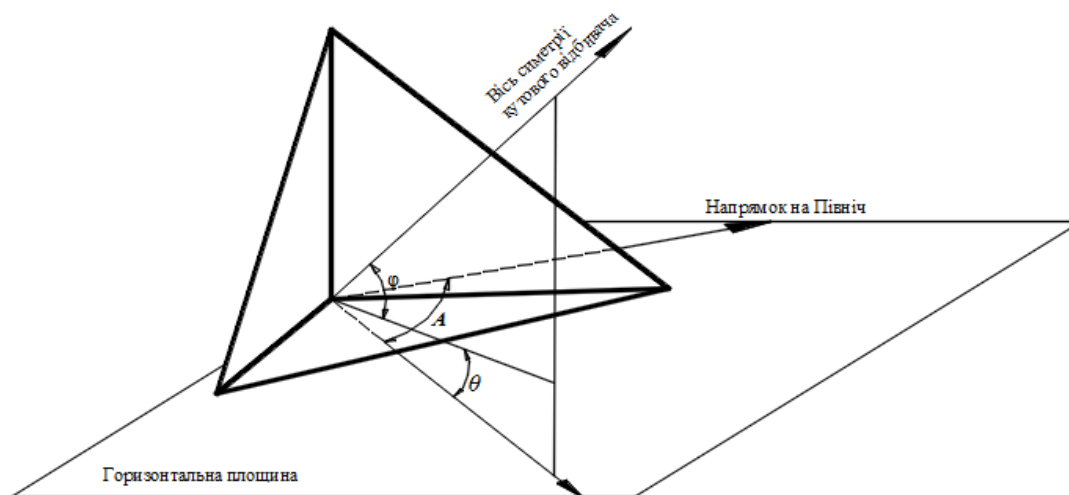


Рис. 6. Схема орієнтування кутового відбивача

Джерело: розроблено авторами.

2. Наступним кроком є визначення азимуту та висоти супутника в точці розгортання кутового відбивача. Актуальні та необхідні дані можна отримати з онлайн ресурсів чи створених застосунків, що надають у вільному доступі інформацію про ефемериди космічних апаратів та інших астрономічних об'єктів. Найпоширеніші з них: Heavens Above, Celestia, See a Satellite Tonight, ISS Detector, Orbitron. Вхідними даними для визначення параметрів орбіти супутника є координати точки встановлення відбивача, час та дата проведення радіолокаційного знімання, назва супутника.

Параметри орбіти супутника Sentinel-1A визначено на основі даних онлайн ресурсу Heavens Above (heavens-above.com) [13] за наступним алгоритмом:

1. У вікні авторизації вказуємо місце розташування відбивача та місцевий час. Ресурс передбачає виконання пошуку локації за назвою населеного пункту, шляхом вибору місця на карті або введенням координат вручну.

2. Виконуємо пошук даних про необхідний космічний апарат. Для цього в меню «Супутники» переходимо на вкладку «База даних супутників» та обираємо супутник зі списку, за назвою або ідентифікаційним номером (для супутника Sentinel-1A №39634).

3. Переходимо за вкладкою «Усі прольоти». У результаті відображається список дат та деталі прольотів супутника над вибраною територією.

4. Обираємо зі списку дату та час проведення радіолокаційного знімання для отримання деталей наземної траєкторії прольоту супутника висхідною орбітою (табл. 1). Контролем правильності вибору значень є порівняння часу виконання радіолокаційного знімання (з метаданих знімку) та моменту проходження супутника на максимальній висоті в точці спостереження (табл. 1). Різниця не повинна перевищувати кількох секунд з врахуванням поправки між всесвітнім та місцевим часом.

Таблиця 1 – Деталі прольоту супутника Sentinel-1A над територією для розгортання наземного кутового відбивача

Подія	Час	Висота	Азимут	Відстань (км)	Яскравість	Висота сонця
Сходить	18:03:40	0°	181°(Пд)	3 063	9,0	1,7°
Досягає висоти 10°	18:05:59	10°	187°(Пд)	2 151	8,3	1,3°
Максимальна висота	18:10:31	47°	261°(З)	931	7,1	0,6°
Заходить нижче висота 10°	18:15:06	10°	335°(ПнПнЗ)	2 169	8,5	-0,1°
Заходить за горизонт	18:17:27	0°	342°(ПнПнЗ)	3 092	9,2	-0,5°

Джерело: розроблено авторами.

У табл. 1 представлено необхідні дані для розрахунку параметрів орієнтування відбивача, які зазначені в рядку «максимальна висота»: азимут на супутник $A=261^\circ$; висота супутника над горизонтом $\varepsilon=47^\circ$. Для цього прикладу, при орієнтуванні відбивача (за схемою на рис. 6), вісь симетрії спрямовують за азимутом $A=261^\circ$, а нижню грань відбивача підносять на кут $\theta = \varepsilon - \varphi = 47^\circ - 35,26^\circ = 11,74^\circ \approx 12^\circ$.

Перевірка ефективності розгортання відбивача.

Завершальним етапом є перевірка якості розгортання відбивача. Виконується за допомогою аналізу зміни інтенсивності зворотного розсіювання на радіолокаційних знімках. Для цього застосовують онлайн-платформи з можливістю перегляду даних радіолокаційного знімання. Дані супутника Sentinel-1A зручно аналізувати засобами платформи Copernicus Browser [14].

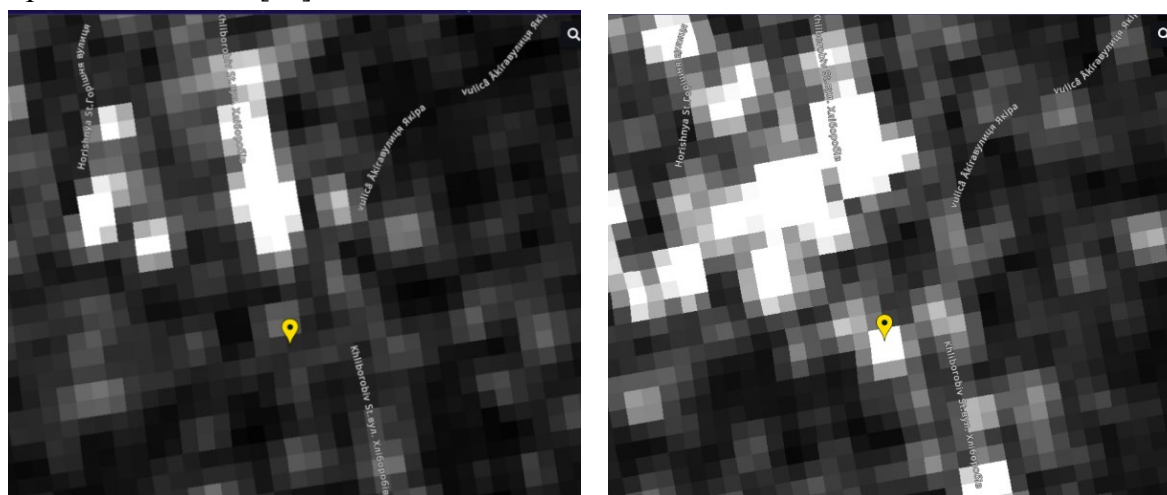


Рис. 7. Інтенсивність зворотного розсіювання на радіолокаційних знімках до та після розгортання наземного кутового відбивача

Джерело: розроблено авторами.

Додаткові інструменти Copernicus Browser дозволяють побудувати часовий ряд зворотного розсіювання, для точки де було встановлено відбивач. Таким чином можна проаналізувати ефективність розгортання кутового відбивача.

Висновки. Розгортання мережі наземних кутових відбивачів є необхідним та важливим етапом підготовки до проведення моніторингу як природних, так і техногенних геодинамічних процесів засобами супутникового радіолокаційного зондування. Від правильності орієнтування відбивачів на місцевості залежить подальша ефективність використання радіолокаційних даних. Сформований у статті алгоритм є не лише покроковою інструкцією для проектування положення наземних кутових відбивачів, методики їхнього орієнтування та перевірки ефективності розгортання, але й основою для формування нормативних документів та стандартів, які передбачатимуть виконання такого виду робіт.

Список використаних джерел

1. Doerry, A. (2008). *Reflectors for SAR performance testing*. (Nos. SAND2008-0396, 929123; SAND2008-0396, 929123). <https://doi.org/10.2172/929123>.
2. Banyai, L., Nagy, L., Hooper, A., Bozso, I., Szucs, E., & Wertztergom, V. (2020). Investigation of Integrated Twin Corner Reflectors Designed for 3-D InSAR Applications. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(6), 1013–1016. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2939675>.
3. Garthwaite, M. C., Nancarrow, S., Hislop, A., Thankappan, M., Dawson, J. H., & Lawrie, S. (2015). Design of radar corner reflectors for the Australian Geophysical Observing System. *Geoscience Australia*, 3, 490.
4. Colombo, D. and MacDonald, B. (2015). Using advanced InSAR techniques as a remote tool for mine site monitoring. In *Proceedings of the International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*. https://site.tre-altamira.com/wp-content/uploads/2015_InSAR_mine-site_monitoring.pdf.
5. Du, Y., Yan, S., Zhao, F., Chen, D. and Zhang, H. (2022). DS-InSAR Based Long-Term Deformation Pattern Analysis in the Mining Region With an Improved Phase Optimization Algorithm. *Front. Environ. Sci.* 10:799946. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.799946>
6. Piestova, I., Dugin, S., Orlenko, T., & Svideniuk, M. (2020). Assessing and forecasting landslide hazards of The Right Bank of the Kanev reservoir based on radar remote sensing data with corner reflectors using. *XIV international scientific conference "monitoring of geological processes and ecological condition of the environment"*. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056082>.
7. Tretiyak, K., Kukhtar, D., Prykhodko, M., & Yatsyk, V. (2023). Deployment technique of radar corner reflector for SAR observations. *X International conference of young professionals «geoterrace-2023»*. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510038>.
8. Garthwaite, M. (2017). On the design of radar corner reflectors for deformation monitoring in multi-frequency insar. *Remote Sensing*, 9(7), 648. <https://doi.org/10.3390/rs9070648>
9. Kukhtar, D., Hlotov, V., & Zayats, O. (2023). Geodesy, cartography, and aerial photography. *Geodesy, Cartography, and Aerial Photography*, 98,2023(98), 42–49. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.98.042>
10. Tzouvaras, M., Danezis, C., & Hadjimitsis, D. G. (2020). Differential SAR Interferometry Using Sentinel-1 Imagery-Limitations in Monitoring Fast Moving Landslides: The Case Study of Cyprus. *Geosciences*, 10(6), 236. <https://doi.org/10.3390/geosciences10060236>.
11. Crosetto, M., Gili, J. A., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Corominas, J., & Serral, D. (2013). Interferometric SAR monitoring of the Vallcebre landslide (Spain) using corner reflectors. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(4), 923–933. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-923-2013>.
12. Liu, J., Li, T., Ma, S., Wen, Y., Xu, Y., & Nie, G. (2024). Analysis of the dihedral corner reflector's RCS features in multi-resource SAR. *Applied Sciences*, 14(12), 5054. <https://doi.org/10.3390/app14125054>.
13. Heavens Above (2023, March 01). *Satellite database*. <http://www.heavens-above.com>.
14. Copernicus Browser (2023, March 05). *Satellite database*. <https://browser.dataspace.copernicus.eu>.

References

1. Doerry, A. (2008). *Reflectors for SAR performance testing*. (Nos. SAND2008-0396, 929123; SAND2008-0396, 929123). <https://doi.org/10.2172/929123>.
2. Banyai, L., Nagy, L., Hooper, A., Bozso, I., Szucs, E., & Wertztergom, V. (2020). Investigation of Integrated Twin Corner Reflectors Designed for 3-D InSAR Applications. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(6), 1013–1016. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2939675>.
3. Garthwaite, M. C., Nancarrow, S., Hislop, A., Thankappan, M., Dawson, J. H., & Lawrie, S. (2015). Design of radar corner reflectors for the Australian Geophysical Observing System. *Geoscience Australia*, 3, 490.
4. Colombo, D. and MacDonald, B. (2015). Using advanced InSAR techniques as a remote tool for mine site monitoring. In *Proceedings of the International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*. https://site.tre-altamira.com/wp-content/uploads/2015_InSAR_mine-site_monitoring.pdf.

5. Du, Y., Yan, S., Zhao, F., Chen, D. and Zhang, H. (2022). DS-InSAR Based Long-Term Deformation Pattern Analysis in the Mining Region With an Improved Phase Optimization Algorithm. *Front. Environ. Sci.* 10:799946. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.799946>
6. Piestova, I., Dugin, S., Orlenko, T., & Svideniuk, M. (2020). Assessing and forecasting landslide hazards of The Right Bank of the Kanev reservoir based on radar remote sensing data with corner reflectors using. *Y XIV international scientific conference "monitoring of geological processes and ecological condition of the environment"*. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056082>.
7. Tretyak, K., Kukhtar, D., Prykhodko, M., & Yatsyk, V. (2023). Deployment technique of radar corner reflector for SAR observations. *Y International conference of young professionals «geoterrace-2023»*. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510038>.
8. Garthwaite, M. (2017). On the design of radar corner reflectors for deformation monitoring in multi-frequency insar. *Remote Sensing*, 9(7), 648. <https://doi.org/10.3390/rs9070648>
9. Kukhtar, D., Hlotov, V., & Zayats, O. (2023). Geodesy, cartography, and aerial photography. *Geodesy, Cartography, and Aerial Photography*, 98,2023(98), 42–49. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.98.042>
10. Tzouvaras, M., Danezis, C., & Hadjimitsis, D. G. (2020). Differential SAR Interferometry Using Sentinel-1 Imagery-Limitations in Monitoring Fast Moving Landslides: The Case Study of Cyprus. *Geosciences*, 10(6), 236. <https://doi.org/10.3390/geosciences10060236>.
11. Crosetto, M., Gili, J. A., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Corominas, J., & Serral, D. (2013). Interferometric SAR monitoring of the Vallcebre landslide (Spain) using corner reflectors. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(4), 923–933. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-923-2013>.
12. Liu, J., Li, T., Ma, S., Wen, Y., Xu, Y., & Nie, G. (2024). Analysis of the dihedral corner reflector's RCS features in multi-resource SAR. *Applied Sciences*, 14(12), 5054. <https://doi.org/10.3390/app14125054>.
13. Heavens Above (2023, March 01). *Satellite database*. <http://www.heavens-above.com>.
14. Copernicus Browser (2023, March 05). *Satellite database*. <https://browser.dataspace.copernicus.eu>.

Отримано 30.05.2025

UDC 528.8.044.2

Denys Kukhtar¹, Liubov Dorosh²

¹ PhD in Technical Sciences, Doctoral student at the Department of Higher Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: denys.kukhtar@nung.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2839-4318>

Scopus Author ID: [57210603240](https://orcid.org/57210603240)

² PhD in Technical Sciences, Assistant Lecturer at the Department of Geodesy and Land Management Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Ivano-Frankivsk, Ukraine)

E-mail: liubov.dorosh@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2971-4034>

Scopus Author ID: [57210603240](https://orcid.org/57210603240)

**THE ORIENTATION METHOD OF TERRESTRIAL CORNER REFLECTORS
FOR THE SATELLITE RADAR OBSERVATION**

Preparation of the site for satellite synthetic aperture radar (SAR) monitoring commences with installation and precise orientation of ground-based corner reflectors directed towards the satellite. The accuracy of this initial phase critically determines reliability and efficiency of SAR-based monitoring. This study presents the detailed step-by-step algorithm for deployment of corner reflectors in the field. The procedure encompasses planning of the reflector placement, calculation of orientation parameters, methodology for physical installation, and subsequent verification of the deployment effectiveness. The input data required for calculations were obtained from the Heavens Above online platform, which provides open-access to the satellite ephemerides. The assessment of the radar-signal-backscatter-intensity at the reflector deployment at sites was performed using the Copernicus Browser – an online platform for visualization and analysis of satellite imagery. The developed methodological recommendations and deployment algorithms constitute a foundation for development of regulatory documents and standards governing installation of corner reflectors for the satellite SAR monitoring.

Keywords: deformations, radar cross section; satellite line of sight; SAR; Sentinel-1.

Fig.: 7. Table: 1. References: 14.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-472-484](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-472-484)

УДК 528

Богдан Ростиславович Сосса¹, Владислав Володимирович Гавришук²¹доктор філософії з геодезії та землеустрою, старший викладач кафедри дизайну, інжинірингу та землеустрою
Державний торговельно-економічний університет (Київ, Україна)E-mail: b.sossa@knute.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4484-4865>

Web of Science: LDG-9060-2024. Scopus ID: 57361078500

²кандидат технічних наук, старший викладач кафедри дизайну, інжинірингу та землеустрою
Державний торговельно-економічний університет (Київ, Україна)E-mail: v.havryshchuk@knute.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3164-44266>

Web of Science: HOH-3154-2023. ResearcherID: rid101895

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ПОХИБОК ГЕОДЕЗИЧНИХ ПРИЛАДІВ

У роботі розглянуто принципи використання методу Монте-Карло при дослідженні складових похибок геодезичних приладів. Проведено дослідження з урахуванням систематичних і випадкових похибок. Запропоновано використовувати коефіцієнти кореляції Пірсона та кореляційну матрицю на їх основі для оцінки впливу різних складових систематичної похибки. Визначено основні параметри врахування випадкових похибок у відсотковому співвідношенню до систематичних. Запропоновано масштабовану модель для аналітичної та графічної оцінки впливу складових систематичної похибки на точність вимірювань. Проведено розрахунки, що підтверджують коректність застосування масштабованої моделі для дослідження точності вимірювань геодезичних приладів.

Ключові слова: похибки; метод Монте-Карло; геодезичні вимірювання; моделювання.

Рис.: 13. Табл.: 3. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. Одним з основних джерел неточностей при геодезичних роботах є інструментальні похибки геодезичних приладів. Ці похибки поділяються на систематичні, які виникають через конструктивні особливості приладів чи зовнішні умови й можуть бути скориговані, та випадкові, які мають стохастичний характер. При дослідженні точності геодезичних приладів вказані похибки потребують статистичного аналізу для оцінки їхнього впливу.

У цій роботі ми застосували метод Монте-Карло — статистичний підхід, що базується на генерації великої кількості випадкових вибірок для моделювання ймовірнісних процесів. У контексті геодезії метод Монте-Карло застосовується для моделювання поведінки приладів у різних умовах. Наприклад, він може бути використаний для оцінки того, як випадкові відхилення у кутових чи лінійних вимірюваннях, спричинені різними факторами, впливають на загальну точність вимірювань. Генеруючи численні сценарії із систематичними й випадковими похибками, ми отримали розподіл можливих результатів, що дозволяє не лише оцінити їхню точність, а й оптимізувати методику вимірювань.

Дослідження присвячене використанню методу Монте-Карло для аналізу похибок геодезичних приладів. При його використанні виділяють такі основні етапи: визначення області входних даних, генерація випадкових входних даних, виконання детермінованих обчислень, зведення результатів. Метод Монте-Карло добре підходить для моделювання систематичних похибок геодезичних приладів, адже при його використанні можливо не лише оцінити вплив кожної складової окремо, але й побачити, як вони взаємодіють і впливають на кінцеву точність вимірювань.

Нами проведено дослідження зі статистичного аналізу похибок геодезичних приладів на прикладі електронного тахеометра, використовуючи метод Монте-Карло. Це потужний обчислювальний метод, який використовується для моделювання випадкових процесів і розв'язання задач, що важко піддаються аналітичному рішенню. Його суть полягає в багаторазовому виконанні симуляції з використанням випадкових чисел для моделювання поведінки системи.

На початку дослідження нами розглянуто, на нашу думку, хибний підхід до моделювання впливу похибок, заснований на математичній статистиці, але без урахування особливостей геодезичних приладів. У другій частині нами запропоновано більш реалістичний підхід, що дозволяє точніше оцінити вплив різних складових похибок на точність вимірювання. Також проведено аналіз співвідношення систематичних і випадкових похибок при проведенні симуляційного моделювання.

Постановка проблеми. Для проведення дослідження було визначено такі основні задачі.

Визначення моделей похибок. Для кожного типу систематичної похибки потрібно точно визначити її математичну модель. Це може бути як проста адитивна похибка, так і більш складна функція від вимірюваних величин. Переважна більшість систематичних похибок на сьогодні ґрунтовно описана. Навіть для лазерних сканерів, що розглядаються як «чорні скриньки», прийнято застосовувати геометричну модель електронного тахеометра [1].

Визначення діапазонів і розподілів. Для кожної похибки потрібно задати діапазон її можливих значень і розподіл ймовірностей (рівномірний, нормальний). Діапазон можливих значень похибок нами було вибрано з [2; 3] як максимальні для цього класу приладів.

Імітація вимірювань. Для визначення кількості мінімально необхідних вимірів було застосовано критерій, сформульований у [4], відповідно до якого кількість вибірок повинно бути не менше 300. Враховуючи те, що обчислення проводилися автоматизовано, нами було взято 500 вибірок для статичних даних і 5000 вибірок для динамічних даних.

Аналіз результатів. Після виконання всіх імітацій потрібно аналізувати отримані "виміряні" значення, порівнюючи їх з "істинними" і розраховуючи відхилення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Метод Монте-Карло широко використовується в геодезичних завданнях для оцінки невизначеності та моделювання похибок. Він може застосовуватися для аналізу надійності геодезичних мереж, виявлення аномальних значень та оцінки точності вимірювань [5]. Цей метод є особливо корисним для нелінійних функцій в основних геодезичних обчисленнях, пропонуючи альтернативу загальному закону поширення дисперсії [6]. Моделювання Монте-Карло можна поєднувати з підходом GUM (Керівництво з вираження невизначеності в вимірюваннях) [7; 8] для комплексного оцінювання невизначеності в коригуванні геодезичних мереж [9]. Цей комбінований метод дозволяє генерувати хмари точок, що представляють невизначеності координат, та призначати області довіри. Метод Монте-Карло також є цінним для аналізу точності вимірювань для конкретних приладів, таких як ті, що використовуються для вимірювання профілю евольвентних зубців у шестернях [10]. Загалом симуляції Монте-Карло є надійним і універсальним інструментом для моделювання похибок геодезичних приладів та оцінки невизначеностей вимірювань [11; 12].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. З проведеного аналізу публікацій з цієї тематики випливає, що використання методу Монте-Карло стосується переважно апіорного розрахунку геодезичних мереж або окремих складових систематичної похибки. Нами запропоновано провести симуляційне моделювання безпосередньо, вимірів. Це дозволить дослідити як сумарний вплив систематичних і випадкових похибок, так і проаналізувати вплив окремих складових систематичної похибки з метою підвищення точності вимірювань.

Метою статті є дослідження доцільності застосування використання методу Монте-Карло при дослідженні похибок геодезичних приладів та визначення впливу різних складових систематичної похибки.

Виклад основного матеріалу. Для початкової симуляції вимірювань було застосовано наступний принцип. Спочатку генерувалися "істинні" значення вимірюваних величин (у цьому випадку, кутів і відстаней). До цих істинних значень

додавалися модельовані систематичні похибки, згенеровані випадковим чином у межах їх діапазонів. Крім того, також додавалися випадкові похибки (випадковий шум), щоб симуляція була більш реалістичною.

Було визначено основні систематичні похибки для симуляції їх впливу: колімаційна похибка горизонтальних кутів, місце нуля вертикального круга й похибка віддалеміра. При подальших записах вибрано такі позначення: H — горизонтальний кут, Z — зенітна відстань, D — виміряна відстань. Індекс $corr$ стосується виправлених величин, а $meas$ — виміряних.

Колімаційна похибка горизонтальних кутів (c):

Математична модель:

$$\alpha_{corr} = \alpha_{meas} - \frac{c}{\sin(Z)}, \quad (1)$$

де H - горизонтальний кут, Z - зенітний кут.

Діапазон: зазвичай від $-20''$ до $+20''$ для теодолітів і електронних тахеометрів, залежить від кутової точності приладу.

Похибка місця нуля вертикальних кутів (i):

Математична модель:

$$Z_{corr} = Z_{meas} - i. \quad (2)$$

Діапазон: аналогічно до колімаційної, наприклад, від $-20''$ до $+20''$.

Похибка віддалеміра (адитивна a , мультиплікативна k):

Математична модель:

$$D_{corr} = D_{meas} + a + k \cdot D_{meas}. \quad (3)$$

Діапазон: a може бути в межах кількох міліметрів, k - в частинах на мільйон (ppm). Наприклад, $a \in [-2\text{мм}, +2\text{мм}]$, $k \in [-3\text{ppm}, +3\text{ppm}]$.

Випадкові похибки було введено зі стандартним відхиленням $5''$ для кутів і 1 мм для відстаней.

У результаті симуляції було отримано 500 значень колімаційної похибки, похибки за місце нуля, адитивної похибки відстані, мультиплікативної похибки відстані, а також похибки горизонтального кута, зенітної відстані й виміряної відстані. Ідеальні дані складали: горизонтальний кут – $45^\circ 00' 00''$, зенітна відстань – $60^\circ 00' 00''$, виміряна відстань – $100,000\text{ м}$. Описову статистику похибок вимірювань наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Описова статистика похибок вимірювань

Значення	Похибка гор.кута, сек	Похибка зен.відст., сек	Похибка вимір.відст., мм
Кількість	500	500	500
Середнє	0,1	0,1	0,1
Стандарт	14,3	12,7	1,5
Мінімум	-33,7	-29,3	-3,5
25 %	-11,0	-9,9	-1,1
50 %	0,6	-1,0	0,1
75 %	11,6	10,4	1,2
Максимум	31,7	33,1	4,0

Джерело: розроблено авторами.

Для наочності, розподіл кутових і лінійних похибок, а також їх вплив було зображено в графічному вигляді на (рис. 1-2).

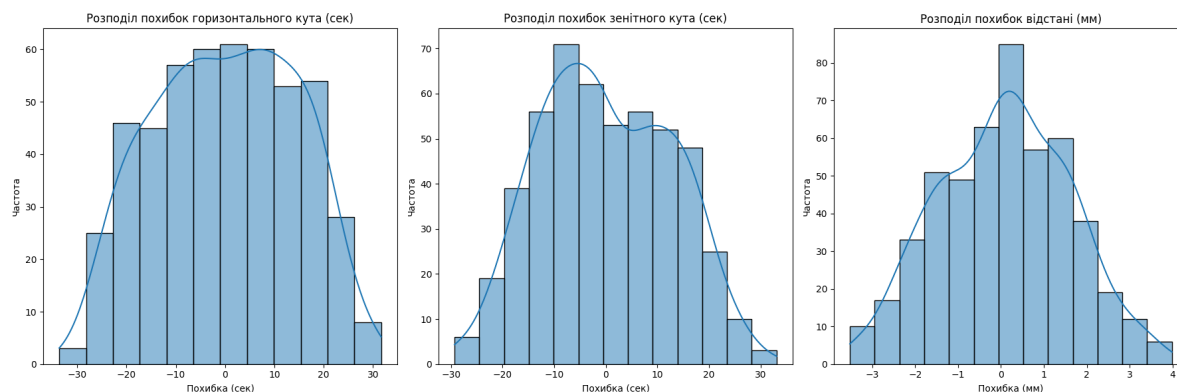


Рис. 1. Розподіл кутових і лінійних похибок

Джерело: розроблено авторами.

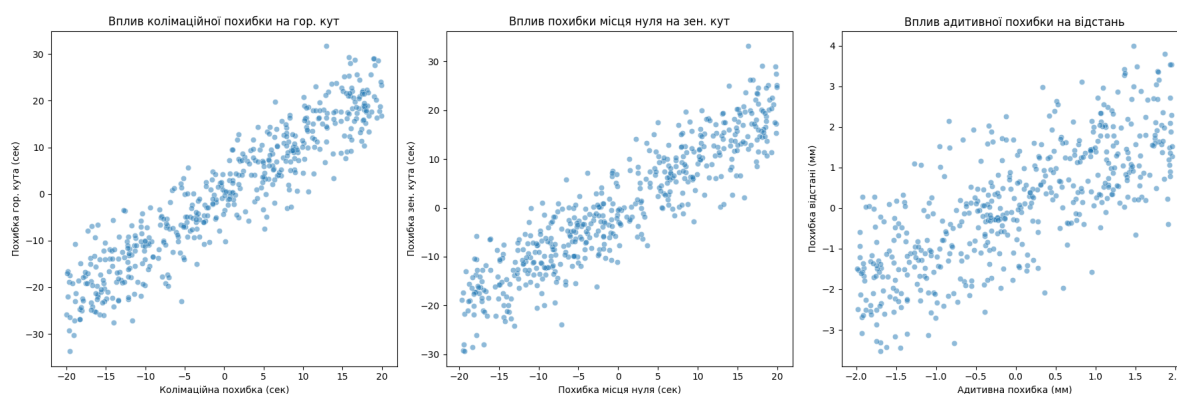


Рис. 2. Вплив кутових і лінійних похибок

Джерело: розроблено авторами.

Для визначення кореляції між вимірними величинами і похибками було обчислено коефіцієнти кореляції Пірсона, який є мірою лінійної залежності між двома змінними. Він набуває значень від -1 до $+1$:

- $+1$: Ідеальна пряма лінійна залежність (зі збільшенням однієї змінної, інша також збільшується);
- -1 : Ідеальна обернена лінійна залежність (зі збільшенням однієї змінної, інша зменшується);
- 0 : Відсутність лінійної залежності.

Формула для коефіцієнта кореляції Пірсона між двома змінними X та Y така [13]:

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (4)$$

де X_i та Y_i — окремі спостереження (значення) для змінних X та Y відповідно, $\bar{X}$ — середнє арифметичне значення змінної X , $\bar{Y}$ — середнє арифметичне значення змінної Y , n — кількість спостережень (у нашому випадку, кількість симуляцій, тобто 500).

За отриманими коефіцієнтами було складено кореляційну матрицю (рис. 3).

Наведений вище розрахунок розглядає похибки вимірювань з погляду «чистої» математичної статистики. Проте в реальних приладах систематичні похибки не є симетричними навколо нуля, а мають певний постійний зсув, що змінюється в межах невеликого діапазону. Це типово для похибок, які виникають через неідеальне калібрування або вплив фізичних деформацій.

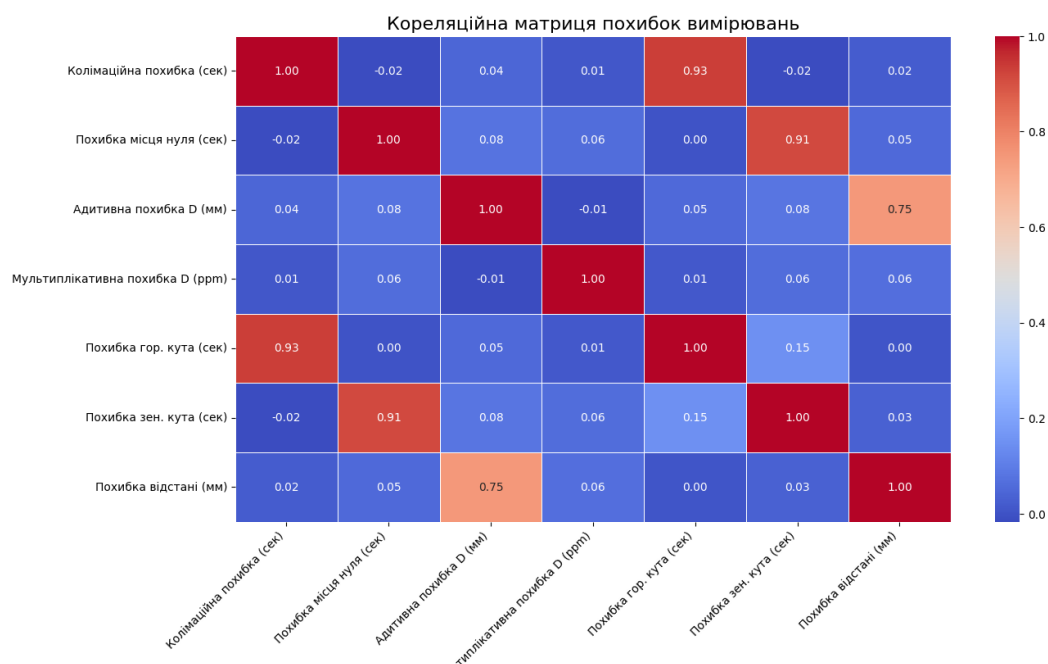


Рис. 3. Кореляційна матриця похибок вимірювань

Джерело: розроблено авторами.

Таким чином, для того, щоб зробити моделювання набагато реалістичнішим, нами було змінено діапазони симульованих похибок. Верхня межа вибиралася з [2] для приладів класу В6. Нижня межа діапазону розраховувалася за виразом:

$$N = \frac{2}{3} V, \quad (5)$$

де N – значення нижньої межі діапазону, V – значення верхньої межі діапазону. Знак вибирався довільно.

Для колімаційної похибки діапазон склав від +12" до +18", для похибки за місце нуля — від -12" до -18", для адитивної складової похибки віддалеміра — від 2 до 3 мм. Мультиплікативну складову похибки віддалеміра залишили без змін через її незначний вплив на таких коротких відстанях.

У цьому випадку варто приділити особливу увагу випадковим похибкам (шуму). Якщо для початкової симуляції випадкові похибки складали 0,13δ для кутів і 0,23δ для відстаней, то для наступного дослідження, враховуючи зміну діапазону, вони становитимуть 0,83δ і δ, відповідно. Якщо випадкові похибки будуть занадто великими порівняно з діапазоном систематичних похибок, вони "замаскують" лінійний зв'язок. Коефіцієнт кореляції Пірсона, вимірюючи саме лінійний зв'язок, не зможе чітко його виявити через значну випадкову варіативність. На рис. 4 наведено зразок некоректного моделювання, коли випадкові похибки за своїм значенням зіставні зі систематичними. Високий коефіцієнт кореляції між значеннями похибок горизонтального кута і зенітного кута, в цьому випадку, вказує на те, що вплив випадкових похибок такий самий, як і систематичних, через що неможливо визначити лінійну залежність.

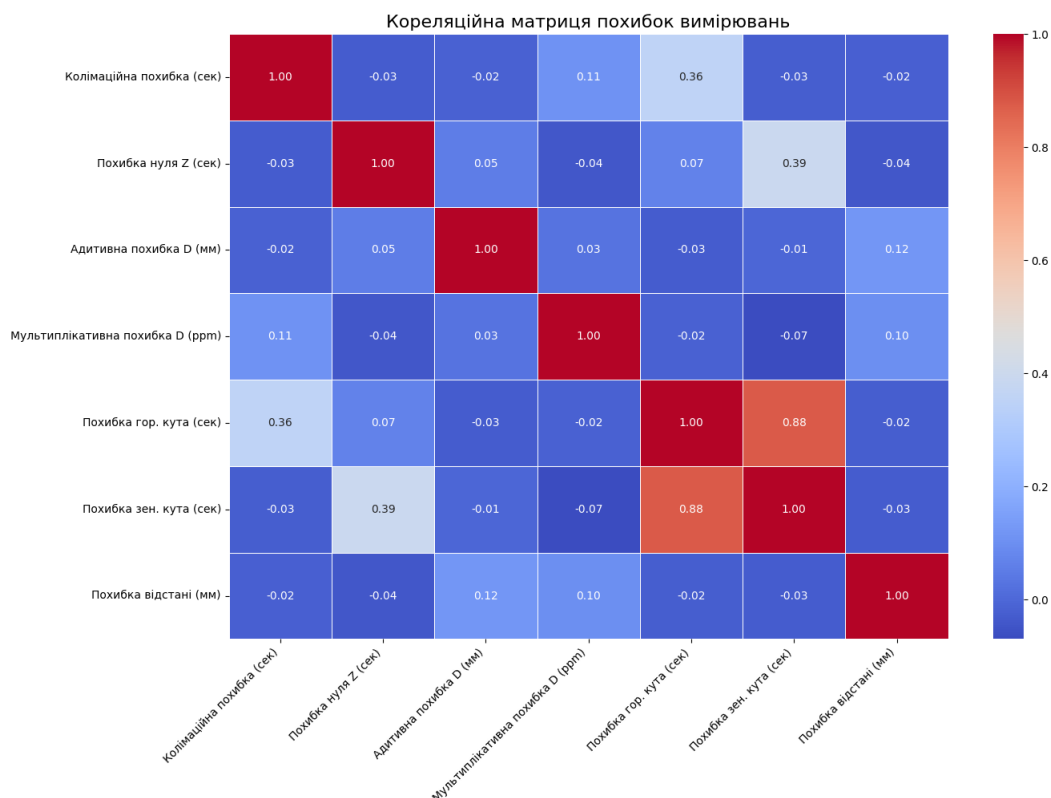


Рис. 4. Кореляційна матриця похибок вимірювань при некоректному моделюванні шумів
Джерело: розроблено авторами.

Для підтвердження правильності побудованої математичної моделі можна зробити її перевірку без застосування випадкових похибок (рис. 5).

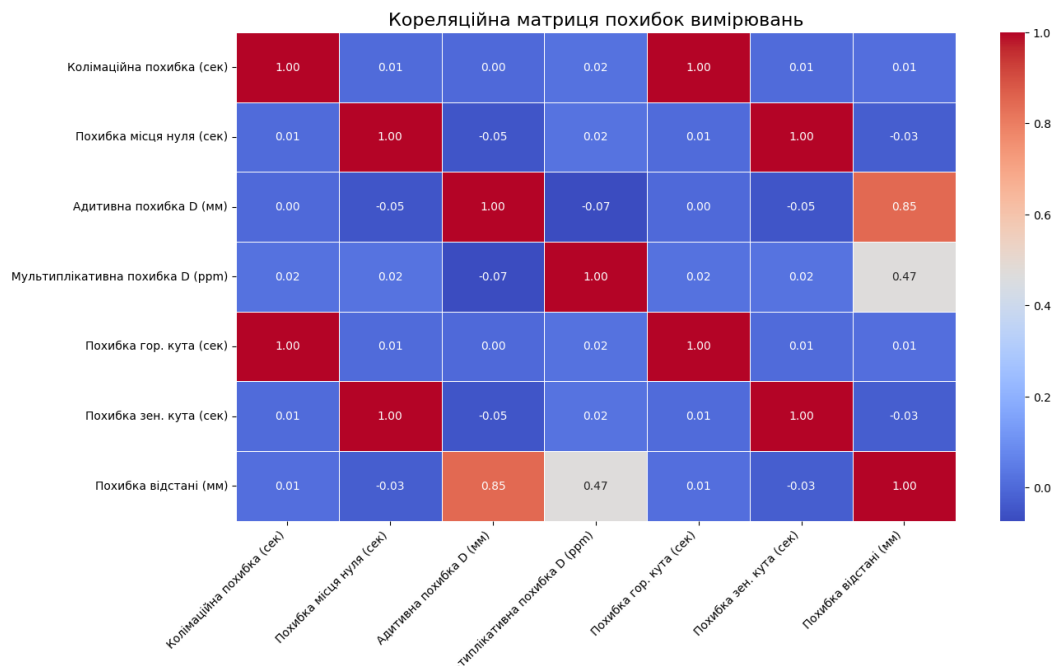


Рис. 5. Кореляційна матриця похибок вимірювань без моделювання шумів
Джерело: розроблено авторами.

З рис. 5 видно, що математичну модель задано коректно, а некоректність моделювання походила від величин випадкових похибок. Авторами розглянуто спосіб уникнення «маскування» лінійної залежності шляхом розділення випадкових похибок для горизонтальних кутів і зенітних відстаней. Проте найкращі результати отримано при зазначеному розділенні з одночасним зменшенням відсотка величини випадкової похибки. Так, при зазначених діапазонах систематичних похибок і значеннями випадкових похибок зі стандартним відхиленням 2" для кутів і 0,5 мм для відстаней (відповідно, 0,3338 і 0,58), при тих же величинах ідеальних вимірів, ми можемо спостерігати «зсув» графіків відносно нуля, що є логічним, а також простежувати кореляцію між відповідними похибками. Описову статистику похибок вимірювань для зазначених вихідних даних наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Описова статистика похибок вимірювань

Значення	Похибка гор.кута, сек	Похибка зен.відст., сек	Похибка вимір.відст., мм
Кількість	500	500	500
Середнє	17,3	-15,0	2,5
Стандарт	2,8	2,8	0,6
Мінімум	9,1	-22,5	0,9
25 %	15,3	-17,1	2,1
50 %	17,4	-14,9	2,5
75 %	19,3	-13,1	2,9
Максимум	24,9	-7,4	4,2

Джерело: розроблено авторами.

Розподіл кутових і лінійних похибок та їх вплив наведено на рис. 6 і 7.

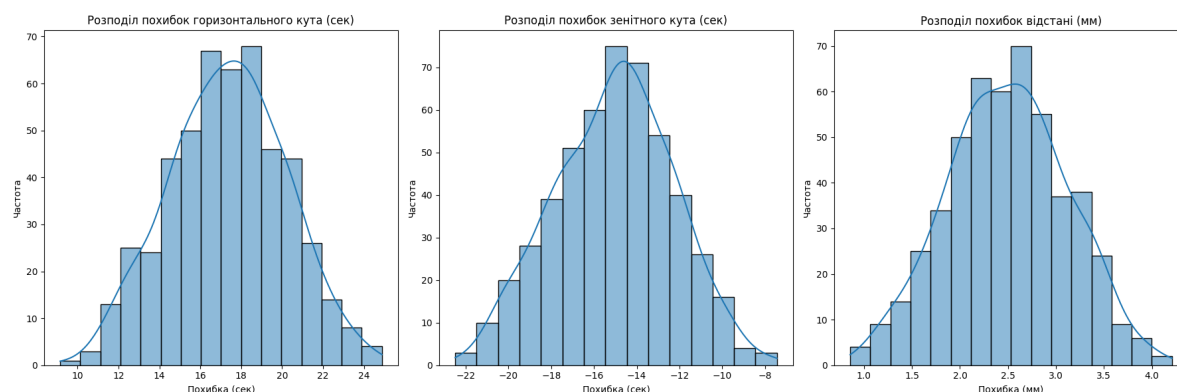


Рис. 6. Розподіл кутових і лінійних похибок

Джерело: розроблено авторами.

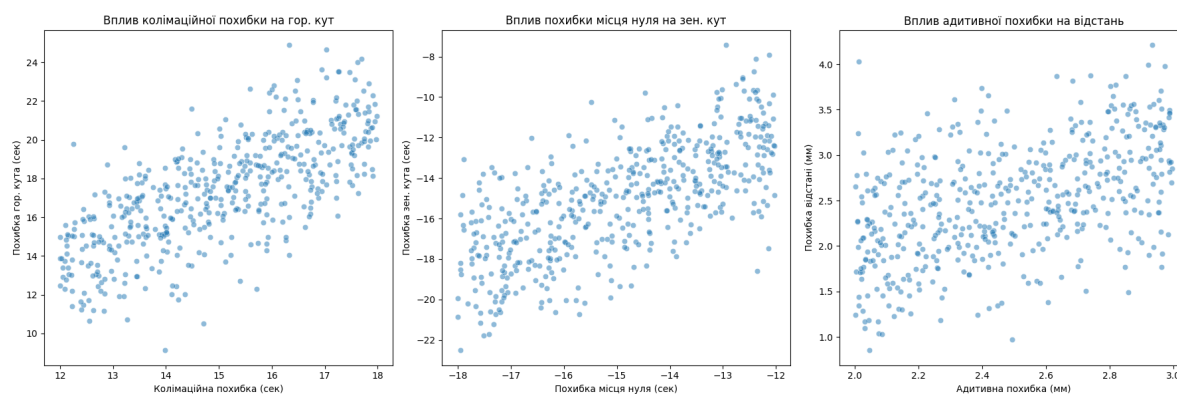


Рис. 7. Вплив кутових і лінійних похибок

Джерело: розроблено авторами.

Аналогічно, розраховуємо кореляційну матрицю похибок (рис. 8).

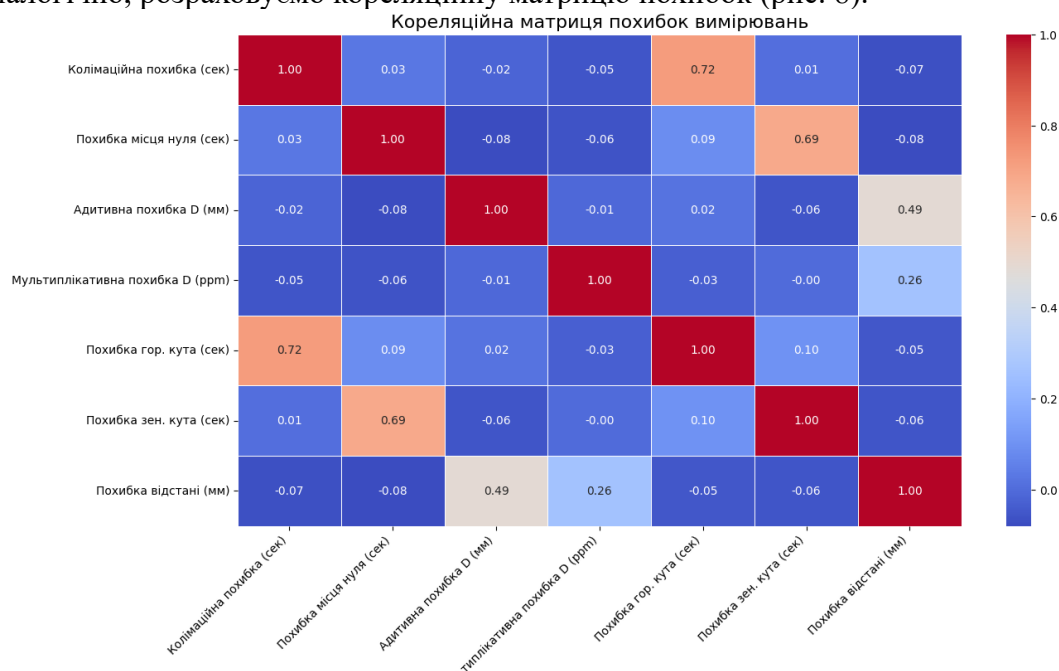


Рис. 8. Кореляційна матриця похибок вимірювань

Джерело: розроблено авторами.

Таким чином, нами підтверджено коректність використання методу Монте-Карло для аналізу впливу складових систематичної похибки при дослідженні точності вимірювань. Крім того, визначено важливість правильного моделювання випадкової похибки. Проте, попереднє моделювання було проведено для того ж самого значення зенітної відстані і вимірної відстані. Для більшої реалістичності моделювання було проведено додавання варіацій "істинних" значень, оскільки дозволить дослідити вплив систематичних похибок у різних умовах вимірювань (на різних відстанях та висотах). Це особливо важливо для таких похибок, як колімаційна (яка залежить від зенітного кута) та мультиплікативна похибка відстані (яка залежить від самої відстані). Також, кількість вибірок було збільшено до 5000 для кращої статистики з випадковими «істинними» значеннями.

Як і в попередньому випадку, значення колімаційної похибки було взято в діапазоні 12"-18", похибки за місце нуля — від -12" до -18", адитивної складової похибки віддалеміра — 2-3 мм, мультиплікативну складову залишено без змін. Значення випадкових похибок взято 1" для кутів і 0,5 мм для відстаней з розділеним внесенням кутових похибок в горизонтальні кути і зенітні відстані. Відстані моделювалися в діапазоні 10-1000 м, а зенітні кути — 30-150 градусів.

Описову статистику похибок вимірювань для зазначених вихідних даних наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Описова статистика похибок вимірювань

Значення	Похибка гор.кута, сек	Похибка зен.відст., сек	Похибка вимір.відст., мм	Вимірjana відстань, м	Зенітний кут, градусів
Кількість	5000	5000	5000	5000	5000
Середнє	18,9	-15,0	2,5	506,296	90,6
Стандарт	4,7	2,0	1,2	283,275	34,7
Мінімум	9,6	-20,4	-1,4	10,321	30,0
25 %	15,5	-16,5	1,7	267,901	61,0
50 %	17,8	-15,0	2,5	504,534	89,7
75 %	21,6	-13,4	3,2	743,957	121,0
Максимум	37,2	-8,2	6,6	999,951	150,0

Джерело: розроблено авторами.

Розподіл кутових і лінійних похибок та їхній вплив наведено на рис. 9.

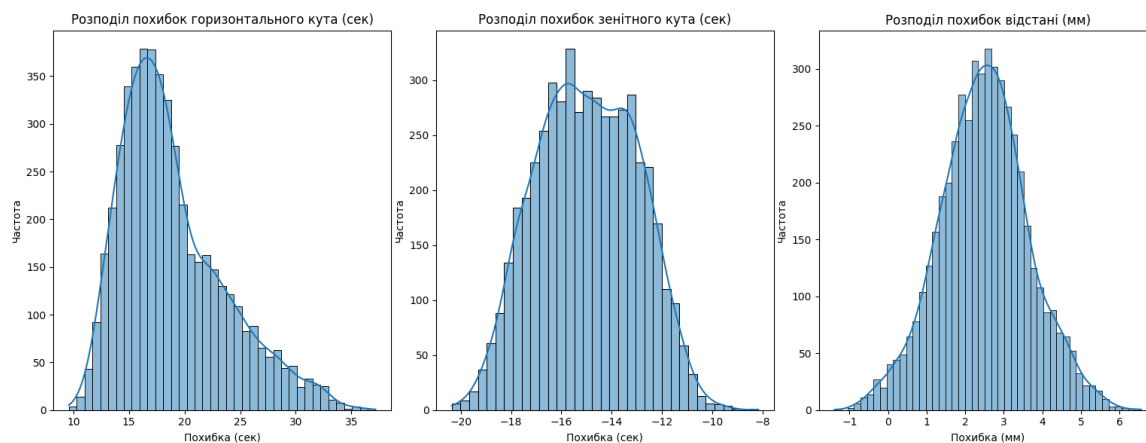


Рис. 9. Розподіл кутових і лінійних похибок

Джерело: розроблено авторами.

Вплив кутових похибок наведено на рис. 10, а вплив лінійних похибок – на рис. 11.

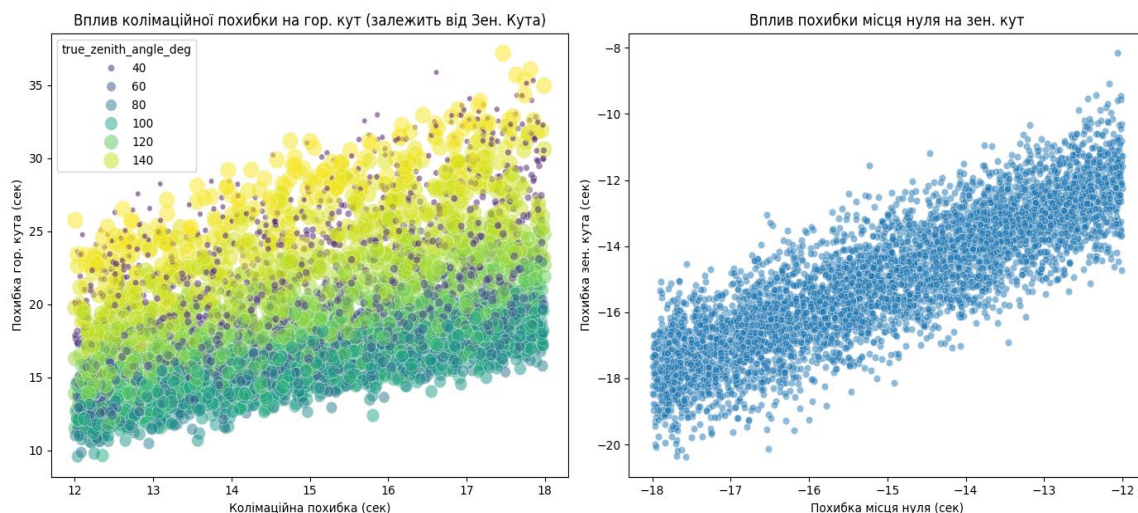


Рис. 10. Вплив кутових похибок

Джерело: розроблено авторами.

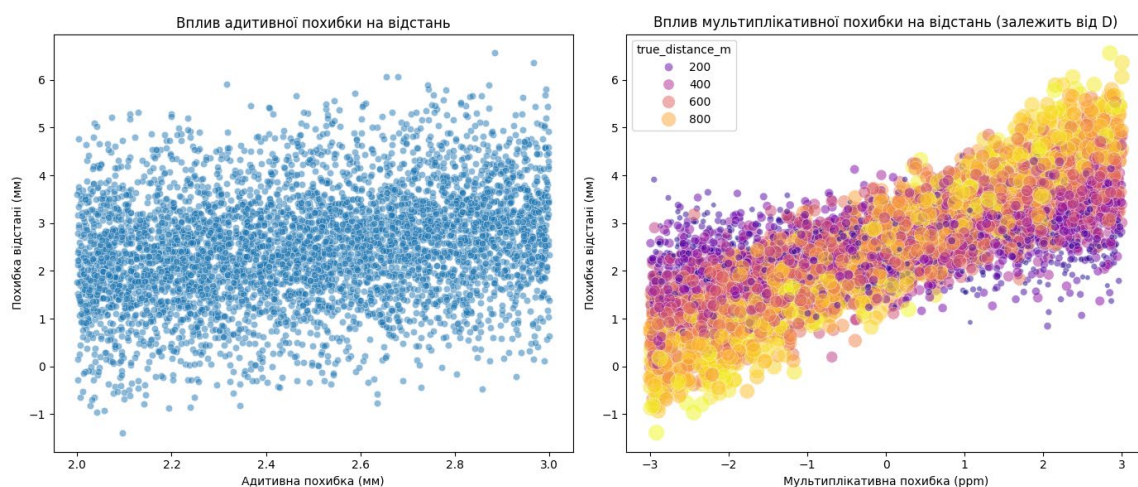


Рис. 11. Вплив лінійних похибок

Джерело: розроблено авторами.

Також нами було побудовано графік залежності похибки горизонтального кута від значення зенітної відстані через колімаційну похибку та графік залежності похибки відстані від значення відстані через мультиплікативну складову. Зазначені графіки наведено на рис. 12.

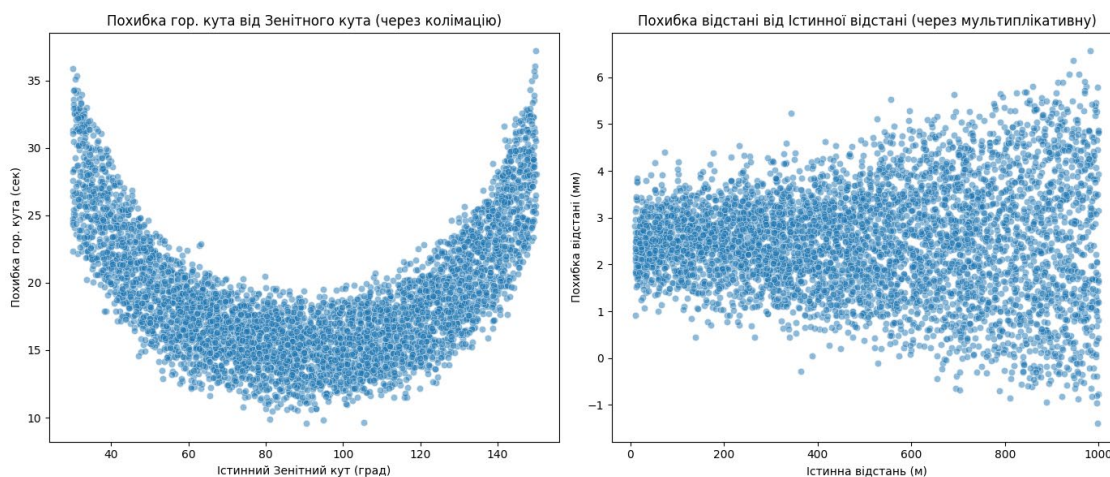


Рис. 12. Комплексний вплив кутових і лінійних похибок

Джерело: розроблено авторами.

Аналогічно попереднім даним, складено кореляційну матрицю. У цьому випадку було додано два стовпчики — значення відстані та зенітного кута. Це дозволяє додатково оцінити коректність математичної моделі похибок. Кореляційну матрицю наведено на рис. 13.

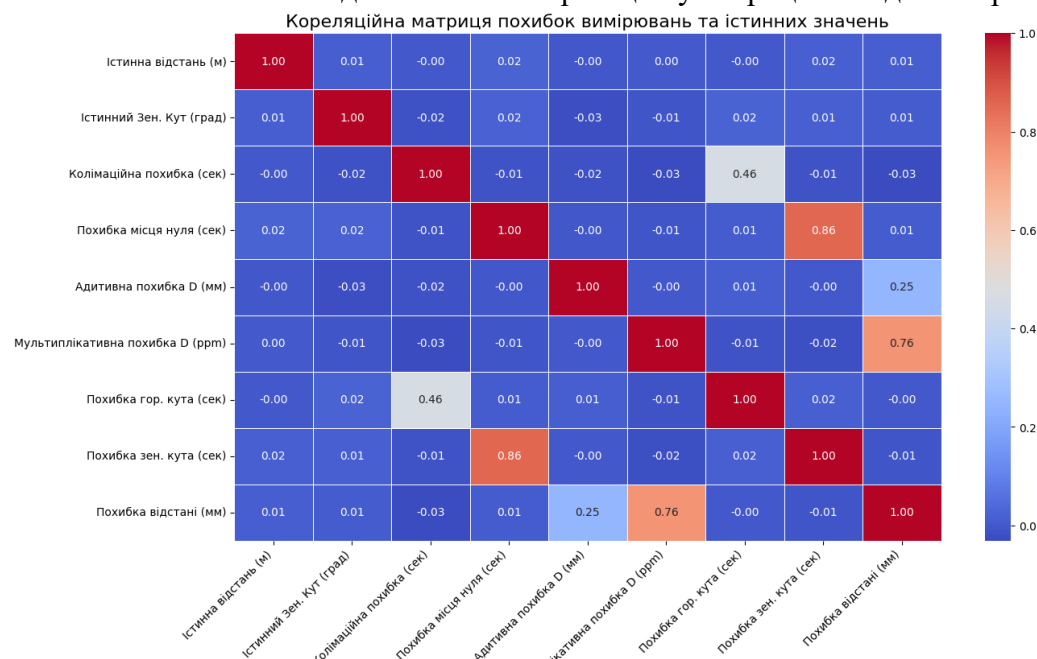


Рис. 13. Вплив кутових похибок

Джерело: розроблено авторами.

У цьому випадку відсутня кореляція між значенням відстані та мультиплікативною похибкою, що свідчить про відсутність лінійної залежності, оскільки нами розглядається той варіант, коли істинна мультиплікативна похибка приладу в цей момент часу може бути будь-якою в цьому діапазоні, але її очікуване значення (середнє) дорівнює 0. Це відповідає приладу, який може давати як позитивне, так і негативне відхилення масштабу, але в середньому (на великій кількості вимірювань, з різними приладами або в різних умовах) це відхилення прямує до нуля.

Отже, за запропонованим принципом можна здійснювати моделювання систематичних і випадкових похибок геодезичних приладів та досліджувати їх вплив на точність вимірювань. Розглянуту просту модель з трьома видами похибок легко масштабувати для дослідження більшої кількості складових систематичної похибки як окремо, так і сукупно з випадковими похибками.

Висновки. У цій роботі автори розглянули спрощену математичну модель використання методу Монте-Карло для дослідження впливу складових систематичних похибок геодезичних приладів. Розглянуто основні принципи симуляційного моделювання вимірювань відстаней і кутів та вплив основних інструментальних похибок на їхню точність. Визначено залежності між значеннями систематичних і випадкових похибок, що ускладнюють аналіз даних та запропоновано спосіб їх уникнення при моделюванні. Описано спосіб побудови масштабованої моделі для детального дослідження різних складових систематичних і випадкових похибок.

Список використаних джерел

1. Шульц, Р. В., & Сосса, Б. Р. (2015). Системне калібрування наземних лазерних сканерів: моделі та методики. *Вісник геодезії та картографії*, (2), 25–30.
2. ДСТУ 8955:2019. (2020). *Метрологія. Теодоліти і тахеометри. Метрологічні та технічні вимоги*. Київ: ДП «УкрНДНЦ».
3. ДСТУ 8926:2019. (2020). *Метрологія. Нівеліри та прилади вертикального проектування оптико-механічні, цифрові, лазерні й рейки нівелірні. Метрологічні та технічні вимоги*. Київ : ДП «УкрНДНЦ».
4. Calkins, J. M. (2002). *Quantifying coordinate uncertainty fields in coupled spatial measurement systems* [Dissertation, Virginia Tech]. <http://hdl.handle.net/10919/28472>
5. Bonimani, M. L. S., Rofatto, V. F., Matsuoka, M. T., & Klein, I. (2019). Aplicação de Números Aleatórios Artificiais e Método Monte Carlo na Análise de Confiabilidade de Redes Geodésicas. *Revista Brasileira de Computação Aplicada*, 11(2), 74–85. <https://doi.org/10.5335/rbca.v11i2.8906>
6. Wyszowska, P. (2017). Propagation of uncertainty by Monte Carlo simulations in case of basic geodetic computations. *Geodesy and Cartography*, 66(2), 333–346. <https://doi.org/10.1515/geocart-2017-0022>
7. BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, & OIML. (2008). *Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method* (JCGM 101:2008). Joint Committee for Guides in Metrology. <https://doi.org/10.59161/JCGM101-2008>
8. BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, & OIML. (2011). *Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Extension to any number of output quantities* (JCGM 102:2011). Joint Committee for Guides in Metrology.
9. Niemeier, W., & Tengen, D. (2017). Uncertainty assessment in geodetic network adjustment by combining GUM and Monte-Carlo-simulations. *Journal of Applied Geodesy*, 11(2). <https://doi.org/10.1515/jag-2016-0017>
10. Wang, L., & Luo, X. (2021). Adaptive Quasi-Monte Carlo method for nonlinear function error propagation and its application in geodetic measurement. *Measurement*, 186, 110122. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110122>
11. A Novel Robust Scaling for EDM Calibration Baselines using Monte Carlo Study. (2018). *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*, 25(1). <https://doi.org/10.17559/tv-20160407214150>
12. Tomczyk, K. (2018). Influence of Monte Carlo generations applied for modelling of measuring instruments on maximum distance error. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 41(1), 74–84. <https://doi.org/10.1177/0142331217753062>
13. Войтенко, С. П., Шульц, Р. В., Кузмич, О. Й., & Кравченко, Ю. В. (2015). *Mathematical processing of geodetic measurements* (С. П. Войтенко, Ред.). Знання.

References

1. Shults, R. V., & Sossa, B. R. (2015). Systemne kalibruvannia nazemnykh lazernykh skaneriv: modeli ta metodyky [System calibration of terrestrial laser scanners: models and methodologies]. *Visnyk heodezii ta kartohrafii - Bulletin of Geodesy and Cartography*, (2), 25–30.

2. DSTU 8955:2019 Metrolohiia. Teodolity i takheometry. Metrolohichni ta tekhnichni vymohy [Metrology. Theodolites and total stations. Metrological and technical requirements]. (2020). DP “UkrNDNTs”.
3. DSTU 8926:2019 Metrolohiia. Niveliry ta prylady vertykalnoho proektuvannia optyko-mekhanichni, tsyfrovi, lazerni y reiky nivelirni. Metrolohichni ta tekhnichni vymohy [Metrology. Optical-mechanical, digital, laser and levelling rods for levelling and vertical projection instruments. Metrological and technical requirements]. (2020). DP “UkrNDNTs”.
4. Calkins, J. M. (2002). *Quantifying Coordinate Uncertainty Fields in Coupled Spatial Measurement systems* [Dissertation, Virginia Tech]. <http://hdl.handle.net/10919/28472>.
5. Bonimani, M. L. S., Rofatto, V. F., Matsuoka, M. T., & Klein, I. (2019). Aplicação de Números Aleatórios Artificiais e Método Monte Carlo na Análise de Confiabilidade de Redes Geodésicas [Application of Artificial Random Numbers and the Monte Carlo Method to Reliability Analysis of Geodetic Networks]. *Revista Brasileira de Computação Aplicada*, 11(2), 74–85. <https://doi.org/10.5335/rbca.v11i2.8906>.
6. Wyszowska, P. (2017). Propagation of uncertainty by Monte Carlo simulations in case of basic geodetic computations. *Geodesy and Cartography*, 66(2), 333–346. <https://doi.org/10.1515/geocart-2017-0022>.
7. BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML. Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 101:2008. doi:10.59161/JCGM101-2008.
8. BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML (2011) Supplement 2 to the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement-Extension to any number of output quantities. JCGM 102:2011.
9. Niemeier, W., & Tengen, D. (2017). Uncertainty assessment in geodetic network adjustment by combining GUM and Monte-Carlo-simulations. *Journal of Applied Geodesy*, 11(2). <https://doi.org/10.1515/jag-2016-0017>.
10. Wang, L., & Luo, X. (2021). Adaptive Quasi-Monte Carlo method for nonlinear function error propagation and its application in geodetic measurement. *Measurement*, 186, 110122. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110122>.
11. A Novel Robust Scaling for EDM Calibration Baselines using Monte Carlo Study. (2018). *Tekhnicki vjesnik - Technical Gazette*, 25(1). <https://doi.org/10.17559/tv-20160407214150>.
12. Tomczyk, K. (2018). Influence of Monte Carlo generations applied for modelling of measuring instruments on maximum distance error. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 41(1), 74–84. <https://doi.org/10.1177/0142331217753062>.
13. Voitenko, S. P., Shults, R. V., Kuzmych, O. I., & Kravchenko, Iu. V. (2015). Matematychnе obroblynnia heodezychnykh vymiriv (S. P. Voitenko, Red.) [Mathematical processing of geodetic measurements]. *Znannia*.

Отримано 20.06.2025

UDC 528

Bohdan Sossa¹, Vladyslav Gavryshchuk²

¹Doctor of Philosophy in Geodesy and Land Management,
Senior Lecturer at the Department of Design, Engineering and Land Management
State University of Trade and Economics (Kyiv, Ukraine)

E-mail: b.sossa@knute.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4484-4865>

Web of Science: LDG-9060-2024. Scopus ID: 57361078500

²PhD in Technical Sciences,
Senior Lecturer, Department of Design, Engineering and Land Management
State University of Trade and Economics (Kyiv, Ukraine)
E-mail: v.havryshchuk@knute.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3164-44266>
Web of Science: HOH-3154-2023. ResearcherID: rid101895

APPLICATION OF THE MONTE CARLO METHOD IN THE STUDY OF ERRORS OF GEODETIC INSTRUMENTS

This study investigates instrumental errors in geodetic instruments through Monte Carlo simulation, a powerful computational method for modelling stochastic processes. Geodetic measurements are inherently affected by both systematic and random errors, necessitating statistical analysis to quantify their impact on accuracy. The paper outlines the application

of the Monte Carlo method, detailing its key stages: defining input data domains, generating random inputs, performing deterministic calculations, and synthesizing results. This approach proves particularly effective for modelling systematic errors, as it allows for the individual assessment of each component's influence and, crucially, their intricate interactions affecting overall measurement precision.

The research focuses on an electronic total station, demonstrating a realistic approach to modelling error components. Initially, a flawed statistical modelling approach, which disregarded specific geodetic instrument characteristics, is discussed. Subsequently, a more refined methodology is proposed, enabling a more accurate evaluation of various error constituents on measurement precision. The study specifically models common systematic errors, including the collimation error of horizontal angles, the vertical circle zero error, and the additive and multiplicative errors of the EDM (Electronic Distance Measurement) unit.

A significant finding emphasizes the critical role of correctly modelling random errors (noise). Excessive random variability can obscure the linear relationships sought through correlation analysis, rendering the assessment of systematic error influence ineffective. The authors present a method to mitigate this "masking effect" by optimizing the magnitude of random errors and, where appropriate, separating them for different measurement types (e.g., horizontal angles and zenith distances). This refined modelling strategy results in error distributions that logically shift from zero and exhibit clearer correlations between specific error types.

To enhance the realism and generalizability of the simulations, the study incorporates variations in "true" measured values, such as distances ranging from 10m to 1000m and zenith angles from 30 to 150 degrees. An increased sample size of 5000 iterations further strengthens the statistical robustness of the findings. The analysis employs Pearson correlation coefficients and correlation matrices to evaluate dependencies between measured quantities and errors, confirming the validity of the developed mathematical models. For instance, the absence of correlation between distance values and the multiplicative error component (when its expected value is zero) is discussed, indicating that while the instrument may exhibit scale deviations, these average out over numerous measurements or diverse conditions.

In conclusion, this work validates the applicability of the Monte Carlo method for analyzing the impact of systematic and random error components on geodetic measurement accuracy. It underscores the necessity of precise random error modelling to ensure meaningful analysis. The proposed scalable model offers a robust framework for detailed investigation of various systematic and random error components, individually and in combination, contributing to optimized measurement methodologies in geodesy.

Keywords: errors; Monte Carlo method; geodetic measurements; modeling.

Fig.: 13. Table: 3. References: 13.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-485-492](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-485-492)

УДК 528.4

**Олексій Іванович Терещук¹, Сергій Миколайович Заворотний²,
Андрій Олександрович Сучков³**

¹кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри геодезії, картографії та землеустрою

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: olexter1957@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6433-9351>

ResearcherID: <http://www.researcherid.com/rid/H-4540-2016>

²кандидат технічних наук, старший викладач кафедри геодезії, картографії та землеустрою

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: zavorotnyiserhii@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2139-8877>. ResearcherID: NRY-3592-2025

³магістр, інженер-геодезист

ТОВ «УКРГЕО-ПРОЕКТ МС»

E-mail: suchkov.andriy@gmail.com

СУЧАСНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ІНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧНОГО КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ МАШИНАМИ В ПРОЦЕСІ БУДІВНИЦТВА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

У роботі виконано аналіз сучасних комплексів інженерно-геодезичного контролю та керування дорожньо-будівельними машинами. Розглянуто принцип роботи та склад автоматизованих систем нівелювання. Проаналізовано комплекти обладнання, які входять до складу систем інженерно-геодезичного контролю та керування компактними машинами, екскаваторами, бульдозерами, автогрейдером, асфальтоукладальниками та катками.

Ключові слова: інженерно-геодезичний контроль; автомобільні дороги; системи автоматизованого нівелювання, GNSS-технології.

Рис.: 8. Бібл.: 6.

Актуальність теми дослідження. У процесі будівництва автомобільних доріг (надалі - АД) ключове значення відіграє точне відтворення всіх геометричних параметрів АД відповідно до проєктного рішення та нормативних вимог. Ця відповідність забезпечується шляхом виконання комплексу інженерно-геодезичних робіт у процесі будівництва. Для забезпечення інженерно-геодезичного контролю будівництва АД використовуються такі геодезичні прилади: тахеометри, нівеліри та цифрові нівеліри, лазерні сканери, GNSS-приймачі та супутникові технології, безпілотні літальні апарати.

На сьогодні на будівельних майданчиках найбільш поширеними методами є комбіноване використання комплексу приладів. Тобто проведення інженерно-геодезичного контролю будівництва параметрів земляного полотна, піщано-щебеневих шарів основи та покриття АД вимагає найбільш точних та ефективних методів. Вирішення цієї проблеми полягає у використанні сучасних систем автоматизованого інженерно-геодезичного контролю та керування дорожньо-будівельними машинами.

Постановка проблеми. Відомі класичні методи нівелювання та інженерно-геодезичного контролю будівництва автомобільних доріг є достатньо складним процесом, який вимагає великої кількості фахівців інженерів-геодезистів та значної кількості часу для виконання робіт. Системи автоматизованого інженерно-геодезичного контролю та керування дорожньо-будівельними машинами є сучасним підходом до вирішення проблеми точності контролю з паралельним збільшенням продуктивності робіт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні нормативні вимоги до проєкування та будівництва автомобільних доріг регламентується [1; 2]. Питанням автоматизованих систем нівелювання займалися такі науковці як О. С. Онищенко, Г. С. Саркісян, Е. В. Захарова та ін. Зокрема в роботі [3] виконано аналіз та узагальнення технології влаштування земляного полотна із залученням системи автоматичного нівелювання робо-

чим агрегатом землерийної техніки. Основні елементи системи автоматичного нівелювання Торсон досліджені в [5]. Аналіз конструкції зовнішнього автоматичного механізму нівелювання в радарах наведено в [6].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. На підставі виконаного аналізу літературних джерел зауважено, що значна увага досліджень приділяється питанню будови та принципам роботи системи автоматизованого нівелювання будівництва земляного полотна, тоді як питання інженерно-геодезичного контролю інших елементів автомобільної дороги недосліджені.

Метою статті є виконання аналізу автоматизованих систем інженерно-геодезичного контролю процесу будівництва автомобільних доріг.

Виклад основного матеріалу. До систем автоматизованого інженерно-геодезичного контролю та керування дорожньо-будівельними машинами належать системи: автоматизованого керування компактними машинами, землерийними та землерийно-транспортними машинами, асфальтоукладачами та котками.

Системи автоматизованого нівелювання [3] – це програмно-апаратний комплекс, який використовує геодезичні автоматизовані технології тахеометрії та GNSS технології, а також різні типи датчиків, для забезпечення часткової автоматизації виконання робіт. Дані системи встановлюються на машини (грейдери, бульдозери, скрепери, екскаватори, котки, асфальтоукладальники) під час виконання будівництва або реконструкції АД, аеродромів, площадок тощо.

Ці системи складаються з комплексу датчиків, гідравлічного керування елементів машини, GNSS-системи та апарату управління, яке дозволяє виконувати керування машиною з можливістю миттєвого визначення параметрів конструкції, що будується. Такий підхід дозволяє виконувати поточний інженерно-геодезичний контроль у процесі будівництва, що зменшує похибки, не потребує великої кількості спеціалізованих фахівців, зменшує час на визначення параметрів конструкцій.

Залежно від параметрів АД існують три основні різновиди систем, які можуть бути використані при будівництві АД [3]:

1D система – автоматична робота в одній площині (дотримання рівня або ухилу робочого елемента);

2D система – робота у площині з нахилом;

3D система – автоматизоване визначення перевищення та нахилу з врахуванням проектного положення та напрямку руху машини.

Враховуючи комплексний підхід до будівництва АД та велику кількість виробників, у цій роботі було вирішено розглянути сучасні 3D-системи автоматизованого інженерно-геодезичного контролю та керування машинами фірми TOPCON.

Системи інженерно-геодезичного контролю та керування компактними машинами. Система MC-Mobile поєднує технології інженерної геодезії та керування компактними машинами з метою підвищення ефективності робіт та зменшення потреби в персоналі для малих і середніх проєктів АД або для локального вирішення задач [4].

Система складається з датчика нахилу IMU, контролера, 3D роботизованого тахеометра. призми або GNSS приймача. На рис. 1 наведено приклад складу системи MC-Mobile.

Такий тип машин використовується для влаштування відкосів, транспортування матеріалів на невеликі відстані, будівництво траншей, влаштування дренажних каналів, допоміжні роботи тощо.



Рис. 1. Системи інженерно-геодезичного контролю та керування компактними машинами MC-Mobile [4]:
1 – датчик нахилу IMU; 2 – контролер; 3 – планшет на Android;
4 – 3D роботизований тахеометр; 5 – призма або GNSS приймач

Системи інженерно-геодезичного контролю та автоматизованого керування землерийними та землерийно-транспортними машинами.

Система 3D-MC Mobile GNSS TWIN складається з інерційних датчиків TS-i4 (для вимірювання обертання та нахилу), контролеру керування машиною MC – X1 (для керування машиною), системи GNSS управління (створення навігаційної бази), бездротової системи контролю (портативні планшети, що слугують приладовою панеллю для керування), роботизованого тахеометра та системи призми (для планування та контролю якості). На рис. 2 наведено приклад системи інженерно-геодезичного контролю та автоматизованого керування землерийними машинами 3D-MC Mobile GNSS TWIN.



Рис. 2. Системи інженерно-геодезичного контролю та автоматизованого керування землерийними машинами 3D-MC Mobile GNSS TWIN [4]

Така система забезпечує виконання одночасного інженерно-геодезичного контролю та керування машиною для влаштування кюветів, траншей для дренажних систем, влаштування виїмок або насипів тощо. За допомогою сучасних інерційних датчиків система в автоматичному режимі визначає кут нахилу, що дозволяє за допомогою контролера керувати процесом різання ґрунту. На рис. 3 наведено приклад, у якому вигляді система сприймає перевищення щодо проєктного рішення.

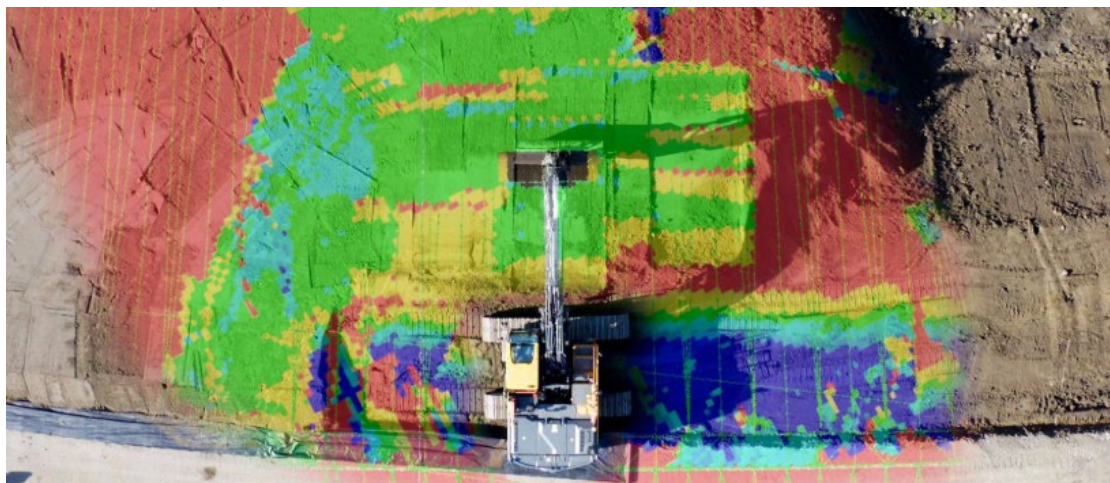


Рис. 3. Кольорова діаграма перевищень та виямок системи 3D-MC Mobile GNSS TWIN [4]

Отримана інформація з датчиків трансформується в цифровий сигнал та відображається на панелі контролера, який розташований у кабіні оператора машини. Таким чином оператор повністю контролює процес різання ґрунту, кут нахилу ковша, положення стріли та за допомогою кольорової діаграми визначає різницю де потрібно досипати ґрунт, а де навпаки зрізати. Приклад відображення інформації на панелі контролера системи 3D-MC Mobile GNSS TWIN наведено на рис. 4.



Рис. 4. Приклад відображення інформації на панелі контролера системи 3D-MC Mobile GNSS TWIN [4]

Для землерийно-транспортних машин використовуються системи 3D-MC Max GNSS TWIN та 3D-MC Max tmGNSS.

Система 3D-MC Max GNSS TWIN використовують для автоматизації керування бульдозерами. Особливістю даної системи є можливість виконання швидкого перемикання між системами GNSS та роботизованим тахеометром, що дозволяє зменшити витрати часу на переналаштування системи в місцях, де відсутній сигнал. Також усувається необхідність присутності інженера-геодезиста на будівельному майданчику. Аналогічним чином ця система 3D-MC Mobile GNSS TWIN оснащена комплектом геодезичного обладнання та датчиків, які відображають результати процесу нівелювання земляного полотна на контролері (рис. 5).

Враховуючи, що найбільшу частину процесу будівництва земляного полотна та інших земляних споруд виконують за допомогою бульдозера, ця система є найбільш поширеною серед автоматизованих систем.



Рис. 5. Приклад відображення інформації на панелі контролера системи 3D-MC Max GNSS TWIN [4]

Автогрейдер є провідною машиною в процесі будівництва земляного полотна АД. Відповідно до робочих органів автогрейдера виробниками була розроблена система 3D-MC Max mmGNSS, що використовується для автоматизації керування автогрейдером (рис. 6).

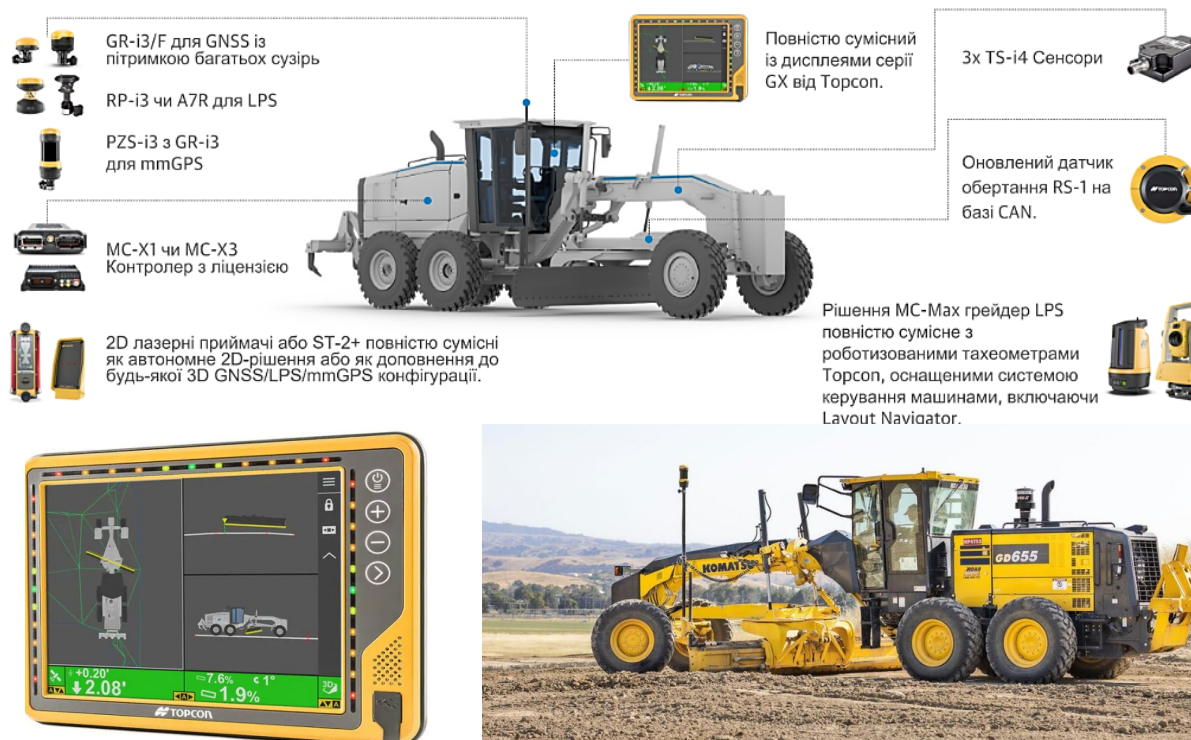


Рис. 6. Система 3D-MC Max mmGNSS для автогрейдерів [4]

Система може бути використана для: точного планування земляного полотна, відкосів насипів та виїмок, будівництва АД, підготовки піщано-щебеневих основ, створення ґрунтових польових або лісових доріг, вирівнювання земляного полотна, земляних робіт, обслуговування АД та смуг відведення [4]. Інерційні вимірювальні блоки (IMU) дозволяють із високою точністю визначати нахил, крен та напрям руху леза автогрейдера.

На відміну від попередніх систем дана система доповнена 2D лазерним приймачем, який може бути використаний як автономне 2D-рішення, або як доповнення до GNSS/LPS/mmGPS конфігурації. Також рішення MC-Max грейдер LPS повністю сумісно з роботизованим тахеометром, оснащеним системою керування автогрейдером. Таким чином весь процес роботи контролюється паралельною роботою тахеометра без участі оператора.

Системи інженерно-геодезичного контролю та автоматизованого керування асфальтоукладачами.

Після влаштування земляного полотна та піщано-щебневих шарів АД завершальним етапом будівництва основних елементів конструкції АД є влаштування покриття АД. Для асфальтоукладальників використовується система 3D-MC Max mmGNSS (рис. 7).



Рис. 7. Система 3D-MC Max mmGNSS

для інженерно-геодезичного контролю та керування асфальтоукладальниками:
1 – приймачі GNSS, mmGPS, призма тощо; 2 – дисплей; 3 – роботизований тахеометр; 4 – сенсорні та інші датчики; 5 – Thermal Mapper (тепловий картограф) [4]

Системи інженерно-геодезичного контролю та автоматизованого керування котками.

Ущільнення є невід'ємною частиною будівництва всіх конструктивних шарів АД. Завершальним етапом укладання асфальтобетонних сумішей є їх ущільнення. Для ущільнення використовуються гладковальцеві котки які можуть бути оснащені інтелектуальними системами уочування дорожнього покриття С-53 (рис. 8).



Рис. 8. Системи інженерно-геодезичного контролю та автоматизованого керування котками MC-53:

1 – GNSS-антена; 2 – Контролер; 3 – датчик температури;
4 – дисплей; 5 – датчик ущільнення

Система побудована на принципі постійного відстежування GNSS-приймачами проєктного положення котка під час кожного проходу відповідно до прийнятої схеми проходу. Датчики температури контролюють температуру асфальтобетонної суміші, а датчик ущільнення надає зворотний зв'язок щодо модуля пружності поверхні. Уся зібрана інформація про стан асфальтобетонної суміші під час ущільнення передається на контролер в кабінку оператора, який контролює відповідність показників до проєктних вимог [4]. Також особливістю цієї системи є можливість за рахунок Sitelink3D виконувати контроль не тільки оператору котка, а також інженеру-геодезисту.

Висновки. У результаті проведеного аналізу останніх досліджень та комплексу сучасних автоматизованих систем інженерно-геодезичного контролю та керування дорожньо-будівельними машинами можна зробити такі висновки:

- будівництво автомобільних доріг вимагає комплексного, точного та ефективного підходу до виконання інженерно-геодезичного контролю процесу будівництва автомобільних доріг;
- до складу сучасних автоматизованих систем інженерно-геодезичного контролю та керування входять: датчики (обертання, температури, щільності); системи гідравлічного керування елементів машини; GNSS системи; роботизовано тахеометри; комплект призм; контролер;
- сучасні системи автоматизованого інженерно-геодезичного контролю та керування дорожньо-будівельними машинами TOPCON забезпечують повний цикл будівництва автомобільних доріг.

Список використаних джерел

1. Технічний комітет стандартизації ТК 307 «Автомобільні дороги і транспортні споруди». (2023). *Автомобільні дороги. Терміни та визначення понять (ДСТУ 9214:2023)*. ДП «УкрНДНЦ».
2. ДерждорНДІ. (2019). *Посібник № 1: Контроль якості будівництва автомобільних доріг загального користування до ДБН В.2.3-4:2015 «Автомобільні дороги». Частина 1. Проектування. Частина 2. Будівництво* [Чинний від 19.01.2018 р.]. ДерждорНДІ.
3. Захарова, Е., Саркісян, Г., & Онищенко, О. (2023). Аналіз та узагальнення технології влаштування земляного полотна із залученням системи автоматичного нівелювання робочим агрегатом землерийної техніки. *SWorldJournal*, (22-01), 44–54. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2023-22-01-055>.
4. *Укргео-Проект МС - геодезичне обладнання*. (n.d.). UKRGEOMC. <https://ukrgeomc.com>.
5. Захарова, Е. В., Пархомович, А. В., & Джежела, В. А. (2023). Основні елементи системи автоматичного нівелювання Торсон. *Дорожньо-будівельний комплекс: проблеми, перспективи, інновації: матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції, 23–24 листопада 2023 р.*, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 154–158. <https://dspace2.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/22716>.
6. Zhi, S.-l., & Yang, R.-z. (2015). Design analysis of external automatic leveling mechanism in radars. In *First international conference on information sciences, machinery, materials and energy*. Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/icismme-15.2015.311>.

References

1. Tekhnichnyi komitet standartyzatsii TK 307 «Avtomobilni dorohy i transportni sporudy». [Technical Committee for Standardization TC 307 "Highways and Transport Structures".] (2023). *Avtomobilni dorohy. Terminy ta vyznachennia poniat (DSTU 9214:2023)*. DP «UkrNDNTs». - *Highways. Terms and definitions of concepts (DSTU 9214:2023)*. SE "UkrNDNC".
2. DerzhdorNDI (2019) Posibnyk № 1: Kontrol yakosti budivnytstva avtomobilnykh dorih zahalnoho korystuvannia do DBN V.2.3-4:2015 «Avtomobilni dorohy». Chastyna 1. Proektuvannia. Chastyna 2. Budivnytstvo [Manual No. 1 Quality control of construction of public highways to DBN V.2.3-4:2015 Highways. Part 1. Design. Part 2. Construction.] - [Valid from 01/19/2018]- K: DerzhdorNDI, 2019.
3. Zakharova E.V., Sarkisyan G.S., Onyshchenko O.S. (2023). Analiz ta uzahalnennia tekhnolohii vlashtuvannia zemlianooho polotna iz zaluchenniam systemy avtomatychnoho niveliuvannia robochym ahrehatom zemleriyinoi tekhniki [Analysis and generalization of the technology of arranging the subgrade with the involvement of an automatic leveling system by a working unit of earthmoving equipment]. *SWorldJournal*, 1(22-01), 44–54. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2023-22-01-055>.

4. Official website of LLC "Ukrgeproekt" MS. <https://ukrgeomc.com>.
5. Zakharova E. V., Parkhomovich A. V., Dzhezhela V. A. (November 23–24, 2023). Basic elements of the Topcon automatic leveling system. *Road construction complex: problems, prospects, innovations: materials of the III International Scientific and Technical Conference* (pp. 154–158). National Automobile and Road Univ. <https://dspace2.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/22716>.
6. Shi-lei Zhi, Run-ze Yang (2018). Design Analysis of External Automatic Leveling Mechanism in Radars. *International Conference on Information Sciences, Machinery, Materials and Energy (ICISMME 2015)* (pp. 1468-1472). <https://doi.org/10.2991/icismme-15.2015.311>.

Отримано 20.06.2025

UDC 528.4

Oleksiy Tereshchuk¹, Serhiy Zavorotny², Andriy Suchkov³

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management
National University "Chernihiv Polytechnic" (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: olexter1957@gmail.com **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6433-9351>
ResearcherID: <http://www.researcherid.com/rid/H-4540-2016>

²PhD in Technical Sciences, senior teacher departments of geodesy, cartography and land management
National University "Chernihiv Polytechnic" (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: zavorotnyiserhii@ukr.net **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2139-8877> **ResearcherID:** [NRY-3592-2025](https://orcid.org/0000-0002-2139-8877)

³Master, Geodetic Engineer
UKR GEO-PROJECT MS LLC
E-mail: suchkov.andriy@gmail.com

MODERN SYSTEMS OF AUTOMATED ENGINEERING AND GEODESIC CONTROL AND MACHINE CONTROL IN THE PROCESS OF ROAD CONSTRUCTION

The article analyzes the existing systems of automated engineering and geodetic control and management of road construction machines, taking into account the peculiarities of the road construction process. According to the analysis, the following systems were considered, namely: automated control systems for compact machines MC-Mobile; automated control systems for earthmoving machines 3D-MC Mobile GNSS TWIN; automated control systems for earthmoving and transport machines 3D-MC Max GNSS TWIN for bulldozers and 3D-MC Max mmGNSS for motor graders; automated control systems for asphalt pavers 3D-MC Max mmGNSS; automated control systems for rollers 3D-MC Max mmGNSS. The features and composition of the equipment set of each system are determined, and their differences are considered. The complex of temperature and pressure sensors, hydraulic control of machine elements, GNSS system and control device that allows you to control the machine with the ability to instantly determine the parameters of the structure under construction are considered. Functions of geodetic equipment reproducing design solutions in the system set are determined.

Having analyzed the systems of automated engineering and geodetic control and control of road construction machines, conclusions were drawn that allowed us to determine the main features of conducting engineering and geodetic control of highway construction. The set of geodetic equipment necessary for the formation of an automated system is determined. This article is of a review nature and is intended only for the analysis of existing automated engineering and geodetic control and control of road construction machines.

Keywords: engineering and geodetic control; highways; automated leveling systems; GNSS technologies.

Fig.: 8. **References:** 6.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-493-501](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-493-501)

УДК 725.8.01:721.02

**Андрій Анатолійович Титюк¹, Тетяна Петрівна Ярова², Світлана Юрївна Середа³,
Кирило Олександрович Сіренко⁴, Анастасія Вадимівна Правоторова⁵**

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри нарисної геометрії та графіки

Український державний університет науки і технологій

Навчально-науковий інститут Придніпровська державна академія будівництва та архітектури (Дніпро, Україна)

E-mail: tytiuk.andrii@pdaba.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4119-4089>

²доцент кафедри нарисної геометрії та графіки

Український державний університет науки і технологій

Навчально-науковий інститут Придніпровська державна академія будівництва та архітектури (Дніпро, Україна)

E-mail: yarova.tetyana@pdaba.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8504-383X>

³старший викладач кафедри нарисної геометрії та графіки

Український державний університет науки і технологій

Навчально-науковий інститут Придніпровська державна академія будівництва та архітектури (Дніпро, Україна)

E-mail: sereda.svitlana@pdaba.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9989-2613>

⁴асистент кафедри нарисної геометрії та графіки

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 ID: <https://orcid.org/0000-0003-1231-2338>

⁵студентка

Український державний університет науки і технологій

Навчально-науковий інститут Придніпровська державна академія будівництва та архітектури (Дніпро, Україна)

E-mail: n.pravotorova08@gmail.com

ІНТЕГРАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ 3D-СКАНУВАННЯ ПРИ СТВОРЕННІ МОДЕЛІ БУДІВЛІ ЛІЦЕЮ

У статті висвітлено результати інтеграції інноваційних технологій 3D-сканування в освітнє середовище на прикладі взаємодії Українського державного університету науково-технологічного ННІ ПДАБА з ліцеєм № 54 м. Дніпро. Основною метою дослідження є створення високоточної цифрової моделі навчального закладу з використанням лазерного сканера Leica BLK360. Проведено комплексне сканування екстер'єрів та інтер'єрів будівлі, що забезпечило отримання просторових даних для подальшої реконструкції, аналізу та використання в освітніх і наукових цілях. Проєкт демонструє ефективність упровадження сучасних цифрових технологій у сферу загальної середньої освіти та сприяє розвитку STEM-напрямів.

Ключові слова: 3D модель; сканування; ліцей; будівля; точка вимірювання; лазерний сканер; автоматизоване проєктування; масив даних; будівельні конструкції.

Рис.: 8. Бібл.: 10.

Постановка проблеми. Сучасні тенденції розвитку будівельної галузі та архітектури вказують на необхідність активного впровадження інноваційних цифрових технологій, зокрема 3D-сканування, проте в українській практиці спостерігається значне відставання у їх використанні, особливо щодо обстеження та документування існуючих об'єктів освітньої інфраструктури. Більшість навчальних закладів не мають сучасних цифрових моделей, що суттєво ускладнює проведення якісних ремонтних робіт, ефективне управління майном та розробку проєктів модернізації. Моральне і фізичне старіння шкільних будівель, відсутність точних даних про їхній технічний стан, обмежене застосування BIM-технологій та недостатня кількість кваліфікованих фахівців створюють серйозні перешкоди для якісного оновлення освітньої інфраструктури. Крім того, є помітний розрив між освітнім процесом та сучасними будівельними технологіями, що проявляється в недостатньому ознайомленні учнів з інноваційними методами та відсутності практичних прикладів їх застосування. У зв'язку з цим виникає нагальна потреба у розробці практичних методик 3D-сканування навчальних закладів, апробації сучасного обладнання в реальних умовах, створенні цифрових моделей для подальшого використання та інтеграції отриманих результатів у освітній процес, що й стало основною метою даного дослідження. Реалізація цього проєкту на базі ліцею № 54 у м. Дніпро дозволить не лише отримати точну цифрову модель будівлі, але і стане важливим кроком у подоланні існуючих проблем та впровадженні інноваційних підходів у будівельній галузі та освіті.

Аналіз публікацій. Науковий дискурс сучасності щодо застосування 3D-сканування в архітектурі та будівництві демонструє стрімкий розвиток цієї технології на

© А. А. Титюк, Т. П. Ярова, С. Ю. Середа, К. О. Сіренко, А. В. Правоторова, 2025

міжнародному рівні, проте в українському контексті ця тематика залишається недостатньо дослідженою. Аналіз останніх наукових публікацій та практичних кейсів свідчить, що світовий досвід активно впроваджує методики лазерного сканування для обстеження історичних пам'яток, промислових об'єктів та громадських будівель, тоді як в Україні подібні дослідження мають переважно фрагментарний характер. Особливо помітним є відставання у використанні цих технологій для навчальних закладів, що обумовлено як технічними, так і економічними факторами.

Міжнародні дослідження, зокрема роботи під егідою Building SMART International та European Construction Sector Observatory, підкреслюють ключову роль BIM-технологій у сучасному будівництві, де 3D-сканування виступає важливим інструментом створення точних цифрових подвійників. Українські науковці, зокрема представники УДУНТ ННІ ПДАБА, у своїх публікаціях відзначають потенціал цих методів, але водночас констатують обмежену кількість практичних реалізацій, особливо щодо об'єктів освітньої інфраструктури. В останні роки спостерігається певний прогрес у цьому напрямку, що підтверджують роботи, виконані в рамках європейських проєктів EUGREEN та UKRENERGY, де українські фахівці активно вивчають міжнародний досвід.

Особливу увагу в наукових публікаціях приділено технічним аспектам використання сканерів Leica BLK360, які довели свою ефективність для швидкого та точного сканування будівель різного призначення. Проте більшість доступних досліджень описують застосування цієї технології для пам'яток архітектури чи промислових об'єктів, тоді як питання сканування типової шкільної інфраструктури залишаються поза увагою науковців. Це створює значну прогалину в теоретичній базі та практичних рекомендаціях щодо використання 3D-сканування саме для навчальних закладів, що й зумовлює актуальність цього дослідження.

Мета статті та задачі дослідження Основною метою цієї наукової роботи є розробка та апробація комплексної методики 3D-лазерного сканування навчальних закладів на прикладі ліцею № 54 м. Дніпро з подальшим створенням детальної цифрової моделі будівлі. Дослідження спрямоване на подолання наявного розриву між потенціалом сучасних технологій сканування та їх практичним застосуванням в українській освітній інфраструктурі. Особливий акцент робиться на адаптацію міжнародного досвіду до місцевих умов та демонстрацію практичної цінності отриманих результатів для різних груп користувачів.

Для досягнення поставленої мети визначаються такі ключові завдання дослідження:

1. Практична реалізація повномасштабного 3D-сканування будівлі ліцею №54 з використанням лазерного сканера Leica BLK360, що включає збір даних як зовнішніх фасадів, так і внутрішніх приміщень. Ця задача передбачає розробку оптимальної схеми сканування, визначення необхідної кількості сканувальних позицій та оцінку часу, необхідного для проведення повного циклу робіт.

2. Систематизація та аналіз отриманих даних з подальшим створенням точних цифрових моделей у спеціалізованому програмному забезпеченні. Важливим аспектом цієї задачі є розробка алгоритмів обробки сканувальних даних, які дозволять оптимізувати процес створення кінцевої 3D-моделі.

3. Оцінка практичної придатності отриманих результатів для різних цільових груп:

- Для адміністрації навчального закладу - розробка рекомендацій щодо використання 3D-моделі для планування ремонтних робіт, реконструкції та управління майном.

- Для педагогічного колективу - створення методичних матеріалів з інтеграції 3D-моделі в навчальний процес.

- Для учнів - розробка профорієнтаційних заходів з використанням результатів сканування.

4. Виявлення та аналіз технічних та організаційних труднощів, що виникають при скануванні діючих навчальних закладів, з подальшою розробкою рекомендацій щодо їх

подолання. Це включає оцінку впливу людського фактора, особливостей робочого процесу в умовах навчального закладу та обмежень, пов'язаних із безпекою.

5. Порівняльний аналіз ефективності використаної методики сканування з традиційними методами обмірів, що дозволить кількісно оцінити переваги та недоліки кожного підходу. Особлива увага приділяється таким параметрам як точність, швидкість виконання робіт, обсяг отриманої інформації та вартість процесу.

Реалізація цих завдань дозволить не лише отримати конкретні практичні результати у вигляді цифрової моделі конкретного навчального закладу, але й сформулювати узагальнені рекомендації щодо застосування 3D-сканування для об'єктів освітньої інфраструктури в Україні. Очікується, що результати дослідження стануть основою для подальших наукових розробок у цій галузі та сприятимуть активізації використання сучасних цифрових технологій у вітчизняній будівельній практиці.

Результати досліджень. Реалізація проєкту 3D-сканування ліцею № 54 виявила ряд важливих технічних та організаційних аспектів, які значно вплинули на кінцевий результат. Процес сканування, що проводився протягом трьох робочих днів, потребував ретельного планування через необхідність узгодження з навчальним процесом. Команда дослідників розробила спеціальний графік робіт, який передбачав сканування коридорів та спільних приміщень на перервах, а класних кімнат – у вільний від занять час. Для досягнення максимальної точності було застосовано комбінований підхід: основні об'єми фіксувались сканером Leica BLK360, тоді як архітектурні деталі та важкодоступні місця документувались за допомогою ручного сканера Faro Focus. Особливу увагу приділили скануванню інженерних комунікацій та технічних приміщень, що традиційно є найбільш проблемними зонами для цифровізації.

Отримана 3D-модель (рис. 1) відрізняється винятковою деталізацією та точністю. Загальна кількість точок у хмарі перевищила 28 мільйонів, що дозволило досягти роздільної здатності 5 мм для зовнішніх поверхонь та 3 мм для внутрішніх приміщень.



а



б

Рис. 1. Лазерний 3D сканер:
а – Leica BLK360 та б – Leica BLK360 G2

Точність геометричних параметрів становить ± 3 мм для горизонтальних поверхонь і ± 4 мм для вертикальних елементів, що значно перевищує показники традиційних методів обмірів. Модель охоплює 98,7 % всіх поверхонь будівлі, включаючи такі складні елементи як сходові клітки, підлогові покриття та декоративні деталі фасадів (рис. 2). Особливу цінність становить те, що всі дані були зібрані без припинення навчального процесу, що доводить практичну застосовність методу в реальних умовах.

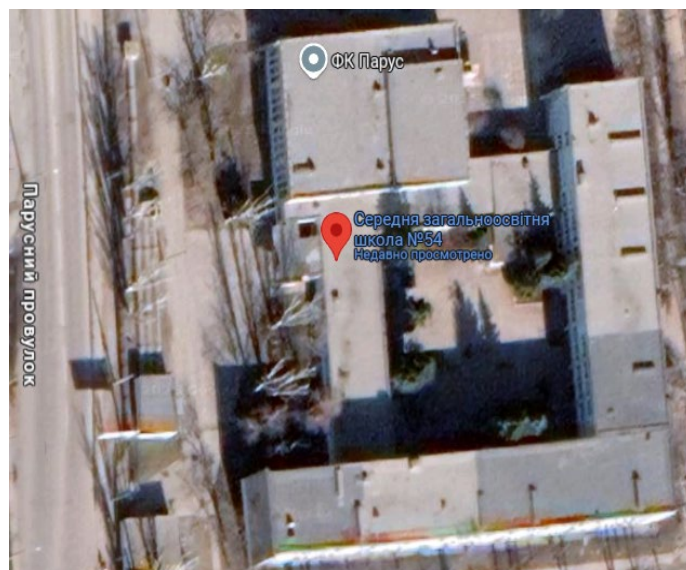


Рис. 2. План ліцею № 54

Джерело: Google Maps

Для адміністрації ліцею створено комплексний цифровий паспорт будівлі, який включає не лише 3D-модель, а й повний комплект креслень у форматі DWG, фотоматеріали високої роздільної здатності та технічні звіти про стан конструкцій.

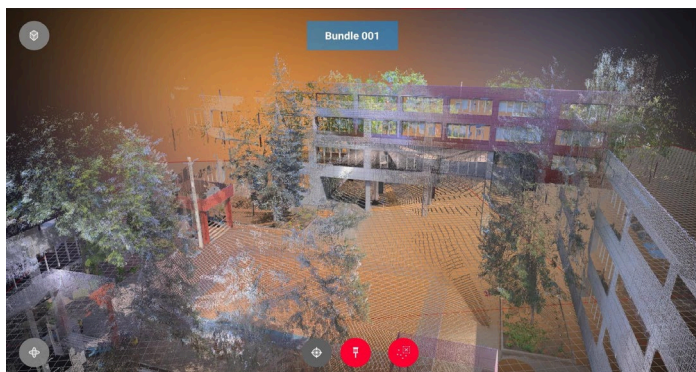
Ці дані вже знайшли практичне застосування при плануванні ремонту санвузлів та модернізації системи опалення. Для педагогічного колективу розроблено спеціальний навчальний модуль, який дозволяє використовувати 3D-модель (рис. 3) на уроках геометрії, фізики та інформатики. Учні старших класів отримали унікальну можливість працювати з реальним цифровим двійником своєї школи, що значно підвищило їхню зацікавленість у технічних дисциплінах. Важливим результатом стало те, що 15 % учнів, які брали участь у проєкті, виявили бажання вступити на технічні спеціальності, пов'язані з BIM-модельюванням та сучасними будівельними технологіями.



Рис. 3. Встановлення 3D сканеру на першу стоянку з лицьового фасаду будівлі ліцею № 54

Отримана в результаті 3D-модель відрізняється винятковою деталізацією та повнотою охоплення - загальна кількість точок у хмарі перевищила 28 мільйонів, при роздільній здатності 5 мм для зовнішніх поверхонь та 3 мм для внутрішніх приміщень, що дозволило відтворити навіть такі дрібні елементи як дверні ручки, вимикачі та інші

архітектурні деталі. Особливу увагу при скануванні було приділено критично важливим вузлам будівлі - сходовим кліткам, несучим конструкціям та інженерним комунікаціям, точність відтворення яких становила ± 2 мм (рис. 4). Загальний рівень охоплення поверхонь становив 98,7 %, що є винятково високим показником для об'єктів такої складності.



а



б

*Рис. 4. Проміжна схема та 3D модель будівлі після 7 стоянок збору даних:
а – відсканований внутрішній фасад ліцею, б – проміжна 3D модель будівлі*

Для адміністрації навчального закладу створений цифровий двійник відкриває нові можливості в управлінні майном - на основі отриманих даних розроблено повноцінний цифровий паспорт будівлі, який включає не лише архітектурні креслення, а й детальні перерізи, вузли та специфікації. Практична цінність отриманих результатів підтверджується вже на поточному етапі - модель активно використовується для планування майбутньої реконструкції, дозволяючи проводити віртуальні огляди приміщень, розраховувати обсяги матеріалів для ремонту та моделювати різні варіанти перепланування. Окремо варто відзначити освітній потенціал проєкту - на основі отриманих даних розроблено спеціальний навчальний модуль "Цифрові технології в архітектурі", який вже інтегрований у програму для учнів старших класів, а серія проведених майстер-класів за участю 12 зацікавлених учнів значно розширила їхнє уявлення про сучасні будівельні технології.

Технічна реалізація проєкту виявила ряд важливих закономірностей - порівняльний аналіз показав, що застосування 3D-сканування дозволило скоротити час обстеження будівлі в 4,5 рази порівняно з традиційними методами, при цьому точність отриманих даних виявилась на 37 % вищою за звичайні методи обмірів. Процес обробки даних, що включав каталогізацію 56 окремих сканів, їх поєднання у єдину модель та перевірку точності, зайняв 12 годин роботи на спеціалізованому програмному забезпеченні. Наукова новизна дослідження полягає не лише в самому факті створення цифрового подвійника шкільної будівлі, а й у розробці унікальної методики адаптації процесу сканування до умов діючого навчального закладу, що включала спеціальні організаційні заходи, оптимізацію часу робіт та методику обробки даних з урахуванням особливостей освітніх установ. Отримані результати створюють міцну основу для подальших досліджень у галузі цифровізації освітньої інфраструктури та відкривають нові перспективи для впровадження BIM-технологій у практику управління шкільними будівлями.

Наукова новизна даного дослідження для ліцею № 54 полягає у принципово новому підході до документування та управління навчальною інфраструктурою. Уперше в історії закладу створено повноцінний цифровий двійник будівлі, який поєднує в собі не лише точну 3D-геометрію всіх приміщень, а й інтегровані дані про технічний стан конструкцій (рис. 5, 6). Особливістю є те, що процес сканування був проведений без припинення навчального процесу, що вимагало розробки унікальних організаційних рішень і спеціальних методик обробки даних.



Рис. 5. Ознайомлення учнів ліцею з технологією 3D-сканування будівель



Рис. 6. Робота учнів ліцею № 54 з технологією 3D-сканування будівель

Учасники проєкту, включаючи адміністрацію та учнів, відзначили високий рівень деталізації цифрового двійника будівлі, тривимірна модель точно відображає архітектурні особливості об'єкта, зокрема дрібні елементи фасаду та інтер'єру.

Педагогічний колектив особливо відзначив можливості, які відкриваються для навчального процесу. Вчителі математики та фізики вже планують використовувати 3D-модель для розв'язання практичних задач, а викладачі мистецтва - для вивчення основ архітектурної композиції.

Проте найбільший ентузіазм викликав проєкт у учнів (рис. 7, 8). «Це було ніби в майбутнє потрапити», - розповідає учениця 11-го класу. Багато з них вперше побачили, як сучасні технології можуть поєднуватися зі звичайним навчанням. Особливо вразило школярів те, що вони могли спостерігати процес сканування в реальному часі та бачити, як їхні знайомі класи та коридори перетворюються на цифрові моделі.

Висновок. Проведене дослідження з 3D-сканування ліцею № 54 у м. Дніпро довело високу ефективність застосування сучасних цифрових технологій для документування та управління об'єктами освітньої інфраструктури. Отримані результати демонструють, що використання лазерного сканера Leica BLK360 дозволяє створити деталізований цифровий подвійник будівлі з точністю до ± 4 мм, що значно перевищує можливості традиційних методів обмірів.



Рис. 7. Загальне фото команди УДУНТ ННІ ПДАБА та учнів ліцею № 54



Рис. 8. Об'ємна 3D модель ліцею № 54

Важливим досягненням стало розроблення унікальної методики сканування, яка враховує специфіку роботи діючого навчального закладу, його конфігурацію та особливості довкілля. Запропоновані організаційні рішення дозволили провести всі роботи без перерви освітнього процесу, що має особливе значення для подальшого впровадження подібних технологій в інших школах. Проєкт мав значний освітній вплив, сприяючи підвищенню цифрової компетентності як учнів, так і педагогічного колективу. Створена 3D-модель відкриває нові можливості для модернізації навчального процесу, професійної орієнтації учнів та ефективного управління майном закладу. Отримані результати свідчать про перспективність подальшого впровадження 3D-сканування в системі освітньої інфраструктури України. Вони створюють основу для розвитку нових підходів до моніторингу стану шкільних будівель, планування їх реконструкції та інтеграції сучасних цифрових технологій в освітній процес.

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. Модуль Жана Моне. (n.d.). *Європейські практики із зеленої трансформації: Уроки для України. Проєкт 101085133 – EUGREEN*. <https://pgasa.dp.ua/jean-monnet-project/opys-proyektu>.

2. UKRENERGY Project. (n.d.). *Інноваційні магістерські курси на підтримку покращення енергетичного та вуглецевого сліду будівельного фонду України. Проєкт 101082898 – UKRENERGY*. <https://pgasa.dp.ua/ukrenergy-project/opys-proyektu>.

3. The BRIDGE Project. (n.d.). *Подолання розриву між університетом і промисловістю: інноваційна магістерська навчальна програма, що підтримує розвиток зелених робочих місць і цифрових навичок в українському будівельному секторі. Проєкт 101127884 – The BRIDGE*. <https://pgasa.dp.ua/the-bridge-project/opys-proyektu>.

4. Building SMART International. <https://www.buildingsmart.org>.

5. Європейська комісія. (n.d.). *Обсерваторія будівельного сектору ЄС (EC SO)*. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/construction/observatory_en?prefLang=uk

6. Фандієй, А., Сопільняк, А., & Шабанова, К. (2024). *3D-сканування як сучасний інструмент архітектора. Інженер третього тисячоліття: матеріали міжнародної студентської наукової конференції* (с. 29–31). Дніпро: УДУНТ.

7. ПДАБА. *Фінал конкурсу «CREATE 3D SCAN»*. <https://pgasa.dp.ua/news/final-konkursu-create-3d-scan>.

8. ПДАБА. *Сучасні технології УДУНТ ННІ ПДАБА крокують разом з абітурієнтами ліцею № 15*. <https://pgasa.dp.ua/news/suchasni-tehnologiyi-udunt-nni-pdaba-krokuyut-razom-z-abituriyentamy-litseyu-15>.

9. Навігаційно-геодезичний центр. *Лазерний сканер Leica BLK360*. <https://leica-geosystems.com.ua/product/blk360/>

10. Навігаційно-геодезичний центр. *Лазерний сканер Leica BLK360 G2*. <https://surl.li/upvuce>

References

1. Jean Monnet Module. (n.d.). *Yevropeiski praktyky iz zelenoi transformatsii: Uroky dlia Ukrainy. [European practices for green transformation: Lessons for Ukraine]. Project 101085133 – EUGREEN*. <https://pgasa.dp.ua/jean-monnet-project/opys-proyektu>.

2. UKRENERGY Project. (n.d.). *Innovatsiini mahisterski kursy na pidtrymku pokrashchennia enerhetychnoho ta vuhletsevoho slidu budivelnoho fondu Ukrainy. [Innovative master's courses to support the improvement of the energy and carbon footprint of Ukraine's building stock]. Project 101082898 – UKRENERGY*. <https://pgasa.dp.ua/ukrenergy-project/opys-proyektu>.

3. The BRIDGE Project. (n.d.). *Podolannia rozryvu mizh universytetom i promyslovistiu: innovatsiina mahisterska navchalna prohrama, shcho pidtrymuie rozvytok zelenykh robochykh mist i tsyfrovyykh navychok v ukrainskomu budivelnomu sektori. [Bridging the gap between university and industry: An innovative master's curriculum supporting green jobs and digital skills in Ukraine's construction sector]. Project 101127884 – The BRIDGE*. <https://pgasa.dp.ua/the-bridge-project/opys-proyektu>.

4. Building SMART International. (n.d.). <https://www.buildingsmart.org>.

5. European Commission. (n.d.). *Observatoriia budivelnoho sektoru YeS (EC SO)*. [European Construction Sector Observatory (EC SO)]. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/construction/observatory_en?prefLang=uk.

6. Fandiei, A., Sopilniak, A., & Shabanova, K. (2024). *3D-skanuvannia yak suchasnyi instrument arkhitekтора. Inzhener tret'oho tysiacholittia: materialy mizhnarodnoi studentskoi naukovoї konferentsii. [3D scanning as a modern architect's tool. Engineer of the Third Millennium: Proceedings of International Students' Scientific Conference]* (pp. 29–31). USUST.

7. PSACEA. (n.d.). *Final konkursu «CREATE 3D SCAN» [Final of the “CREATE 3D SCAN” competition]*. <https://pgasa.dp.ua/news/final-konkursu-create-3d-scan>.

8. PSACEA. (n.d.). *Suchasni tekhnolohii UDUNT NNI PDABA krokuiut razom z abituriientamy litseiu № 15. [Modern technologies of USUST ESI PSACEA go hand in hand with Lyceum No. 15 applicants]*. <https://pgasa.dp.ua/news/suchasni-tehnologiyi-udunt-nni-pdaba-krokuyut-razom-z-abituriyentamy-litseyu-15>.

9. Navihatsiino-heodezychnyi tsentr. *Lazernyi skaner Leica BLK360*. [Navigation and Geodetic Center. (n.d.). Leica BLK360 laser scanner]. <https://leica-geosystems.com.ua/product/blk360>.

10. Navihatsiino-heodezychnyi tsentr. *Lazernyi skaner Leica BLK360 G2*. [Navigation and Geodetic Center. (n.d.). Leica BLK360 G2 laser scanner]. <https://surl.li/upvuce>.

Отримано 20.06.2025

**Andrii Tytiuk¹, Tetiana Yarova², Svitlana Sereda³,
Kyrylo Sirenok⁴, Anastasiia Pravotorova⁵**

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Descriptive Geometry and Graphics
Ukrainian State University of Science and Technology
Educational and Scientific Institute of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture (Dnipro, Ukraine)
E-mail: tytiuk.andrii@pdaba.edu.ua **ORCID ID:** 0000-0002-4119-4089

²Associate Professor of the Department of Descriptive Geometry and Graphics
Ukrainian State University of Science and Technology
Educational and Scientific Institute of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture (Dnipro, Ukraine)
E-mail: yarova.tetyana@pdaba.edu.ua **ORCID ID:** 0000-0002-8504-383X

³Assistant of the Department of Descriptive Geometry and Graphics
Ukrainian State University of Science and Technology
Educational and Scientific Institute of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture (Dnipro, Ukraine)
E-mail: sereda.svitlana@pdaba.edu.ua **ORCID ID:** 0000-0002-9989-2613

⁴Assistant of the Department of Descriptive Geometry and Graphics
Ukrainian State University of Science and Technology
Educational and Scientific Institute of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture (Dnipro, Ukraine)
E-mail: sirenok.kyrylo@365.pdaba.edu.ua.com **ORCID ID:** 0000-0003-1231-2338

⁵Student
Ukrainian State University of Science and Technology
Educational and Scientific Institute of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture (Dnipro, Ukraine)
E-mail: n.pravotorova08@gmail.com

INTEGRATION OF 3D SCANNING TECHNOLOGY IN THE DEVELOPMENT OF A LYCEUM BUILDING MODEL

The USUST of the ESI PSACEA is actively implementing innovative 3D scanning technologies into the educational process and practical activities, thereby expanding the scope of their application. Following successful implementation of the pilot project with Lyceum No. 54, the University initiated a new phase of collaboration with the same institution in Dnipro, demonstrating the growing interest in digital technologies within secondary education.

The aim of the article is to conduct 3D laser scanning of the Lyceum No. 54 building (Dnipro City Council) using the advanced Leica BLK360 scanner and to create the first detailed digital 3D model of an educational institution in the region. The acquired data will not only help determine optimal project timelines but also provide insights into the effectiveness of the technology's application in educational settings. A significant aspect of the project is familiarizing students and educators with modern 3D scanning methods, which contributes to their professional development. Moreover, the resulting model will serve as a practical tool for the lyceum's administration, enabling better planning of maintenance work, assessment of the building's condition, and simulation of potential reconstruction scenarios.

The study involved comprehensive scanning of the lyceum's facades and interior spaces, resulting in the creation of a detailed 3D model suitable for use in educational processes, infrastructure management, and design. Students were given a unique opportunity to engage with cutting-edge technologies, enhancing their career orientation and increasing interest in STEM fields. The successful implementation of the project confirmed the effectiveness of 3D scanning in education and opened up new prospects for further research.

Keywords: 3D model; scanning; lyceum; building; measurement point; laser scanner; computer-aided design; data array; building structures.

Fig.: 9. References: 10.

Сергій Володимирович Дяченко

аспірант кафедри теплогазопостачання і вентиляції

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)

E-mail: dyachenkosv460@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0187-0684>

РЕКОНСТРУКЦІЯ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ ЯК ЕЛЕМЕНТ ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЇ СТАРИХ БАГАТОПОВЕРХОВИХ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ

У статті проаналізовано технічний стан існуючих внутрішньобудинкових систем опалення та визначено основні проблеми великих втрат теплової енергії житловими будинками масової забудови другої половини XX століття. Розглянуто відомі технічні рішення щодо модернізації систем опалення, які сприяють зниженню втрат енергоресурсів та покращенню комфортних умов проживання населення. Запропоновано новий спосіб реконструкції системи опалення багатоповерхового житлового будинку, при якому здійснюється перебудова вертикальних однокотлових систем на двокотлові горизонтальні поквартирні з установкою квартирних лічильників тепла і регулюванням температури в кожній квартирі без зміни джерела теплопостачання. Наведено порівняльний техніко-економічний аналіз трьох варіантів перебудови системи опалення запропонованим способом.

Ключові слова: тепла енергія; огорожувальні конструкції; перебудова; економія; облік тепла; регулювання; споживач.

Рис.: 2. Табл.: 2. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Для будь-якої держави одним із ключових завдань є економія енергоресурсів. Для України це питання набуло особливої актуальності, адже від ефективного споживання енергії залежить її енергетична безпека.

Згідно з [1] споживач теплової енергії – це фізична або юридична особа, яка використовує теплову енергію на підставі договору. Проте з технологічного погляду під споживачем розуміється не лише окремих споживач, а й об'єкти споживання (будівлі, споруди, населені пункти, райони та мікрорайони) [2].

Найменш ефективною ланкою в системі «генерація тепла – теплові мережі – споживач» є споживач (житловий сектор), на який припадає понад 60 % втрат теплової енергії. Зовнішні огорожувальні конструкції є головною причиною надмірних втрат. В Україні більшість багатоквартирних житлових будинків (близько 80 %) належать до «старих» будинків забудови другої половини XX століття, які з моменту будівництва мали низькі показники теплової ізоляції будівельних конструкцій. Теплозахисні вимоги до зовнішніх стін, перекриттів, підвалів, віконних конструкцій, дверей у тодішніх будівельних нормах були в декілька разів нижчими, аніж у сучасних. Нині в таких будинках проживає більшість населення, яке систематично перевитрачає понад 30 % своїх коштів на потреби опалення.

Ще однією причиною є недосконалість конструкцій систем опалення. Усі цегляні та панельні «старі» будинки обладнані однотипними внутрішньобудинковими вертикальними однокотловими системами, які являють собою умовний нагрівальний прилад, що опалює увесь будинок загалом, а не кожен окрему квартиру, розташовану в ньому.

Підключення нагрівальних приладів організоване за паралельно-послідовною схемою. За такого підключення температура теплоносія, що подається до нагрівального приладу, повністю залежить від його місця розташування. При організації верхньої подачі теплоносія чим нижче розташовується прилад, тим нижче була його температура. При організації нижньої подачі теплоносія зниження температури відбувається навпаки: знизу вгору [3].

Крім того, існуюча система опалення володіє двома істотними конструктивними недоліками – її неможливо регулювати та самостійно визначати кількість спожитої теплової енергії однією квартирою.

Постановка проблеми. Термомодернізація будівель, встановлення терморегуляторів на нагрівальних приладах, модернізація устаткування джерел тепла, заміна трубопроводів теплових мереж на попередньо ізольовані труби [4] – розробка та впровадження

цих заходів сприяє удосконаленню роботи системи теплопостачання та дає досить відчутний економічний ефект – зменшуються втрати палива на джерело теплопостачання, а отже, знижується його кінцева вартість для споживача теплової енергії, з'являється потреба для індивідуального обліку споживання теплової енергії.

Однак у «старих» будинках реалізація індивідуалізації неможлива без реконструкції існуючих внутрішньобудинкових вертикальних однокотлових систем опалення. Це потребує нових технічних рішень, що будуть сприяти вирішенню досить складної та багатогранної проблеми – збереженню енергоресурсів житловим сектором.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження бази патентних даних України та проведений аналіз наукових публікацій дозволив виявити технічні рішення, які були спрямовані на зменшення втрат енергоресурсів та покращення комфортних умов проживання населення.

Проаналізовано особливості способу реконструкції системи опалення будівлі [5], у якому монтаж подавального та зворотного стояків здійснюється із зовнішнього боку фасадної стіни з подальшим підключенням нагрівальних приладів (радіаторів) до відповідних трубопроводів та утепленням зовнішніх поверхонь труб теплоізоляційними матеріалами. Застосування такого способу є складним у реалізації у зв'язку з відсутністю запропонованих технічних рішень щодо його практичного впровадження та неефективним розміщенням елементів системи щодо фасаду будівлі.

Не менш відомим є трубопровід рециркуляційної системи, що містить подавальну та зворотну магістралі, об'єднані спільною теплоізоляційною оболонкою [6]. Однак його монтаж є складним і матеріаломістким, супроводжується значними витратами та потребує додаткового обладнання.

Спосіб реконструкції системи водяного опалення багатоповерхового багатоквартирного житлового будинку [7] хоча й дозволяє здійснювати перебудову однокотлової системи опалення у двокотлову, але має обмеження, пов'язані з гідравлічним балансом, складністю монтажу, низькою адаптивністю до сучасних вимог енергоефективності та експлуатації.

У системі центрального опалення [8] радіатори мають нижнє підведення гарячої води та верхній відвід охолодженої, що сприяє узгодженню турбулентних і ламінарних потоків із природною конвекцією, підвищуючи ефективність теплообміну. Однак застосування такої схеми буде ефективним за умови лише використання теплоносія з температурою понад 90–95 °С.

Особливістю роботи [9] є акцент на взаємозв'язок між технічним станом огорожувальних конструкцій будинку та необхідністю модернізації існуючих інженерних комунікацій з установленням лічильників тепла та газу. Таке технічне рішення забезпечує зниження енергоресурсів та продовжує термін експлуатаційної придатності будинку.

У роботі [10] автором проаналізовано причини втрат теплової енергії в існуючих будинках та запропоновано декілька варіантів глибокої термомодернізації, що включають модернізацію системи опалення, утеплення зовнішніх стін та даху, заміну вікон і дверей у місцях загального користування. Такі заходи дадуть змогу скоротити енергоспоживання і одночасно знизити питомі втрати на опалення в кожній будівлі.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на наявність раніше запропонованих технічних рішень та наукових публікацій, присвячених енергоефективності житлового сектору, комплексна реконструкція внутрішньобудинкових систем опалення залишається досить складною та багатогранною проблемою з численними прогалинами. Системний аналіз дозволив виявити низку малодосліджених або недосліджених напрямів, що вимагають подальшого вивчення. Значної уваги потребує проблема налагодження фінансово-організаційного механізму в ланцюгу «споживач–держава–ін-

вестор», який би враховував соціально-економічні умови та підвищив рівень довіри населення до енергоефективних заходів. Недостатньо у вітчизняній науковій літературі висвітлено питання впливу сучасних засобів індивідуального регулювання на динаміку зниження енергоспоживання в умовах реальної експлуатації. На сьогодні є обмежена кількість досліджень, які б розкривали специфіку впровадження енергоефективних технологій та рекомендацій щодо реконструкції систем опалення в морально та фізично застарілому житловому фонді. Таким чином, виявлені аспекти визначають перспективні напрями для подальших наукових досліджень над питаннями енергоефективної модернізації житлового сектору України.

Метою цього дослідження є обґрунтування доцільності удосконалення роботи теплопостачання існуючих житлових будинків шляхом перебудови їхніх внутрішньобудинкових систем опалення.

Виклад основного матеріалу. У містах та населених пунктах України всі багатоповерхові будинки живляться від ТЕЦ, районних, квартальних або місцевих котелень. Останнім часом спостерігається різке скорочення промислової та господарської теплової завантаженості, що призводить до недозавантаженості багатьох джерел теплопостачання, які ще не відпрацювали свій технічний ресурс і є доволі економічними. На відміну від внутрішньобудинкових систем опалення, їхній технічний стан не вимагає термінової реконструкції. Тому з економічного погляду збереження діючих джерел є важливим завданням.

Дослідження проводилися в одному з райцентрів Харківської області. Житлові будинки, що підключені до централізованого теплопостачання, споживають понад 60 % теплової енергії від загальної кількості тепла.

До основних факторів неекономічного споживання теплової енергії належать відсутність можливості регулювання температури та обліку спожитої енергії кожною квартирою [11], наявність на вводах будинків лише загальнобудинкових лічильників тепла, незадовільний технічний стан внутрішньобудинкових систем опалення, відсутність наладки їхніх гідравлічних та теплових режимів та понаднормативні втрати теплоносія. Тому досягнення енергоефективності можливе лише за умови усунення цих факторів.

Перебудова вертикальних однотрубних систем на двотрубні горизонтальні по квартирні з установкою квартирних лічильників тепла й регулюванням температури в кожній квартирі є єдиним шляхом для вирішення цієї проблеми.

Крім того, досвід експлуатації систем теплозабезпечення в сучасних умовах виявив критичну вразливість вертикальних однотрубних систем опалення: навіть часткове їх пошкодження на рівні однієї квартири призводить до тривалого відключення всієї системи з повним зливом теплоносія та залишає десятки мешканців будинку без тепла.

Наукова новизна полягає в запропонованій методиці виконання будівельно-монтажних робіт при реконструкції внутрішньобудинкової системи опалення і на сьогодні є новою та досить актуальною та може бути застосована в процесі відновлення пошкодженої або застарілої інфраструктури в багатоповерхових житлових будинках.

До її основних особливостей належать:

1. Реконструкція здійснюється без зміни діючого джерела теплопостачання. Це дозволяє усунути потребу в установці дорогих індивідуальних теплових пунктів, експлуатація та технічне обслуговування яких вимагає не тільки залучення сторонніх організацій, що спеціалізуються зокрема й на промиванні теплообмінників та ремонті регулювальної арматури, але й високої якості мережевої води. Недотримання цих вимог істотно знижує надійність та тривалість терміну експлуатації теплових пунктів.

2. Монтажні роботи можна здійснювати протягом року без відселення мешканців будинку та довготривалої зупинки загальнобудинкової системи опалення під час проведення робіт в опалювальний період.

3. Реконструкція передбачає одночасну роботу двох систем опалення: «старої» однотрубною вертикальною та «нової» двотрубною горизонтальною поквартирною. Це дозволяє впроваджувати нову систему поетапно.

4. Спосіб монтажу трубопроводів. Він здійснюється із застосуванням пластикових труб, що відповідають всім необхідним технічним характеристикам. Розміщення подавального і зворотного стояків відбувається за межами квартир на сходових клітках як відкритим, так і закритим способом. На рис. 1 зображено фрагмент відкритого способу. Таке технічне рішення дозволяє підтримувати комфортні умови не лише у квартирах, але й у місцях загального користування.



Рис. 1. Фрагмент прокладання подавального та зворотного трубопроводів на сходовій клітці

Джерело: розроблено автором.

Як бачимо, трубопроводи мають естетичний вигляд, надійно теплоізовані та захищені від випадкових пошкоджень та не перешкоджають мешканцям будинку переміщатися по сходах. Через вузли розподільного обліку теплової енергії відбувається підключення гілок горизонтальних двотрубних систем опалення з подальшим прокладанням безпосередньо у квартирі над підлогою зі зміною схеми підключення нагрівального приладу.

Встановлення терморегуляторів, які забезпечують автоматичне підтримання заданого температурного режиму в приміщенні шляхом регулювання обсягу подаваного теплоносія, можливе як на одному, так і на всіх нагрівальних приладах у квартирі.

Наявність автоматичних повітровідвідників (рис. 2) дає мешканцям можливість самостійного заповнення та запуску системи опалення без залучення обслуговуючого персоналу теплопостачальної організації.

У роботі розглянуто три варіанти перебудови систем опалення вищенаведеним способом:

1. Повна заміна існуючих вертикальних однотрубних систем на двотрубною горизонтальні поквартирні з установкою квартирних лічильників тепла й регулюванням температури в кожній квартирі.

2. Часткова заміна (в межах одного під'їзду) існуючих вертикальних однотрубних систем на двотрубною горизонтальні поквартирні з установкою квартирних лічильників тепла і регулюванням температури в кожній квартирі, що включає капремонт та наладку існуючої системи опалення.

3. Капітальний або поточний ремонт систем опалення будинків та їх наладка без реконструкції.



Рис. 2. Фрагмент встановлення квартирного лічильника тепла та повітровідвідника
Джерело: розроблено автором.

Орієнтовна вартість робіт відповідно до варіанта № 1 наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Орієнтовна вартість (тис. грн) робіт відповідно до варіанта № 1

Житлові приміщення різної кімнатності	Прокладка нових труб	Заміна нагрівальних приладів	Установка лічильника тепла в квартирах	Установка відмикаючих кранів	Установка терморегуляторів	Вартість загальнобудівельних робіт	Затрати на перебудову будинкової системи	Загальна вартість робіт
Однокімнатна	4,2	2,2	8,6	0,26	2,48	0,4	5,78	23,92
Двокімнатна	6,8	3,3	8,6	0,4	3,72	0,5	2,93	26,25
Трикімнатна	7,5	4,4	8,6	0,52	4,96	0,6	4,18	30,76
Чотирикімнатна	7,8	5,5	8,6	0,65	6,2	0,7	4,53	33,98

Джерело: розроблено автором.

З табл. 1 бачимо, що за умови проведення перебудови системи за варіантом № 1 орієнтовна розрахункова вартість становитиме 320 538,54 тис. грн, з яких приблизно 60 %, або 192 323,1 тис. грн – це кошти власників квартир.

Орієнтовна вартість робіт відповідно до варіанта № 3 наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Орієнтовна вартість робіт відповідно до варіанта № 3

Житлові приміщення різної кімнатності	Заміна труб на нові	Заміна нагрівальних приладів	Установка відмикаючих кранів	Вартість загальнобудівельних робіт	Затрати на ремонт будинкової системи	Загальна вартість робіт
Однокімнатна	4,2	2,2	0,26	0,4	5,78	12,84
Двокімнатна	6,8	3,3	0,4	0,5	2,93	13,93
Трикімнатна	7,5	4,4	0,52	0,6	4,18	17,2
Чотирикімнатна	7,8	5,5	0,65	0,7	4,53	19,8

Джерело: розроблено автором.

Згідно з даними, наведеними в табл. 2, при реалізації варіанта № 3 орієнтовна розрахункова вартість становитиме 177 884,58 тис. грн. За цим варіантом фінансування робіт власниками квартир не передбачено.

Порівняльний аналіз наведених варіантів свідчить, що обсяги робіт у варіантах № 1 та № 3 відрізняються лише наявністю або відсутністю встановлення квартирних лічильників тепла. Інші елементи робіт залишаються практично ідентичними.

Отже, вартість реалізації варіанта № 2 буде відрізнятися лише часткою квартир, у яких буде відбуватися перебудова на двотрубну систему з квартирними лічильниками тепла, і коливатиметься в межах витрат, необхідних для реалізації варіантів № 1 або № 3. У зв'язку з цим економічне порівняння варіанта № 2 з іншими є недоцільним.

Виходячи з вище згаданого, найбільш прийнятним варіантом перебудови системи опалення буде варіант № 1 – повна заміна існуючих вертикальних однокотлових систем на двотрубні горизонтальні поквартирні з установкою квартирних лічильників тепла й регулюванням температури в кожній квартирі.

Висновки. В Україні більшість багатоквартирних житлових будинків (близько 80 %) з моменту будівництва мають низькі показники теплової ізоляції будівельних конструкцій та недосконалі системи опалення, які не дають можливості мешканцям можливості для економічного споживання теплової енергії. Це призводить до надмірних витрат теплової енергії.

Розглянутий спосіб реконструкції системи опалення має низку важливих переваг, серед яких слід відзначити можливість індивідуального регулювання споживання теплової енергії кожною квартирою, збереження належного рівня комфортного проживання у квартирах, підвищення стимулу мешканців до реалізації заходів з термомодернізації огорожувальних конструкцій, багаторазового скорочення витрат на технічне обслуговування та ремонт системи опалення, підвищення її надійності, зменшення витрат теплової енергії майже в чотири рази.

Таким чином, досягнення високих показників енергозбереження можливе лише за умови виконання комплексної термомодернізації житлових будинків та повної заміни існуючих внутрішньобудинкових вертикальних однокотлових систем опалення.

Список використаних джерел

1. Про теплопостачання, Закон України № 2633-IV (2024) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2633-15#Text>.
2. Державні будівельні норми України (2008). *Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі* (ДБН В.2.5-39:2008). <https://document.vobu.ua/wp-content/uploads/DBN/96.1.-DBN-V.2.5-392008.-Inzhenerne-obladnannya-budinkiv-i.pdf>.
3. Тарадай, О. М. (2025). *Теплозабезпечення*. ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. <https://eprints.kname.edu.ua/68139/>.
4. Taradai, O., Bugai, V., Gvozdetskyi, O., & Diachenko, S. (2022). Economic dependence of the consumer on the feasibility to regulate the heat supply system. *Промислове машинобудування, цивільне будівництво*, 2(59), 57–62. <https://doi.org/10.26906/znp.2022.59.2862>.
5. Чупило О.В. (2005). *Спосіб реконструкції системи опалення будинку*. (Патент України, № 11514). Державна служба інтелектуальної власності України. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/293808>.
6. Мірошніченко, І.О. (2003). *Трубопровід рециркуляційної системи*. (Патент України, № 60956). Державна служба інтелектуальної власності України. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/377363>.
7. Дерменжи, П.М. (2015). *Спосіб реконструкції системи водяного опалення багатоповислового багатоквартирного житлового будинку* (патент України, № 102484). Державна служба інтелектуальної власності України. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/859935>.
8. Валюх Я. В. (2004). *Система центрального опалення*. (Патент України, № 66530). Державна служба інтелектуальної власності України. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/377336/>.

9. Гриневич, Е., Гаєвой, Ю., Вяткін, В., & Каржинерова, Т. (2021). Проблеми реконструкції житлових будинків, що побудовані у 60-70 рр. XX сторіччя у місті Харкові. *Науковий вісник будівництва*, 2 (104), 140–147. <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/84/84>.

10. Różycki, K. (2018). Deep thermomodernization of three residential buildings in Kryvyi Rih, Ukraine. *E3S Web of Conferences* 49, 00088. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184900088>.

11. Taradai, O., Bugai, V., Gvozdetskyi, O., & Diachenko, S. (2022). The possibility of combined regulation of heat supply systems as the basis of energy efficiency. *Промислове машинобудування, цивільне будівництво*, 1(58), 74–81. <https://doi.org/10.26906/znп.2022.58.2861>.

References

1. Pro teplopostachannia [On Heat Supply], Law of Ukraine No. 2633-IV (2024) (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2633-15#Tex>.

2. Inzhenerne obladnannia budynkiv i sporud. Zovnishni merezhi ta sporudy. Teplovi merezhi [Engineering equipment of buildings and structures. External networks and structures. Heating networks]. (2008). *DBN V.2.5-39:2008 from July 01, 2008*. State Budget Norms of Ukraine <https://document.vobu.ua/wp-content/uploads/DBN/96.1.-DBN-V.2.5-392008.-Inzhenerne-obladnannya-budinkiv-i.pdf>.

3. Taradai, O. M. (2025). Teplozabezpechennia [Heat supply]. *Kharkiv: Kharkivskyi natsionalnyi universytet miskoho hospodarstva imeni O. M. Beketova – O. M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy*. <https://eprints.kname.edu.ua/68139/>.

4. Taradai, O., Bugai, V., Gvozdetskyi, O., & Diachenko, S. (2022). Ekonomichna zalezhnist spozhyvacha vid mozhlyvosti rehuliuвання systemy teplopostachannia [Economic dependence of the consumer on the feasibility to regulate the heat supply system]. *Promyslove mashynobuduvannia, tsyvilne budivnytstvo – Industrial engineering, civil engineering*, 2(59), 57–62. <https://journals.nupp.edu.ua/znп/article/view/2862>.

5. Chupylo, O. V. (2005). Sposib rekonstruktsii systemy opalennia budynku [Method for reconstructing the building's heating system]. (Ukrainian patent, № 11514). *Derzhavna sluzhba intelektualnoi vlasnosti Ukrainy – The State Intellectual Property Service of Ukraine*. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/293808>.

6. Miroshnichenko, I. O. (2003). Truboprovod retsyrkuliatyinoi systemy [Pipeline of the recirculation system]. (Ukrainian patent, № 60956). *Derzhavna sluzhba intelektualnoi vlasnosti Ukrainy - The State Intellectual Property Service of Ukraine*. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/377363>.

7. Dermenzhy, P. M. (2015). Sposib rekonstruktsii systemy vodianoho opalennia bahatopoverkhovoho bahatokvartyrnogo zhytlovoho budynku [Method for reconstructing the water-based heating system of a multi-story multi-apartment residential building]. (Ukrainian patent, № 102484). *Derzhavna sluzhba intelektualnoi vlasnosti Ukrainy - The State Intellectual Property Service of Ukraine*. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/859935/>.

8. Valiukh, Ya. V. (2004). Systema tsentralnogo opalennia [Central heating system]. (Ukrainian patent, № 66530). *Derzhavna sluzhba intelektualnoi vlasnosti Ukrainy - The State Intellectual Property Service of Ukraine*. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/377336/>.

9. Hrynevych, E., Haievoi, Yu., Viatkin, V., & Karzhynierova, T. (2021). Problemy rekonstruktsii zhytlovykh budynkiv, shcho pobudovani u 60-70 rr. XX storichchia u misti Kharkovi [The problems of reconstruction of residential buildings built in the 60s and 70s of the XX century in the city of Kharkiv]. *Naukovyi visnyk budivnytstva – Scientific Bulletin of Construction*, 2(104), 140–147. <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/84/84>.

10. Różycki, K. (2018). Deep thermomodernization of three residential buildings in Kryvyi Rih, Ukraine. *E3S Web of Conferences* 49, 00088. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184900088>.

11. Taradai, O., Bugai, V., Gvozdetskyi, O., & Diachenko, S. (2022). Mozhlyvist kombinovanoho rehuliuвання systemy teplopostachannia yak osnova enerhoefektyvnosti [The possibility of combined regulation of heat supply systems as the basis of energy efficiency]. *Promyslove mashynobuduvannia, tsyvilne budivnytstvo – Industrial engineering, civil engineering*, 1(58), 74–81. <https://journals.nupp.edu.ua/znп/article/view/2861>.

Отримано 29.05.2025

Serhii Diachenko

Postgraduate Student, Department of Heat and Gas Supply, Ventilation
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)
E-mail: dyachenkov460@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0187-0684>.

RECONSTRUCTION OF THE HEATING SYSTEM AS AN ELEMENT OF THERMAL MODERNIZATION OF OLD MULTI-STORY RESIDENTIAL BUILDINGS

The least efficient link in the "heat generation – heat networks – consumer" chain is the consumer, namely the residential sector, where external building envelopes and outdated heating systems are the primary contributors to excessive heat losses.

The implementation of apartment-level metering and individual temperature control is not feasible without the reconstruction of existing vertical one-pipe heating systems. New technical solutions are required to preserve energy resources.

The system analysis revealed a number of underexplored areas that require further research. Therefore, the comprehensive reconstruction of in-building heating systems remains a complex and multifaceted issue, characterized by numerous knowledge gaps.

The purpose of this study was to substantiate feasibility of improving the efficiency of heat supply in existing residential buildings by reconstructing their heating systems.

The study examines a new method for reconstructing the heating system of the multi-story residential building. Its implementation demonstrated that this approach is technically efficient, economically justified, and energetically feasible.

In addition, scientific novelty lies in the proposed methodology for carrying out construction and installation works during reconstruction of heating systems, which can be applied in restoring damaged or outdated infrastructure in multi-story residential buildings.

The comparative techno-economic analysis was conducted, revealing that complete replacement of existing vertical one-pipe systems with two-pipe horizontal apartment-based systems, including installation of individual heat meters and temperature control in each apartment is the most appropriate solution.

Achieving high levels of energy savings is possible only if comprehensive thermal modernization of residential buildings is carried out in parallel with complete replacement of existing vertical one-pipe heating systems.

Keywords: thermal energy; building envelopes; reconstruction; energy saving; heat metering; regulation; consumer.

Fig.: 2. Table: 2. References: 11.

Ярослав Володимирович Тарасович¹, Володимир Ігорович Нікулішин²

¹аспірант кафедри картографії та геопросторового моделювання
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: yaroslav.v.tarasovych@lpnu.ua

²кандидат технічних наук, доцент кафедри картографії та геопросторового моделювання
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: volodymyr.i.nikulishyn@lpnu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0027-3511>

Scopus Author ID: 56148982600

ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ДАНИХ ГІДРОЛОГІЧНИХ ПОСТІВ У ЛЬВІВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

У статті представлено підхід до збору, опрацювання та візуалізації даних про рівень води у річках Львівської області на основі геоінформаційних технологій. Розроблено вебзастосунок з використанням програмного забезпечення ArcGIS, який забезпечує інтерактивне відображення гідрологічних постів та значень рівня води у вигляді графіків і таблиць за обраний часовий період. Джерелом даних слугують спостереження, надані Басейновим управлінням водних ресурсів річок Західного Бугу та Сяну. Запропоноване рішення сприяє покращенню гідрологічного моніторингу, підтримці прийняття управлінських рішень щодо попередження паводків і реагування на надзвичайні ситуації, пов'язані з водними ресурсами.

Ключові слова: рівень води; гідрологічні пости; інтерактивна вебкарта; ArcGIS; гідрологічний ризик; візуалізація даних; Львівська область.

Табл.: 3. Рис.: 5. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Кліматичні зміни спричиняють значну нестабільність у формуванні та розподілі водних ресурсів в Україні. Згідно з результатами дослідження [1], рівень водності протягом року може зазнавати істотних коливань. Для Львівської області це означає як загрозу дефіциту води в сільських громадах через очікуване зниження стоку під час осінньої межени, так і підвищений ризик виникнення катастрофічних паводків, особливо на гірських водотоках. Такі явища можуть призвести до значних економічних збитків та загроз для життя і здоров'я населення.

У цьому контексті особливої важливості набуває забезпечення системного моніторингу рівня води. Це дозволяє своєчасно виявляти критичні ситуації, запроваджувати превентивні заходи, підвищувати надійність водопостачання, а також ефективно управляти паводковими ризиками. Сучасні системи моніторингу відіграють ключову роль у прогнозуванні гідрологічних подій та впровадженні механізмів раннього попередження.

Оперативне отримання та аналіз актуальних даних, їх візуалізація на основі геоінформаційних технологій створює передумови для ухвалення обґрунтованих управлінських рішень як у короткостроковій перспективі (реагування на надзвичайні ситуації), так і в довгостроковій (планування адаптаційних заходів до змін клімату). Саме тому розробка та впровадження регіонально орієнтованих систем моніторингу рівня води є надзвичайно актуальним науковим та практичним завданням.

Постановка проблеми. Проблема моніторингу рівнів води у водотоках Львівської області зумовлена потребою в оперативному виявленні гідрологічних загроз та оптимізації процесів управління водними ресурсами. Враховуючи зростання кліматичних викликів та ймовірність екстремальних гідрометеорологічних подій, особливої актуальності набуває розробка сучасних інструментів просторового аналізу, інтеграції даних із різних джерел та їх візуалізації у форматі, придатному для ухвалення рішень.

Представлена робота є початковим етапом реалізації комплексного дослідження, орієнтованого на створення методологічної основи для моделювання зон підтоплення та оцінювання супутніх ризиків. На поточному етапі передбачалося здійснення огляду наявних джерел гідрологічних даних, інструментальних засобів опрацювання інформації та технологій її просторової візуалізації.

Згідно з поставленою метою було сформульовано та виконано такі науково-технічні завдання:

1. **Попереднє опрацювання вхідних даних:** було здійснено опрацювання вхідних даних, отриманих від Басейнового управління водних ресурсів річок Західного Бугу та Сяну у форматі XLSX, із застосуванням спеціалізованої утиліти, реалізованої мовою Java. На наступному етапі дані було конвертовано у формат CSV з метою забезпечення можливості їх подальшого аналізу та інтеграції.

2. **Формування геопросторової бази даних:** на основі попередньо опрацьованих даних було створено файлову геопросторову базу даних(формат GDB) у середовищі ArcGIS Pro, яка забезпечує структуроване зберігання, опрацювання та подальше використання просторової інформації про гідрологічні пости.

3. **Реалізація картографічної візуалізації:** у середовищах ArcGIS Pro та ArcGIS Online було реалізовано інтерактивну вебкарту з відображенням місць розташування гідрологічних постів. Було забезпечено функціональність перегляду детальної атрибутивної інформації (географічні координати, назва водотоку, наявність виходу на заплаву, переливу через дамбу, підтоплення об'єктів інфраструктури тощо) шляхом взаємодії користувача зі спливаючими інформаційними вікнами.

4. **Створення інтерактивної панелі моніторингу:** розроблено функціональну панель моніторингу, що поєднує графічне та табличне представлення даних про рівень води в часовому розрізі. Було здійснено інтеграцію зазначених візуальних компонентів із геопросторовою базою даних для забезпечення актуальності та динамічного оновлення інформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кліматичні зміни є одним із ключових чинників, що впливають на водні ресурси в Україні. Згідно з дослідженням [1], спостерігається тенденція до зменшення річного об'єму опадів, зменшення висоти снігового покриву та перерозподілу стоку протягом року. Зокрема, для західних регіонів України характерні менш виражені весняні повені та підвищена ймовірність дефіциту водних ресурсів у літній період.

На прикладі Волинської області, як показано у роботі [2], фіксуються зниження рівнів зволоження та водності річок через м'які зими з відлигами, зменшення обсягів снігу та нерівномірність літніх опадів. Ці зміни зумовлюють необхідність постійного моніторингу гідрологічної ситуації, зокрема рівнів води у річках.

Останні дослідження затоплень і моніторингу рівня води в басейні річки Уж на прикладі Закарпатської області демонструють прогрес у використанні сучасних технологій та європейських стандартів для управління паводковими ризиками [3]. Сучасні геопросторові дані та моделювання покращили попередження. Проєкт FloodUZH створив карти загроз і ризиків для Ужа за новими методиками та План управління ризиками для Ужгорода, використовуючи цифрове знімання з літальних апаратів та ГІС. Дослідження FloodUZH є прикладом застосування новітніх технологій для управління паводковими ризиками в регіоні.

Прикладом дослідження в галузі запобігання шкідливій дії води та ліквідації її наслідків є також впровадження автоматизованої інформаційно-вимірювальної системи (AIBC) «Тиса»[4] в басейні річки Тиса, що в Закарпатті. Цей регіон, з огляду на свої територіальні особливості, є особливо вразливим до паводків та інших негативних наслідків дії води. Функціональна структура AIBC «Тиса», що включає підсистеми прогнозування паводків, контролю якості води, прогнозування зон затоплення та розробки оперативних планів, демонструє комплексний підхід до вирішення проблеми. Впровадження такої системи є значним кроком у напрямку підвищення безпеки населення та сталого розвитку регіону.

Окрема увага приділяється інструментальним методам збору гідрологічних даних. Зокрема, у статті [5] представлено систему дистанційного моніторингу рівня води на основі GSM-зв'язку, реалізовану для річки Сакар'я (Туреччина). Аналогічно, дослідження [6] описує IoT-платформу моніторингу на базі ультразвукових датчиків, яка забезпечує передачу даних через Thinger.IO та Telegram-бот для раннього сповіщення про паводкову загрозу.

Усі ці підходи демонструють ефективність поєднання автономного енергозабезпечення (зокрема, сонячних панелей) із бездротовими технологіями для збору гідрологічної інформації в реальному часі.

На національному рівні прикладом реалізації систем моніторингу є портал [7], який надає доступ до оперативної інформації про рівень води на автоматизованих гідропостах. Платформа дозволяє переглядати часові ряди вимірювань, графіки та таблиці змін рівня води, проте наразі охоплює лише автоматичні пости, що обмежує повноту відображення гідрологічної ситуації в регіонах із рейковими [8] постами.

Таким чином, аналіз сучасних підходів до моніторингу рівня води виявляє значні відмінності між українськими та міжнародними рішеннями як у технологічному, так і у функціональному вимірі. Міжнародні системи демонструють вищу адаптивність, інтеграційність і автономність, що слугує орієнтиром для модернізації національних підходів.

Для порівняльного аналізу основних характеристик систем узагальнено їх ключові параметри (табл. 1).

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика українських та міжнародних систем збору й візуалізації гідрологічних даних

Ознака	Українські системи	Міжнародні приклади (MDPI 2023, RG 2024)
Типи постів	Автоматичні (обмежене покриття); рейкові – не інтегровані	Автоматичні; IoT-платформи з сенсорами різних типів (ультразвук, дощ тощо)
Джерело живлення	Переважно мережеве	Автономне живлення: сонячні панелі, батареї
Передача даних	Власна інфраструктура, періодичне оновлення	GSM, Wi-Fi, LoRa, платформи IoT (наприклад, Thinger.IO, Telegram-боти)
Часова розрізненість	Погодинна/добова	Майже реальний час або з інтервалом у декілька хвилин
Методи візуалізації	Вебінтерфейс з картою, таблицями та графіками. Карти загроз та ризику затоплення	Вебінтерфейс, мобільні сповіщення, інтеграція з платформами управління ризиками
Гнучкість масштабування	Обмежена: потребує модернізації інфраструктури	Висока: модульні рішення для різних регіонів
Адаптація до регіональних умов	Обмежена (в основному централізована подача даних)	Можливість локального налаштування відповідно до специфіки річки/басейну
Можливість інтеграції з іншими джерелами	Низька (рейкові пости не охоплюються)	Висока (гнучка архітектура IoT, підтримка різних датчиків)

Джерело: розроблено авторами.

Як видно з табл. 1, міжнародні рішення демонструють вищу технічну гнучкість завдяки використанню автономного живлення, універсальних IoT-платформ та можливості інтеграції різних типів сенсорів. Це дозволяє ефективно адаптувати системи до регіональних умов, забезпечуючи стабільний збір і передачу даних навіть за відсутності інженерної інфраструктури. Такий підхід може бути корисним для модернізації українських гідрологічних систем, особливо в районах, де домінують рейкові пости або обмежені ресурси.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри широке впровадження геоінформаційних систем (ГІС) у сферу гідрологічного моніторингу, низка важливих аспектів залишається недостатньо дослідженою. Зокрема, актуальним є питання інтеграції даних із різних типів гідрологічних постів, зокрема автоматизованих та рейкових, що дозволило б суттєво розширити обсяг і глибину гідрологічної інформації. Відомі приклади реалізації, зокрема національний портал [8], переважно орієнтовані на автоматизовані пости та не враховують потенціал використання даних із рейкових постів.

Ще одним недостатньо опрацьованим напрямом є створення адаптивних систем моніторингу, здатних реагувати на динамічні зміни гідрологічних умов та забезпечувати ефективне функціонування в різних природно-кліматичних регіонах.

У межах цього дослідження передбачається розроблення підходу до опрацювання та візуалізації даних про рівень води з різномірних джерел. Запропонована система передбачає виведення інформації на інтерактивну вебкарту з відображенням гідрологічних постів, а також представлення показників у вигляді графіків і таблиць, що дає змогу здійснювати комплексний аналіз, виявляти просторово-часові закономірності та приймати обґрунтовані управлінські рішення.

Особливістю дослідження є його територіальна спрямованість на Львівську область, зокрема басейни річок Дністер, Західний Буг, Сян, Стир тощо. Такий регіональний фокус дозволяє врахувати специфіку місцевих гідрологічних умов і розробити адаптовані стратегії управління водними ресурсами.

Метою дослідження є розроблення та впровадження інтерактивного вебзастосунку на основі ArcGIS для візуалізації та аналізу динаміки рівня води в річках Львівської області. Розроблений інструмент призначений для відображення розташування гідрологічних постів, надання доступу до інформації про їхній поточний стан та аналізу часових рядів гідрологічних даних. Особливістю запропонованого підходу є інтеграція та візуалізація даних як з автоматизованих, так і з рейкових постів.

Виклад основного матеріалу. На основі поставлених завдань було реалізовано геоінформаційний підхід до збору та візуалізації даних гідрологічних постів у межах Львівської області з використанням інструментів ArcGIS. Основна увага була зосереджена на створенні структурованого середовища для інтеграції, просторового представлення та аналітичного опрацювання даних про рівень води, отриманих як з автоматизованих, так і з рейкових постів. Загальна структура реалізованого підходу подана на рис. 1.

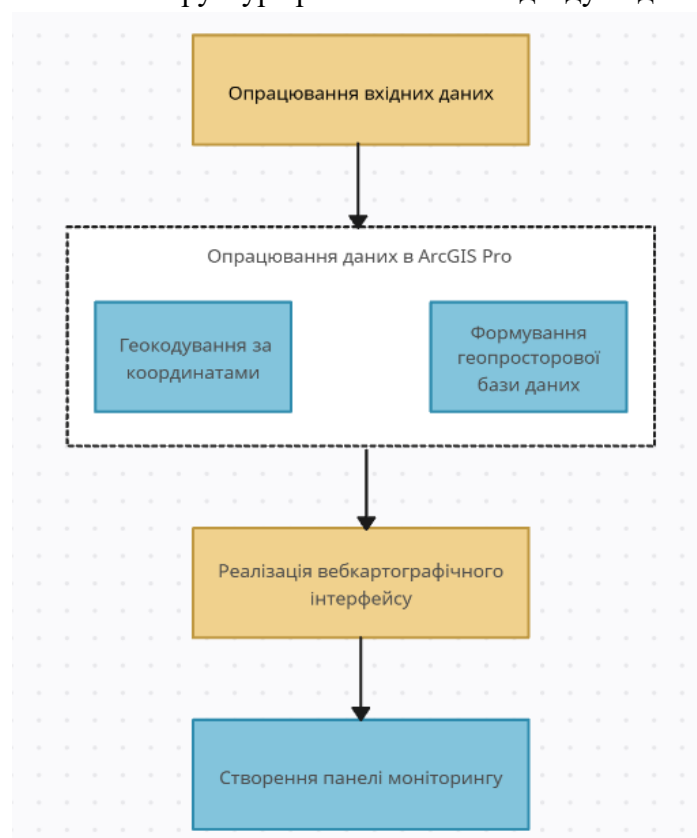


Рис. 1. Структурна схема етапів реалізації геоінформаційного підходу до візуалізації даних гідрологічних постів.

Джерело: розроблено авторами.

1. Опрацювання вхідних даних.

На початковому етапі було проведено опрацювання гідрологічних даних, отриманих від Басейнового управління водних ресурсів річок Західного Бугу та Сяну у форматі електронних таблиць (XLSX). Вихідний файл містив щоденні спостереження за рівнем води на гідрологічних постах Львівської та частково Волинської областей за 2024 рік, а також супровідну інформацію про характеристики кожного поста.

З метою забезпечення подальшого опрацювання та сумісності з геоінформаційним середовищем було розроблено спеціалізовану утиліту мовою програмування Java, яка автоматизувала процес трансформації вхідних даних у формат CSV. У межах цього процесу здійснювалося: стандартизація заголовків стовпців, приведення форматів дат до єдиного ISO-формату, усунення дублікатів та записів із некоректними або відсутніми значеннями.

У результаті опрацювання було сформовано два окремі набори даних:

- **таблиця спостережень за рівнем води**, що містить щоденні значення, дату фіксації, ідентифікатор поста та унікальний код запису;
- **таблиця атрибутивної інформації про пости**, яка включає дані про розташування, гідрографічну належність, адміністративну прив'язку, координати та фіксацію ризиків (вихід на заплаву, перелив через дамбу, затоплення об'єктів).

У результаті опрацювання сформовано два окремі набори даних, структура яких подана в табл. 2 та 3 відповідно.

Таблиця 2 – Структура файлу з щоденними спостереженнями рівня води

Назва поля	Опис	Тип даних
ID	Унікальний ідентифікатор запису спостереження	Ціле число
POST ID	Ідентифікатор гідрологічного поста	Ціле число
Дата	Дата фіксації рівня води	Дата
Рівень води	Виміряне значення рівня води, см	Десяткове число

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 3 – Структура файлу з атрибутивною інформацією про пости

Назва поля	Опис	Тип даних
ID	Унікальний ідентифікатор гідрологічного поста	Ціле число
Тип населеного пункту	Класифікація населеного пункту (місто, село тощо)	Текст
Назва населеного пункту	Назва населеного пункту	Текст
Район	Назва адміністративного району	Текст
Річка	Назва річки, на якій розташовано пост	Текст
Вихід на заплаву	Критичний рівень води для виходу на заплаву	Ціле число
Перелив через дамбу	Критичний рівень води для переливу через дамбу	Ціле число
Затоплення об'єкта	Критичний рівень води для затоплення інфраструктурного об'єкта	Ціле число
Геометрія	Геопросторове розташування гідрологічного поста	Point

Джерело: розроблено авторами.

Отримані дані було уніфіковано за структурою та підготовлено до подальшої інтеграції у геопросторову базу даних, що використовувалася в середовищі ArcGIS Pro.

2.1 Геокодування за координатами

Після завершення попереднього опрацювання даних здійснювався етап геокодування гідрологічних постів на основі наданих координат (широти та довготи), що містилися у таблиці атрибутивної інформації. Для цього було використано функціональні можливості програмного забезпечення ArcGIS Pro, яке забезпечує точне позиціонування об'єктів у просторі за географічними координатами у проєкції WGS 84.

У процесі геокодування кожен гідрологічний пост було трансформовано в точковий об'єкт геометричного типу Point, що репрезентує його просторове розташування на карті. На основі згенерованого геометричного представлення було створено окремий геопросторовий шар (feature class), у якому кожна точка містить відповідний набір атрибутів:

назву поста, назву населеного пункту, адміністративний район, назву річки, тип населеного пункту, координати, а також зафіксовані характеристики гідрологічної небезпеки (вихід на заплаву, перелив через дамбу, затоплення об'єкта).

Отриманий шар став основою для подальшої побудови геопросторової бази даних, а також для формування картографічного представлення досліджуваної гідрологічної інформації у вебзастосунку.

2.2 Формування геопросторової бази даних

Для забезпечення централізованого зберігання та подальшого опрацювання просторових і табличних даних було створено нову файлову геопросторову базу даних (File Geodatabase, GDB) у середовищі ArcGIS Pro. Формат GDB є нативним для екосистеми ArcGIS та дозволяє зберігати великі обсяги структурованих даних з можливістю їхньої інтеграції, візуалізації та аналізу.

На першому етапі обидва попередньо підготовлені CSV-файли — таблиця атрибутивної інформації про гідрологічні пости та таблиця зі щоденними спостереженнями за рівнем води — були імпортовані до геобазиданих як окремі непов'язані таблиці.

Таблицю з даними про гідрологічні пости було перетворено на просторовий шар (feature class) шляхом призначення координатних полів X (довгота) та Y (широта) для кожного запису. Таким чином, кожен пост було відображено у вигляді точкового геометричного об'єкта з відповідним набором атрибутів, зокрема: назвою річки, адміністративною належністю, типом населеного пункту, категорією поста (автоматизований або рейковий), а також ознаками ризику (вихід на заплаву, перелив через дамбу, затоплення об'єкта).

З метою забезпечення логічного зв'язку між просторовими об'єктами та часовими рядами спостережень було створено відношення (relationship class) між двома таблицями. Зв'язок реалізовано за допомогою ключових полів ID (у таблиці постів) та POST_ID (у таблиці спостережень). Тип зв'язку визначено як «один до багатьох» (1:M), що дозволяє кожному гідрологічному посту відповідати множині записів про рівень води, що фіксувалися в різні дні.

Після встановлення логічного зв'язку обидві таблиці — просторовий шар постів та таблиця спостережень — були додані до поточного картографічного проєкту в середовищі ArcGIS Pro. Це дало змогу здійснювати спільну візуалізацію, тематичне групування та фільтрацію даних без втрати зв'язків між просторовими й табличними сутностями.

Для наочного відображення логічної структури побудованої геопросторової бази даних було створено UML-діаграму, що ілюструє сутності, їхні атрибути та взаємозв'язки між таблицями (рис. 2).

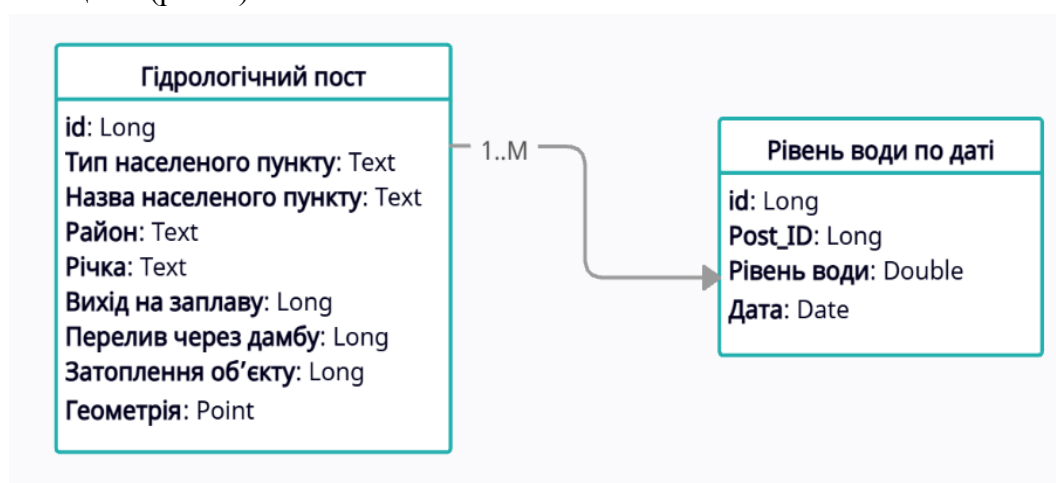


Рис. 2. UML-діаграма логічної структури геопросторової бази даних
Джерело: розроблено авторами.

На завершальному етапі отриманий картографічний проєкт, що включав пов'язані дані про гідрологічні пости та відповідні їм часові ряди рівнів води, було опубліковано на платформі ArcGIS Online. Це забезпечило інтеграцію даних у вебзастосунок, їхню доступність для інтерактивного перегляду та подальшого використання в рамках розробленої панелі візуалізації.

3. Реалізація вебкартографічного інтерфейсу

Наступним етапом реалізації стало створення інтерактивного вебкартографічного інтерфейсу для візуалізації просторових даних про гідрологічні пости. У середовищі ArcGIS Pro було згенеровано композицію карти з використанням просторового шару, отриманого шляхом геокодування, та пов'язаної з ним таблиці спостережень за рівнем води. Після налаштування символів, масштабування та атрибутивного наповнення, карта була опублікована на платформі ArcGIS Online у вигляді вебкарти.

У процесі публікації було забезпечено інтерактивну функціональність карти. Користувач отримує можливість перегляду атрибутивної інформації про кожен гідрологічний пост через спеціально налаштовані спливаючі вікна. Вміст цих вікон формується динамічно на основі даних, отриманих із пов'язаної геопросторової бази, і містить такі відомості, як: назва поста, назва річки, тип населеного пункту, значення виходу на заплаву, ознаки ризиків тощо (рис. 3).

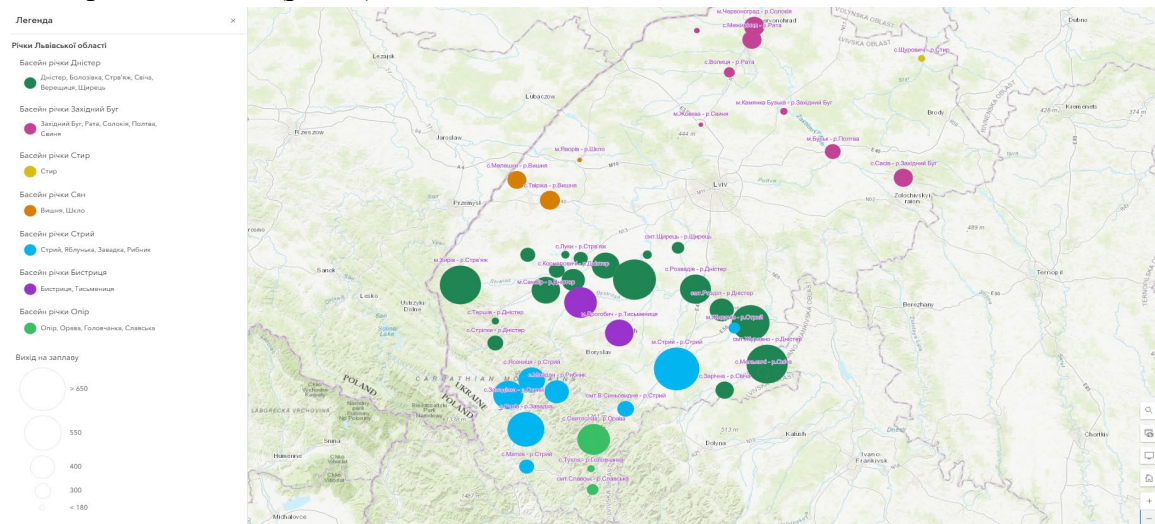


Рис. 3. Інтерфейс опублікованої вебкарти в ArcGIS Online

Джерело: розроблено авторами.

Для покращення зручності користування та забезпечення гнучкої роботи з даними було реалізовано фільтри за критеріями, зокрема — за типом поста (автоматизований/рейковий) та часовими інтервалами. Таке фільтрування дозволяє сконцентрувати увагу на конкретних просторових чи часових аспектах гідрологічної ситуації.

З метою візуального структурування об'єктів на карті було створено легенду. У ній кожен гідрологічний пост було позначено символом відповідно до басейну річки, до якої він належить. Для кращої візуальної диференціації басейни було згруповано та закодовано кольором, що дозволяє швидко орієнтуватися у просторовій структурі гідромережі.

Крім кольорового поділу, у вебінтерфейсі було реалізовано застосування способу значків для відображення ступеня потенційного ризику затоплення. Зокрема, розмір символів (точок), що позначають гідрологічні пости, було масштабовано пропорційно до значення атрибута «вихід на заплаву». Посты з більшими значеннями відображаються більшими за розміром, що вказує на вищу гідрологічну небезпеку. Такий підхід дозволяє відобразити інтенсивність явища без необхідності числового підпису кожної точки, зберігаючи чистоту візуального середовища.

Для полегшення використання карти кожен пост супроводжується підписом з його назвою, розміщеним безпосередньо над точкою. Це дозволяє користувачеві швидко ідентифікувати об'єкт без додаткової взаємодії з інтерфейсом (рис. 4).

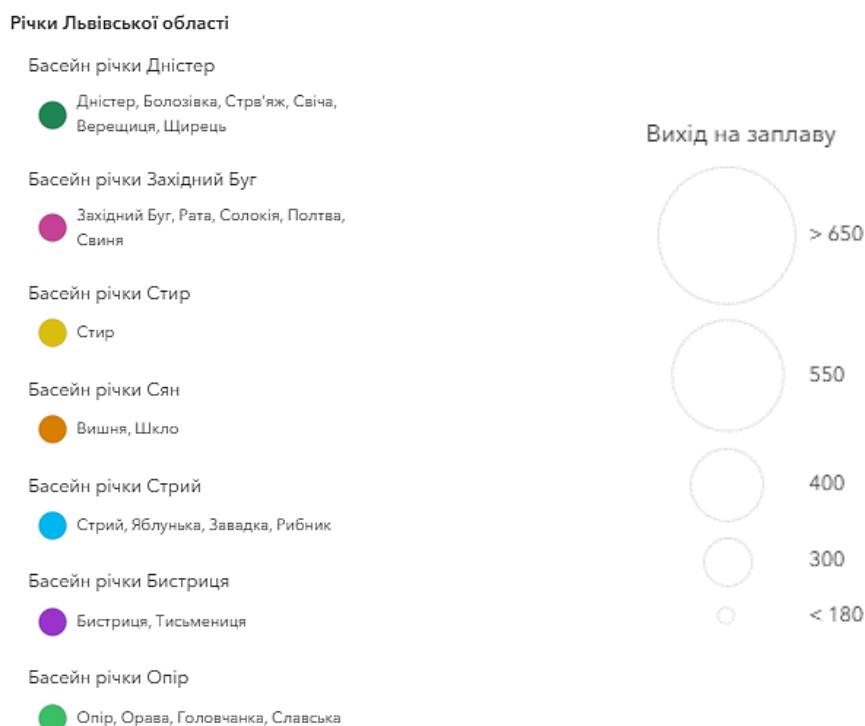


Рис. 4. Легенда опублікованої вебкарти в ArcGIS Online

Джерело: розроблено авторами.

Після завершення налаштувань в ArcGIS Online вебкарта була готова до подальшої інтеграції в інформаційно-аналітичну панель та використання кінцевими користувачами для перегляду, аналізу та прийняття управлінських рішень у сфері гідрологічної безпеки.

4. Створення інтерактивної панелі моніторингу

На основі опублікованої вебкарти у середовищі ArcGIS Online було реалізовано інтерактивну панель моніторингу (Dashboard), яка забезпечує комплексне представлення просторових і часових даних про рівень води на гідрологічних постах Львівської області. Використання вебпанелі дозволяє поєднати функціональність просторової візуалізації з можливістю оперативного аналітичного огляду гідрологічної інформації у зручному для користувача форматі.

Конфігурація панелі здійснювалася шляхом інтеграції опублікованої вебкарти з табличними даними часових рядів рівня води, що були попередньо структуровані у геопросторовій базі даних. Завдяки реалізованим у середовищі ArcGIS Pro зв'язкам типу «один до багатьох» між просторовим шаром постів та таблицею спостережень, було забезпечено автоматизовану синхронізацію між вибором об'єкта на карті та відповідним відображенням графіків і таблиць у панелі.

До складу інформаційно-аналітичної панелі увійшли два ключові компоненти:

- **Динамічний графік (Time Series Chart)** — візуалізує зміну рівня води в часі для обраного гідрологічного поста. Це дозволяє виявляти сезонні тенденції, аномальні коливання, гідрологічні екстремуми тощо.

• **Аналітична таблиця (Details Table)** — відображає повний перелік значень рівня води для вибраного поста з датами фіксації. Така таблиця забезпечує деталізований числовий огляд, зручний для ручного перегляду, перевірки та подальшого експорту.

У процесі налаштування було реалізовано повну взаємодію між просторовим та табличним елементами панелі. При натисканні на гідрологічний пост на карті автоматично оновлювалися як графік, так і таблиця відповідно до обраного об'єкта. Такий механізм фільтрації сприяв підвищенню інтуїтивності взаємодії користувача з панеллю (рис. 5).

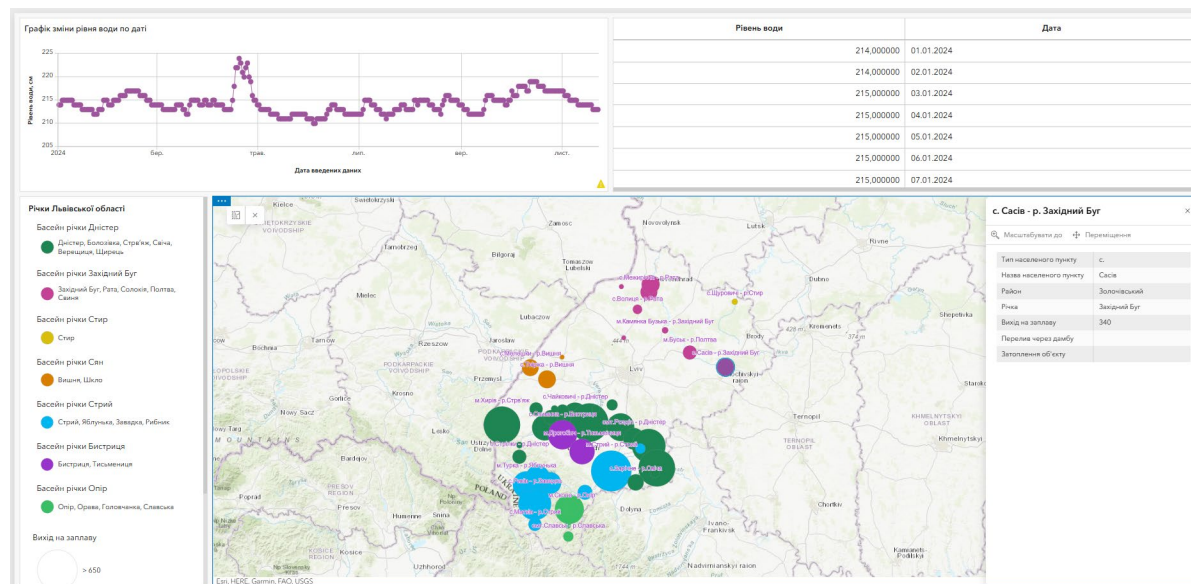


Рис. 5. Інтерфейс інтерактивної панелі моніторингу гідрологічних постів у середовищі ArcGIS Online

Джерело: розроблено авторами.

Результатом є створення інтерактивного інформаційного середовища, яке забезпечує комплексну підтримку ухвалення рішень щодо гідрологічної ситуації в регіоні на основі реальних вимірювань. Така система дозволяє оперативно виявляти критичні зміни рівнів води, відстежувати динаміку гідрологічних процесів і оцінювати ризики на локальному рівні.

Висновки. У межах дослідження було реалізовано геоінформаційний підхід до опрацювання, інтеграції та візуалізації гідрологічних даних на прикладі річок Львівської області. Створений вебзастосунок, заснований на інструментах ArcGIS Pro та ArcGIS Online, забезпечує просторове представлення гідрологічних постів із можливістю інтерактивного доступу до атрибутивної інформації, а також аналітичного опрацювання часових рядів рівнів води.

Запропоноване рішення охоплює повний цикл роботи з даними – від попереднього опрацювання вихідних електронних таблиць до формування інтерактивної панелі моніторингу. Особливістю є інтеграція інформації як з автоматизованих, так і з рейкових постів, що суттєво розширює охоплення гідрологічної інформації для регіону.

Практична реалізація запропонованого підходу демонструє потенціал використання геоінформаційних технологій для покращення управління водними ресурсами, зокрема в аспектах оцінювання паводкових ризиків, візуалізації гідрологічних показників та забезпечення доступу до оперативної інформації для фахівців та органів влади.

У подальших дослідженнях передбачається розширення функціональності системи з акцентом на автоматичне оновлення даних у режимі реального часу, інтеграцію з метеорологічними показниками та розроблення моделей прогнозування рівня води й зон потенційного затоплення.

Список використаних джерел

1. Сніжко, С., Шевченко, О., & Дідовець, Ю. (2021). *Аналіз впливу кліматичних змін на водні ресурси України*. Центр екологічних ініціатив «Екодія». <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2021/06/analiz-vplyvu-vodni-resursy-full.pdf>.
2. Мальований, М. С., Боярин, М. В., Бедункова, О. О., Нетробчук, І. М., & Волошин, В. У. (2023). Вплив кліматичних змін на водний режим річок Волинської області. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія: Сільськогосподарські науки*, 1(101), 150–164.
3. FloodUZH. (б. д.). *Моделювання, картування затоплень та управління ризиками затоплення у басейні р. Уж*. https://flooduzh.buvrtysa.gov.ua/?page_id=1553.
4. АІВС – «Тиса». (2021). *Оперативне прогнозування паводків та наукове забезпечення управління водними ресурсами. 30 років розвитку водного господарства України*. <https://davr.gov.ua/news/aivs--tisa-operativne-prognozuvannya-pavodkiv-ta-naukove-zabezpechennya-upravlinnya-vodnimi-resursami-30-rokiv-rozvitku-vodnogo-gospodarstva-ukraini>.
5. Apaydin, S., & Koseoglu, H. (2025). Design and implementation of a real-time river monitoring station with an ultrasonic sensor and GSM module. *Applied Sciences*, 15(4), Article 1910. <https://doi.org/10.3390/app15041910>
6. Nur Syamsi, Ulfah, M., & Lesmideyarti, D. (2024). Water level monitoring for flood early mitigation based on Internet of Things (IoT). *Tepian*, 5(2), 58–64. <https://doi.org/10.51967/tepian.v5i2.2504>.
7. УкрГМЦ - Дані автоматичних гідрологічних постів. *УкрГМЦ*. URL: <https://www.meteo.gov.ua/ua/Dani-avtomatichnikh-hidrolohichnikh-postiv>.
8. Державне підприємство «УкрНДНЦ». (2024). *ДСТУ 3517:2024. Гідрологія суходолу. Терміни та визначення основних понять*. Київ: ДП «УкрНДНЦ».

References

1. Snizhko, S., Shevchenko, O., & Didovets, Y. (2021). Analiz vplyvu klimatichnykh zmin na vodni resursy Ukrainy. Tsentr ekolohichnykh initsiatyv. [Analysis of the Impact of Climate Change on Ukraine's Water Resources] [Electronic resource]. *Tsentr ekolohichnykh initsiatyv «Ekodiia» - Ecoaction Center for Environmental Initiatives*. <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2021/06/analiz-vplyvu-vodni-resursy-full.pdf>
2. Malovanyi, M. S., Boyaryn, M. V., Bedunkova, O. O., Netrobchuk, I. M., & Voloshyn, V. U. (2023). Vplyv klimatichnykh zmin na vodnyi rezhym richok Volynskoi oblasti. [The impact of climate change on the water regime of rivers in the Volyn region.] *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. Serii: Silskohospodarski nauky - Bulletin of the National University of Water and Environmental Engineering. Series: Agricultural Sciences*, 1(101), 150–164.
3. FloodUZH. (n.d.). Modeliuvannya, kartuvannya zatoplen ta upravlinnia ryzykamy zatoplennia u baseini r. Uzh. [Modeling, Mapping of Floods and Risk Management in the Uzh River Basin]. https://flooduzh.buvrtysa.gov.ua/?page_id=1553.
4. AIVS "Tysa". (2021). Operatyvne prohnozuvannya pavodkiv ta naukove zabezpechennia upravlinnia vodnymi resursamy. 30 rokiv rozvytku vodnoho hospodarstva Ukrainy. [Operational Flood Forecasting and Scientific Support for Water Resources Management. In 30 Years of Water Management Development in Ukraine]. <https://davr.gov.ua/news/aivs--tisa-operativne-prognozuvannya-pavodkiv-ta-naukove-zabezpechennya-upravlinnya-vodnimi-resursami-30-rokiv-rozvitku-vodnogo-gospodarstva-ukraini>.
5. Apaydin, S., & Koseoglu, H. (2025). Design and implementation of a real-time river monitoring station with an ultrasonic sensor and GSM module. *Applied Sciences*, 15(4), Article 1910. <https://doi.org/10.3390/app15041910>.
6. Nur Syamsi, Ulfah, M., & Lesmideyarti, D. (2024). Water level monitoring for flood early mitigation based on Internet of Things (IoT). *Tepian*, 5(2), 58–64. <https://doi.org/10.51967/tepian.v5i2.2504>.
7. Ukrainian Hydrometeorological Center. (n.d.). *Hydrology of Ukraine*. <https://www.meteo.gov.ua/ua/Dani-avtomatichnikh-hidrolohichnikh-postiv>.

8. State Enterprise "UkrNDNC". (2024). DSTU 3517:2024. Hidrolohiia sukhodolu. Terminy ta vyznachennia osnovnykh poniat. [Land Hydrology. Terms and Definitions of Basic Concepts]. SE "UkrNDNC".

Отримано 16.06.2025

UDC 528

Yaroslav Tarasovych¹, Volodymyr Nikulishyn²

¹PhD candidate, Department of Cartography and Geospatial Modelling
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)
E-mail: yaroslav.v.tarasovych@lpnu.ua

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Cartography and Geospatial Modelling
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)
E-mail: volodymyr.i.nikulishyn@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0027-3511>
Scopus Author ID: 56148982600

EXPERIENCE OF USING A GEO-INFORMATION APPROACH FOR VISUALIZATION OF HYDROLOGICAL POSTS DATA IN THE LVIV REGION

This article addresses the urgency of improving hydrological monitoring and effective water resource management, which is particularly crucial for flood prevention and rapid emergency response.

The problem lies in the need to develop a tool for efficient collection, processing, and visualization of water level data in the rivers of the Lviv region. The research objective is to develop and implement an interactive web application based on ArcGIS for visualizing and analyzing water level dynamics. This tool is designed to display the location of hydrological posts, provide access to their current status information, and analyze time series of hydrological data. The key feature of this approach is the integration and visualization of data from both automated and manual (gauge) posts, significantly expanding the coverage of hydrological information.

Based on the stated objectives, the geoinformation approach has been implemented for collecting and visualizing hydrological post data in the Lviv region using ArcGIS tools. The data source for this system comprises observations provided by the Basin Water Resources Management of the Western Bug and Sian Rivers. As a result, the interactive ArcGIS monitoring dashboard has been developed. It visualizes spatial and temporal water level data, integrating a web map with tabular time series data. This ensures automatic synchronization between selecting a post on the map and displaying dynamic charts and analytical tables. The web application facilitates comprehensive analysis of hydrological data.

The proposed solution significantly enhances hydrological monitoring and supports managerial decision-making regarding flood prevention and emergency response. Its practical value lies in its application for water resource management and flood risk assessment, including the visualization of indicators and access to operational information for specialists and authorities. Future research will focus on real-time data updates, integration with meteorological indicators, and development of models for forecasting water levels and potential flood zones.

Keywords: water level; hydrological posts; interactive web map; ArcGIS; hydrological risk; data visualization; Lviv region.

Table: 3. Fig.: 5. References: 8.

**ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ
НАУКОВИХ СТАТЕЙ ДО НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ
«ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**

Шановні дописувачі!

Для подання статті необхідно спочатку надіслати статтю та інформацію про автора, з яким контактувати щодо публікації статті, оформлені за встановленими вимогами, для попереднього розгляду редакційною колегією журналу «Технічні науки та технології». За умови відповідності статті спеціальностям, за якими акредитовано журнал, відповідності нормам академічної доброчесності за результатами перевірки на плагіат, позитивної незалежної рецензії від призначеного редакційною колегією рецензента, стаття розміщується в макеті журналу.

Редакційна колегія забезпечує розгляд та незалежне рецензування поданих до публікації матеріалів вченими, які мають науковий ступінь та здійснюють дослідження за спеціальністю, що відповідає тематиці поданого для публікації матеріалу, і є авторами (спів-авторами) загальною кількістю не менше трьох публікацій у наукових виданнях, включених до категорії «А» та/або категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, та/або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus за відповідною спеціальністю, оприлюднених упродовж останніх п'яти років.

Опублікування наукових статей у журналі «Технічні науки та технології» є платним. Вартість публікації наукової статті становить:

- **80 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам потрібна паперова версія журналу);
- **60 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам достатньо електронної версії журналу).

Остаточна вартість публікації формується після готовності електронного макету журналу та повідомляється автору, відповідальному за публікацію статті. Оплата підтверджується квитанцією.

**УМОВИ ПУБЛІКАЦІЇ, ВИМОГИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ, РЕКВІЗИТИ
ОПЛАТИ ТА ОСТАННІ НОМЕРИ НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ
ТА ТЕХНОЛОГІЇ» РОЗМІЩЕНО НА САЙТІ»: <http://tst.stu.cn.ua/>**

Контактна інформація:

Мороз Наталія Вікторівна

Тел.: (0462) 665-225

E-mail: tst.technical.sj@gmail.com

**Відповідальність за матеріали, наведені у статті, несе автор.
Неправильно оформлені автором стаття та супровідні документи,
що не відповідають зазначеним вимогам, розглядатися не будуть.**

*Редакція розглядає надходження публікації та супровідних документів
як згоду дописувача (ів) щодо передачі авторського права на використання твору
(тиражування, розповсюдження тощо).*

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 2(40)

Технічний редактор, відповідальна за випуск
Редактор
Комп'ютерна верстка

Н. В. Мороз
О. С. Смелова
О. П. Журко

Заснований у 2015 році. Ідентифікатор медіа
відповідно до Реєстру суб'єктів у сфері медіа від 31.08.2023 р. № 782 R30-01210

Підписано до друку 01.07.2025. Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. – 60,68.
Тираж 100 пр. Замовлення № 16/25.

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.