

РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-364-371](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-364-371)

УДК 621.3

**Микола Петрович Кунденко¹, Андрій Юрійович Руденко²,
Віталій Анатолійович Мардзявко³**

¹доктор технічних наук, професор кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків, Україна)

E-mail: n.p.kundenko@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5841-4367>

²асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Миколаївський національний аграрний університет (Миколаїв, Україна)

E-mail: andrey0911r@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5103-6412>

³асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Миколаївський національний аграрний університет (Миколаїв, Україна)

E-mail: vitalijmardzavko@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7327-9215>

ВИКОРИСТАННЯ КОНТРОЛЬОВАНОГО ТЕРМІЧНОГО ІЧ-ВИПРОМІНЕННЯ ДЛЯ БОРОТЬБИ З ПАРАЗИТАМИ МЕДОНОСНИХ БДЖІЛ

У роботі запропоновано конструкцію термокамери для виконання дезінфекційних заходів у боротьбі з кліщем *Varroa*, яка ґрунтується на використанні інфрачервоного (ІЧ) випромінювання у поєднанні з цифровою системою терморегуляції. В основу конструктивного рішення закладено морфологічні та термочутливі особливості паразита, зокрема вразливість гнатосоми та вентральної частини до підвищеної температури. Запропонована конструкція включає підігріту трубу, інфрачервону лампу та термореле STC-1000, що підтримує стабільну температуру в межах 42-45 °С, безпечну для бджіл, але згубну для паразита. Система є автономною та енергоефективною. Моделювання в середовищі MATLAB/Simulink підтвердило стабільність температурного контролю та ефективність керування нагрівом із урахуванням затримок у роботі реле.

Ключові слова: паразит; термокамера; інфрачервоне випромінювання; кліщ *Varroa*; термореле.

Рис.: 5. Бібл.: 11.

Постановка проблеми. Проблемою, з якою зіштовхнулися пасічники України, та котра потребує нових шляхів рішення, є кліщ *Varroa* (рис. 1). Паразит не лише виснажує бджіл шляхом живлення гемолімфою, а й є переносником низки вірусних захворювань, що призводить до масової загибелі бджолиних сімей.



Рис. 1. Кліщ *Varroa*

У традиційному сенсі боротьби з паразитами бджіл застосовуються хімічні препарати, котрі синтезовані з рослинних компонентів або є хімічним засобом, з одного боку, можуть бути токсичними для самих бджіл, а з іншого – сприяють формуванню резистентності у кліщів, знижуючи ефективність обробок. Отже, є ризик накопичення ферментів препаратів у продуктах бджільництва, що суперечить принципам екологічної безпеки та якості.

Незважаючи на гостроту існуючої проблеми, на сьогодні залишається відкритим для пошуку ефективне технологічне рішення, котре забезпечить неінвазивну та енергоефективну обробку бджіл від кліща *Varroa* без використання хімічних засобів.

Мутуючи та підлаштовуючись до хімічних та біологічних засобів боротьби, кліщ *Varroa* спонукає до пошуку нових або модернізації існуючих методів боротьби зі шкідником, базуючи дослідження не тільки на методології боротьби, а й на селекційних особливостях популяції медоносних бджіл у подальшому.

Аналізуючи [1-4], існуючі методи мають суттєві обмеження, котрі стають основними перепонами, що зменшують відсоткові показники дезінфекції. Однак дослідження морфології та фізіологічної чутливості кліща вказують на його вразливість до підвищених температур, особливо в зоні гнатосоми. Тому є можливість логічно використати слабкість паразиту до термічних коливань та розробити альтернативну модель для дезінфекції, яка буде одночасно ефективною проти *Varroa* та безпечною для медоносних бджіл.

Одним із перспективних напрямів є застосування інфрачервоного (ІЧ) випромінювання з контрольованим температурним режимом, що дозволяє цілеспрямовано впливати на термочутливі ділянки паразита без шкоди для бджоли. Проте для реалізації такого підходу необхідна розробка відповідної апаратної системи з точним регулюванням температури та ефективною схемою управління.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження в системі взаємодії паразита та носія проведено в роботі [1], де автори описують взаємодію, що полягає не тільки в поглинанні гемолімфи, а й наслідковому руйнуванню біоти тіла, що формують імунну, терморегулюючу та протитоксинну дію. Звернення уваги на побічний процес зараження супутніми цьому процесу вірусами. Сам кліщ *Varroa* добре адаптується до нових умов та створює синергію патогенності [1]. Дослідники R. D. Schmid-Hempel та інші окреслюють чіткий зв'язок між доглядом за бджолами, рівнем підготовки бджолярів та втратою бджолиних сімей у процесі боротьби з *Varroa*. Чітка структурована робота з ефективного контролю популяції кліща має чітку залежність від інтеграції технологій, вибору препаратів, дотримання термінів та рівня обробки. У роботі [2] встановлено, що нестача знань, відхилення від технологій та надмірне використання хімічних засобів при обробці збільшують смертність бджолосімей.

Дослідження показали, що *Varroa* вразлив до термічних коливань, тому це стало основою для розробки гіпертермічних пристроїв, які нагрівають бджіл до 42-45 °C, викликаючи загибель паразита без шкоди для носія. У роботах [3] та [4] показано ефективність гіпертермії в обмежених умовах, але водночас показано проблему застосування технологій на рівень промислових пасік. Також у світовій практиці з'являються спроби біотехнологічного підходу до контролю *Varroa*, зокрема через RNA-інтерференцію або селекцію ліній бджіл, чутливих до наявності кліщів (VSH). Однак такі рішення мають довгострокову перспективу і не вирішують нагальної потреби у технологічних засобах локальної обробки.

Аналіз наукових публікацій засвідчує високу зацікавленість у фізичних методах боротьби з *Varroa destructor*, однак на сьогодні відсутні конкретні результати.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри велику кількість досліджень, присвячених вивченню біології кліща *Varroa* та розробці методів боротьби з ним, низка ключових аспектів залишається недостатньо розкритою. По-перше, наявні фізичні методи знезараження стикаються з проблемою адаптованості їх до широкомасштабного впровадження у польових умовах. Відсутні пристрої, що поєднують наступні якості, а саме: компактні, автономні та прості у використанні пристрої, здатні забезпечити безпечну термічну обробку бджіл без необхідності втручання оператора або порушення мікроклімату вулика.

Також недосліджена проблема автоматизованого контролю температурного режиму опромінення для збереження водночас простоти та надійності з високою якістю контролю з урахуванням інерційності нагрівальних елементів та поведінкових особливостей

бджіл. Існуючі дослідження не враховують варіативність температурних умов (як зовнішніх, так і внутрішніх), які можуть суттєво впливати на ефективність термообробки та безпеку для комах.

Метою статті є розробка термічної камери для боротьби з кліщем *Varroa* для літної бджоли за рахунок світлотехнічних елементів та засобів контролю.

Виклад основного матеріалу. При розробці та модифікації установок для боротьби з кліщем *Varroa* для початку потрібно звернути увагу на морфологію паразита. Завдяки різноманіттю біологічних характеристик паразита, питання його ідентифікації тривалий час залишалося у центрі уваги науковців. На основі досліджень науковців, можна визначити основні параметри тіла та особливості тканинних покривів паразита, що є важливими для вдосконалення й розроблення ефективного механізму боротьби з ним. У роботі дослідників [5] виокремлені параметри тіла для особи, такі як 1-1,77 мм у довжину та 1,50-1,99 мм у ширину, при цьому співвідношення довжини до ширини варіює в межах 0,53-0,93 мм. Можна спостерігати деякі особливості паразитів до збільшення своїх параметрів та їх прив'язку до кліматичних зон та географії знаходження пасіки [5-8]. Щодо особливостей покриву та морфології будови тіла, саме тіло складається з двох основних відділів: головогруді або просома, яка містить ротову порожнину та кінцівки, та черевце, або опістому; ця частина знаходиться зазвичай за невидимої візуально сторони паразита. Якщо розглядати детальніше, то вторинно тіло поділяють на утворену злиттям фрагментів – ідіосому – та гнатосому, яка має певне видовження з боків, на котрій розташовані рухомі педіпальпи та хеліцери.

Поверхневі тканини кліща *Varroa* є достатньо чутливими до зовнішніх факторів, зокрема його гнатосома та ідіосома мають обмежену стійкість до екстремальних температурних коливань. Кліщі мають підвищену чутливість до зростання температури, особливо це стосується показника температури $+42\text{ }^{\circ}\text{C}$ у тілі паразита спостерігається за таких умов процес денатурації білка, що призводить до руйнації міжклітинних зв'язків та деградацію м'язової тканини. А зростання термічного нагріву за температурний показник $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ показує, що в паразита термічний шок, котрий веде до загибелі. Найвразливішими є внутрішні структури, що розташовані з вентрального боку (гнатосома), який менш захищений кутикулярним шаром. Це дає змогу використовувати спрямоване теплове опромінення як один із фізичних методів контролю вароатозу, наприклад, у спеціальних термокамерах [9-11].

Установка для виконання стерилізації від кліща *Varroa* має просту структуру та складається з ємності, яка виступає резервуаром для обробки, нагрівального елемента, термореле та джерела живлення (рис. 2).

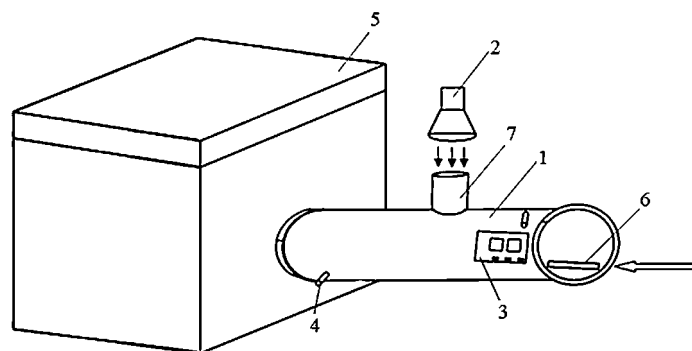


Рис. 2. Конструкція термокамери для стерилізації медоносних бджіл від кліща *Varroa*:

1 – термокамера; 2 – лампа інфрачервоного випромінювання; 3 – теплове реле;

4 – термодатчики; 5 – вулик; 6 – льоток (вхід до камери);

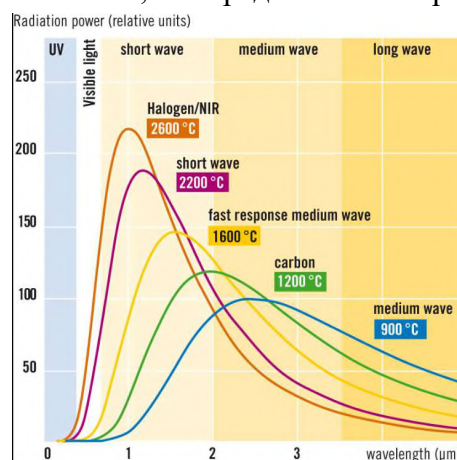
7 – канал дії інфрачервоного випромінювання

Установка призначена для знезараження медоносних бджіл шляхом короткочасного опромінення інфрачервоним (ІЧ) випромінюванням під час їх проходження через вхідну трубу вулика.

Конструктивно установка складається з трьох основних елементів: *термокамера* (1), інфрачервоної лампи (2) та теплового реле (3) з термодатчиками (4). Термокамера герметично з'єднується з вуликом (5) та має льоток для підльоту бджоли (6). Внутрішні стінки термокамери виготовляються з термостійкого матеріалу, а її конструктивно спрямований канал (7) забезпечує примусове проходження бджіл крізь зону впливу інфрачервоного випромінювання. У верхній частині труби розміщується інфрачервона лампа потужністю 100...150 Вт, яка випромінює інфрачервоне випромінювання в діапазоні довжин хвиль 0,8...1,4 μm , що є ефективним для термічного впливу на шкідників. В установці за основу прийнято до використання лампу типу 150 W E27 R123, яка представлена на рис. 3, а.



а

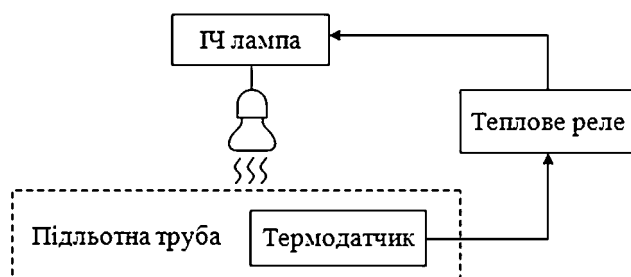


б

Рис. 3. Інфрачервоне джерело випромінювання:
а – лампа типу 150 W E27; б – спектральний розподіл лампи

На рис. 3, б зображено типовий спектральний розподіл лампи 150 W E27 R123 з домінуючою довжиною хвилі в межах 0,8-1,4 μm , причому пікова інтенсивність концентрується біля 1 μm , що знаходиться всередині заявленого діапазону. Такий спектр забезпечує ефективний тепловий вплив при відносно низьких висвітлювальних характеристиках, що важливо для задач термокамер у боротьбі з кліщем Varroa: основний акцент робиться на теплову дію, а не на світлове освітлення.

Температурний режим в зоні опромінення контролюється за допомогою термореле, яке зчитує дані з термодатчика і автоматично регулює роботу лампи (рис. 4, а).



а



б

Рис. 4. Схема установки для термічної обробки:
а – структурна схема; б – терморегулятор типу STC-1000

У конструкції запропоновано використати термореле типу STC-1000, який представлено на рис. 4, б. Терморегулятор типу STC-1000 є основним керуючим елементом системи, його функція полягає у регулюванні роботи інфрачервоної лампи відповідно до температурних показників, що надходять із термодатчика, розміщеного у підльотній трубі.

Терморегулятор зчитує температуру в реальному часі та порівнює її із заданим користувачем діапазоном. У разі зниження температури нижче встановленого порогу пристрій активує нагрівальний елемент – інфрачервону лампу, а при досягненні верхнього ліміту температури – вимикає її. Отже, така функціональна особливість забезпечує простоту алгоритму дій, дозволяє точно підтримувати критичну температуру, що є згубною для паразита, але безпечною для самих бджіл.

Робочий температурний діапазон підтримується на рівні 42-45 °C – достатній для дезінфекції, але безпечний для самих бджіл. Система є автономною, що забезпечує стабільну роботу без втручання оператора [11].

Перевагами установки є: безконтактність обробки, відсутність хімічного навантаження на бджолину сім'ю, енергоефективність за рахунок короткотривалої роботи лампи, а також висока точність регулювання температури. Вона підходить як для індивідуальних пасік, так і для промислового використання за умови попереднього тестування.

Для підвищення ефективності рекомендовано використовувати теплоізоляцію труби, відбивачі для фокусування випромінювання, а також системи контролю руху бджіл з метою уникнення перегріву в разі скупчення. Установка має значний потенціал для впровадження в сучасну апітерапію та біобезпечне утримання пасік. Для реалізації установки запропонована функціональна схема (рис. 5).

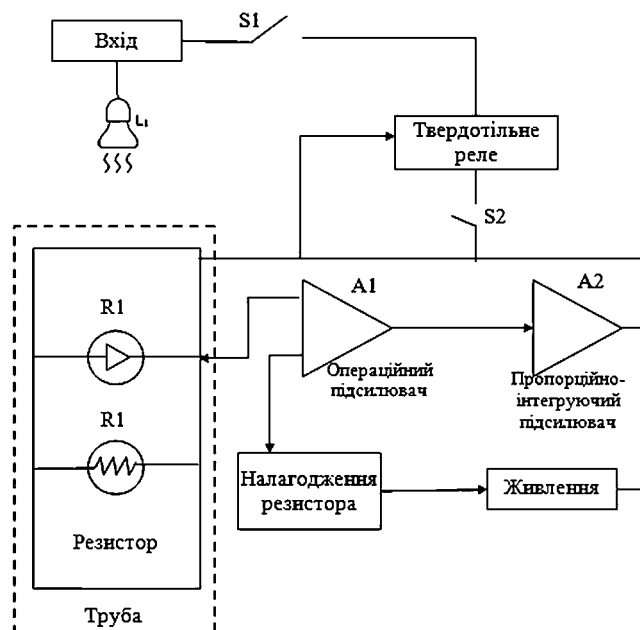


Рис. 5. Функціональна схема для термічної обробки

На функціональній схемі термодатчик умовно представлений у секції труби під позначенням R1 – це терморезистор, який змінює опір залежно від температури. Саме він:

- Вимірює температуру всередині підльотної труби.
- Передає сигнал до операційного підсилювача A1, який посилює слабкий аналоговий сигнал.
- Далі сигнал обробляється пропорційно-інтегруючим підсилювачем A2, щоб забезпечити плавне керування твердотілим реле та лампою L1.

Для аналізу та якості керування самої установки проведено моделювання стійкості системи в програмному середовищі MATLAB/Simulink для перевірки реалізації нагріву камери ІЧ променями з керуванням через терморегулятор. В моделюванні використано певні обмеження, які є раціональними та допустимими: $T_{\min} < 43^{\circ}\text{C}$ та $T_{\max} > 45^{\circ}\text{C}$, час затримки реле $t_{\text{зат}} = 3\text{с}$. Побудовані результати моделювання представлено на рис. 6.

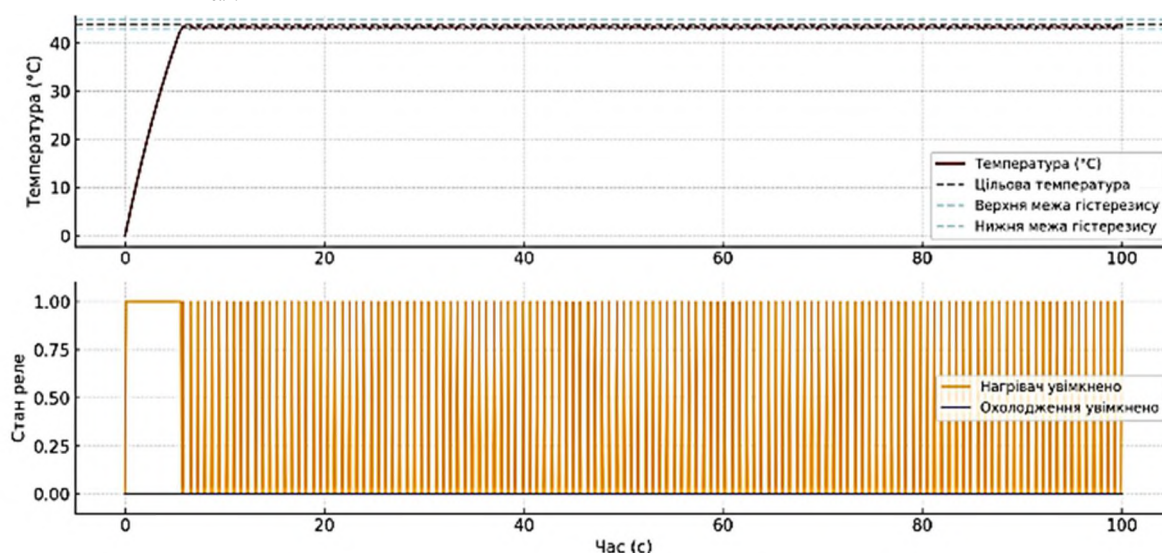


Рис. 6. Перехідний процес температурного контролю (STC-1000)

На графіку зображено перехідний процес роботи системи терморегуляції, що отримало реалізацію шляхом застосування терморегулятора STC-1000 з двома реле. Температурний контроль здійснено за введеними та обумовленими вище обмеженнями. Регулювання нагріву виконується шляхом вмикання та вимикання джерела ІЧ. Такий принцип дозволить підтримувати температуру в заданих межах з урахуванням інерційності об'єкта.

Графік демонструє стабільну роботу системи. З нього видно плавний набір температури в об'ємі камери. Робота реле продемонстрована з певною затримкою для реалізації робочих характеристик реального пристрою. Це забезпечує ефективне керування температурою, зокрема при обробці кліщів *Varroa*, де важливо точно підтримувати задану температуру без різких коливань.

Висновки. Виконані дослідження дозволили розробити конструкцію установки для термічного знезараження медоносних бджіл від кліща *Varroa destructor*, що базується на використанні інфрачервоного випромінювання з контрольованим температурним режимом. Запропонована система включає інфрачервону лампу типу 150 W E27, термодатчик NTC 10kΩ та цифровий терморегулятор STC-1000, який забезпечує стабільну підтримку температури в межах 42...45 °C – безпечної для бджіл і згубної для паразита. Проведене комп'ютерне моделювання у середовищі MATLAB/Simulink показало, що система здатна забезпечити плавний перехідний процес нагріву з мінімальними коливаннями та похибкою регулювання не більше $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Було підтверджено, що пікова довжина хвилі випромінювання лампи в межах 1,0 μm ефективно впливає на термочутливі зони кліща, зокрема гнатосому, що обумовлює високий ступінь знезараження без хімічного втручання. Система є енергоефективною, автономною та технологічно простою, що дозволяє адаптувати її як для індивідуальних пасік, так і для промислового використання. Враховуючи результати моделювання, а також простоту реалізації і надійність, запропонована термокамера може стати перспективною альтернативою традиційним хімічним методам боротьби з вароатозом у сучасному бджільництві.

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

Під час написання цього матеріалу автор(и) використовував(ли) [https://chatgpt.com] – [Для зменшення об'єму тексту проаналізованих досліджень за тематикою публікації та систематизації і узагальнення результатів моделювання перехідного процесу]. Після використання цього інструменту/сервісу автор(и) переглянув(ли) та відредагував(ли) зміст за потреби і взяв(ли) на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Traynor, K. S. (2020). Varroa destructor: A complex parasite, crippling honey bees worldwide. *Trends in Parasitology*, 36(7), 592-606. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2020.04.004>.
2. Thoms, C. A. (2018). Beekeeper stewardship, colony loss, and Varroa destructor management. *Ambio*, 48(10), 1209-1218. <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1130>.
3. Porporato, M., Cabirio, C., Melillo, M., & Bassignana, E. (2020). Varroa control by means of a hyperthermic device. *Applied Sciences*, 12(16), 8043-8051. <https://doi.org/10.3390/app12168043>.
4. Aldea-Sánchez, P., Dvořáková, K., Staroň, M., Tychler, M., & Pérez, J. (2021). Heat tolerance, energetics, and thermal treatments of honeybees parasitized with Varroa. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.656504>.
5. Назаренко, О. С. (2020). *Варооз медоносних бджіл* (Публікація № 16.00.11) [Неопубл. дис. канд. вет. наук].
6. Mossadegh, M. S. (1990). Development of Euvarroa sinhai, a parasitic mite of Apis florea, on A. mellifera worker brood. *Experimental & Applied Acarology*, 9(2), 73-78. <https://doi.org/10.1007/bf01198984>.
7. Lekprayoon, C., & Tangkanasing, P. (1991). Euvarroa wongsirii, a new species of bee mite from Thailand. *International Journal of Acarology*, 17(4), 255-258. <https://doi.org/10.1080/01647959108683915>.
8. Akimov I, I., & Kiryushyn V, V. (2010). Ethological aspects of honeybee apis mellifera (Hymenoptera, Apidae), adaptation to parasitic mite Varroa destructor (Mesostigmata, Varroidae) invasion. *Vestnik Zoologii*, 44(1), 32-37. <https://doi.org/10.2478/v10058-010-0004>.
9. Lagendijk, J. W. (2000). Hyperthermia Treatment Planning. *Physics in Medicine and Biology*, 45(5), 61-76. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/45/5/201>.
10. Soroker, V., Kovacic, M., & Hatjina, F. (2021). The colossal varroa task force: Combating the mite in the 21st century. *Bee World*, 99(1), 14-16. <https://doi.org/10.1080/0005772x.2021.1981678>.
11. Williams, S. M. (2022). A comparison of machine-learning assisted optical and thermal camera systems for beehive activity counting. *Smart Agricultural Technology*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100038>.

References

1. Traynor, K. S. (2020). Varroa destructor: A complex parasite, crippling honey bees worldwide. *Trends in Parasitology*, 36(7), 592-606. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2020.04.004>.
2. Thoms, C. A. (2018). Beekeeper stewardship, colony loss, and Varroa destructor management. *Ambio*, 48(10), 1209-1218. <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1130>.
3. Porporato, M., Cabirio, C., Melillo, M., & Bassignana, E. (2020). Varroa control by means of a hyperthermic device. *Applied Sciences*, 12(16), 8043-8051. <https://doi.org/10.3390/app12168043>.
4. Aldea-Sánchez, P., Dvořáková, K., Staroň, M., Tychler, M., & Pérez, J. (2021). Heat tolerance, energetics, and thermal treatments of honeybees parasitized with Varroa. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.656504>.
5. Nazarenko, O. S. (2020). Varrooz medonosnykh bdzhl [Varroaosis of honey bees] (Publikatsiia № 16.00.11 – Publication No. 16.00.11) [Neopubl. dys. kand. vet. Nauk - Unpublished dissertation of a candidate of veterinary sciences].
6. Mossadegh, M. S. (1990). Development of Euvarroa sinhai, a parasitic mite of Apis florea, on A. mellifera worker brood. *Experimental & Applied Acarology*, 9(2), 73-78. <https://doi.org/10.1007/bf01198984>.
7. Lekprayoon, C., & Tangkanasing, P. (1991). Euvarroa wongsirii, a new species of bee mite from Thailand. *International Journal of Acarology*, 17(4), 255-258. <https://doi.org/10.1080/01647959108683915>.

8. Akimov I. I., & Kiryushyn V. V. (2010). Ethological aspects of honeybee *apis mellifera* (Hymenoptera, Apidae), adaptation to parasitic mite *Varroa destructor* (Mesostigmata, Varroidae) invasion. *Vestnik Zoologii*, 44(1), 32-37. <https://doi.org/10.2478/v10058-010-0004>.
9. Lagendijk, J. W. (2000). Hyperthermia Treatment Planning. *Physics in Medicine and Biology*, 45(5), 61-76. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/45/5/201>.
10. Soroker, V., Kovacic, M., & Hatjina, F. (2021). The coloss varroa task force: Combating the mite in the 21st century. *Bee World*, 99(1), 14-16. <https://doi.org/10.1080/0005772x.2021.1981678>.
11. Williams, S. M. (2022). A comparison of machine-learning assisted optical and thermal camera systems for beehive activity counting. *Smart Agricultural Technology*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100038>.

Отримано 08.08.2025

UDC 621.3

Mykola Kundenko¹, Andrii Rudenko², Vitalii Mardziavko³

¹Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Heat Engineering and Energy Efficient Technologies
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» (Kharkiv, Ukraine)
E-mail: n.p.kundenko@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5841-4367>

²Assistant Professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics
Mykolaiv National Agrarian University (Mykolaiv, Ukraine)
E-mail: andrey0911r@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5103-6412>

³Assistant Professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics
Mykolaiv National Agrarian University (Mykolaiv, Ukraine)
E-mail: vitalijmardzavko@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7327-9215>

USING CONTROLLED THERMAL IR RADIATION TO COMBAT HONEY BEE PARASITES

The article discusses the development and research of a hardware complex for combating the *Varroa destructor* mite in honey bees by using controlled thermal infrared (IR) radiation. The basis of the design solution is the morphological vulnerability of the parasite, in particular the gnathosomes and the ventral part of the body, to elevated temperatures in the range of 42-45 °C, which is safe for bees but detrimental to the mite.

The proposed installation is a thermal treatment module integrated into the hive's approach pipe, equipped with an IR lamp of type 150 W E27 R123 and a digital temperature controller STC-1000 in combination with a NTC 10 kΩ temperature sensor. The system operates in automatic mode, maintaining the set temperature by adjusting the operation of the heating element depending on the sensor data. The design provides for the directional action of IR radiation in the wavelength range of 0.8-1.4 μm, with a peak of about 1 μm, which is optimal for point thermal effects on the parasite with minimal light load.

To verify the operability and stability of the temperature regime, mathematical modeling was performed in the MATLAB/Simulink environment. The results showed a smooth transient heating process with a control error of no more than ± 0.5 °C and the absence of sharp temperature fluctuations, which confirms the suitability of the technology for safe processing of bees.

The advantages of the developed system are environmental safety (absence of chemicals), autonomy of operation, energy efficiency due to short-term activation of heating, as well as simplicity of design and the possibility of integration into existing hives without significant modifications. The proposed approach can be an effective alternative to traditional chemical methods of combating varroa and has the potential for implementation in both individual apiaries and industrial beekeeping.

Keywords: parasite; thermal camera; infrared radiation; *Varroa* mite; thermal relay.

Fig.: 5. References: 11.

**Володимир Акнафович Халіков¹, Анатолій Максимович Жерносеков²,
Олександр Федорович Шатан³**

¹доктор технічних наук, старший науковий співробітник, старший викладач кафедри електричних мереж та систем
Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: xvavlad@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1691-5005>

²доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу імпульсних процесів
і технологій дугового зварювання

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ, Україна)

E-mail: zhernosekov@paton.kiev.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6404-2221>

³науковий співробітник

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України (Київ, Україна)

E-mail: shatanaf57@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6553-7421>

ВПЛИВ ВНУТРІШНЬОГО ОПОРУ НА ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧОВОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ

Виконано аналіз впливу внутрішнього опору трансформаторно-ключового регулятора напруги, що функціонує на принципі дискретно-разового керування ключами. Показано, що вплив внутрішнього опору кожної наступної ступені регулювання трансформаторно-ключового пристрою на задіяний коефіцієнт трансформації повинен бути таким, щоб відношення значень попереднього коефіцієнта до наступного не перевищувало ту саму величину, що є характерною для режиму холостого ходу пристрою. Виконання цієї умови забезпечує незмінність похибки регулювання у процесі роботи при зміні величини чи характеру навантаження.

Ключові слова: трансформатор; ключ; комутація; регулювання напруги; моделювання; Simulink.

Рис.: 8. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Дискретно-ступінчасте або дискретно-разове регулювання напруги шляхом комутації належних відводів силового трансформатора, тобто відповідною зміною коефіцієнта його трансформації, є найпоширенішим способом досягнення необхідних результатів [1-3]. Проте, при цьому не висвітлюються питання впливу внутрішнього опору компонентів силового пристрою в частині збільшення похибки регулювання. Тому актуальними є дослідження щодо поліпшення ефективності функціонування такого роду пристроїв.

Постановка проблеми. Сьогодення характеризується широким використанням цифрових систем управління та регулювання. Тенденції до функціонального та апаратного ускладнення такого роду електротехнічних установок вимагають належного комп'ютерного моделювання систем управління і їхніх вузлів, а також силових вузлів такого роду установок. Використання програмних середовищ візуального об'єктно-орієнтовного моделювання дозволяє одержати нові достовірні та наочні результати, що загалом спрощує аналіз та сприяє їх більш ґрунтовному осмисленню. Це передусім також стосується використання поширеного і постійно оновлюваного пакета MatLab/Simulink.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження виконавчих вузлів регулювання напруги, що реалізуються у вигляді комбінаційного поєднання багатообмоткових трансформаторів та ключів широко висвітлюється у наукових публікаціях [4-8]. Основним завданням, що вирішується при цьому, є формування бажаної форми регульовальної характеристики шляхом вибору необхідних виткових співвідношень трансформаторів і відповідного увімкнення до виводів тих чи інших обмоток, комутаційних компонентів. При цьому ставляться задачі по мінімізації кількості обмоток, ключів, трансформаторів, зменшення струмів, що комутуються тощо.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Здебільшого такі завдання вирішуються за умов незмінності навантаження чи нехтування його впливом, що може бути неприйнятним, але завжди є першим етапом вибору схеми силового регулятора. Природно, що при регулюванні його внутрішній опір змінюється, оскільки зміна напруги реалізується в процесі послідовних переходів від одного коефіцієнта трансформації до

іншого. Тому залишається необхідність подальших досліджень щодо розширення таких завдань у частині визначення прийнятних умов впливу внутрішнього опору трансформаторно-ключового регулятора напруги (ТКРН).

Метою дослідження є визначення прийнятних умов впливу внутрішнього опору ТКРН, що змінюється у процесі регулювання, за яких би забезпечувалася одна і та ж похибка регулювання.

Виклад основного матеріалу. Проаналізуємо проблему регулювання напруги на прикладі виконання трьохключового силового ТКРН, що забезпечує підтримку рівня вихідної напруги U_2 (рис. 1) у межах від $U_{2.1}$ до $U_{2.2}$ в діапазоні вхідної напруги U_1 у межах від $U_{1.1}$ і до $U_{1.4}$ (рис. 2).

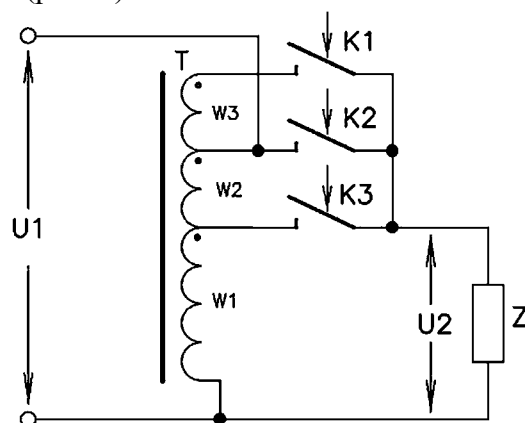


Рис. 1. Трьохключовий регулятор напруги

Виходячи з геометричних положень, значення коефіцієнтів трансформації K_t дорівнюють величині тангенса кута нахилу відповідної прямої до осі вхідної напруги U_1 . Сама величина вихідної напруги U_2 визначається витковими співвідношеннями автотрансформатора та одним із трьох увімкнених ключів ($K_1 \dots K_3$, рис. 1). Тобто піддіапазони вхідної напруги $U_{1.1} - U_{1.2}$, $U_{1.2} - U_{1.3}$, $U_{1.3} - U_{1.4}$ (рис. 2) відповідають увімкненому стану відповідно ключів K_1 , K_2 , K_3 .

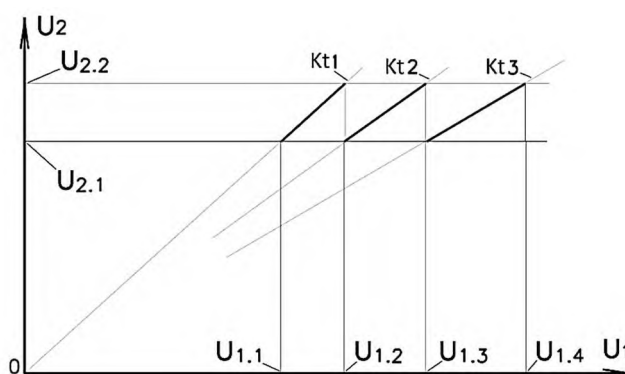


Рис. 2. Графічна діаграма роботи трансформаторно-ключового регулятора напруги

З рис. 2 випливає, що $K_{t1} = U_{2.2}/U_{1.2}$, а $K_{t2} = U_{2.1}/U_{1.2}$. Враховуючи відношення цих виразів один до іншого, одержимо: $K_{t1}/K_{t2} = U_{2.2}/U_{2.1}$. Ці співвідношення пов'язують необхідні значення K_t і похибку регулювання системи, що визначається різницею $U_{2.2} - U_{2.1}$. Якщо позначити: $\gamma = K_{t1}/K_{t2} = U_{2.2}/U_{2.1}$, то очевидно, що кожен наступний коефіцієнт трансформації, який повинен бути використаний на черговому ступені регулювання повинен бути більший або менший на ту ж саму величину – γ . Власне дотри-

мання цієї умови стоїть в основі комбінаційного синтезу ТКРН регулювання змінної напруги. Для спрощення, як правило, такий аналіз виконується при нехтуванні внутрішнім опором обмоток трансформаторів та ключових компонентів схеми, тобто відповідає режиму холостого ходу (XX) пристрою.

Конкретнішим та наочнішим є використання середовища *MatLab/Simulink*. У такому разі, для схеми (рис. 1) за умов, що $U_{2.1} = 210\text{В}$ і $U_{2.2} = 230\text{В}$ розрахункові співвідношення можуть мати вигляд, як на рис. 3

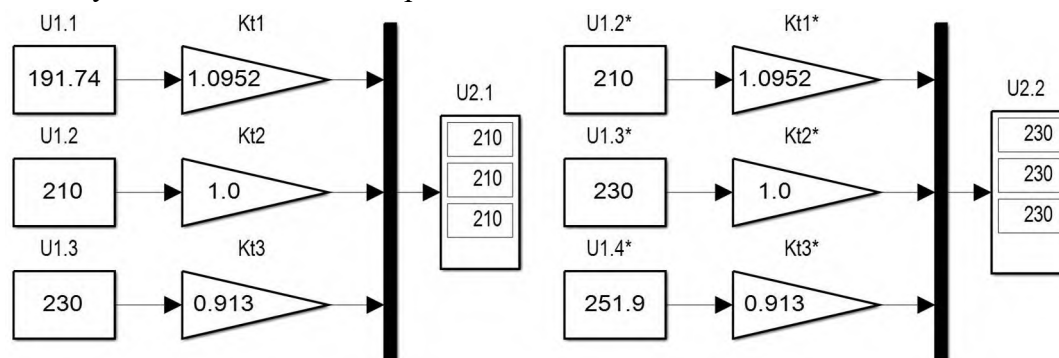


Рис. 3. Обчислювальна модель для схеми рис. 1

При цьому графічна діаграма роботи ТКРН (рис. 2) прийме вид більш конкретний вид, що наведений на рис. 4.

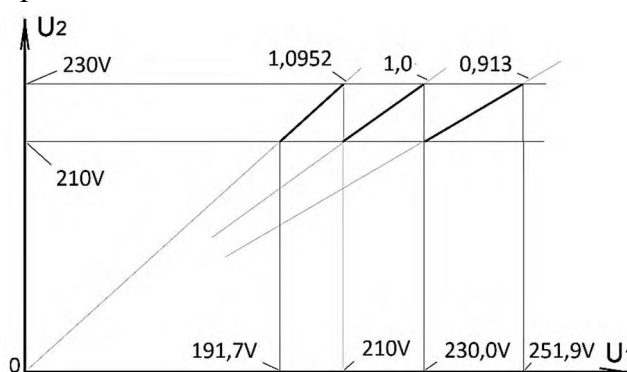


Рис. 4. Графічна діаграма роботи трансформаторно-ключового регулятора напруги

Для реалізації обчислювальної моделі ТКРН (рис. 3) достатньо кількості компонентів базової бібліотеки *MatLab/Simulink*. Це: Constant – для задання характерних значень вхідної напруги $U_{1.1}$, $U_{1.2}$, $U_{1.3}$, $U_{1.4}$ та Gain – представлення відповідного коефіцієнта трансформації (K_{tn}). Інші компоненти візуальної моделі обчислень виконують функцію виведення одержаних результатів.

Для цього конкретного випадку (рис. 3, рис. 4) $\gamma = U_{2.2}/U_{2.1} = 230/210 = 1,0952$, тобто при коефіцієнті трансформації $K_{t2} = 1,0$ (при увімкнутому ключі K_2 , рис. 1) суміжні коефіцієнти повинні мати значення $K_{t1} = K_{t2} \times \gamma = 1,0952$, а $K_{t3} = K_{t2}/\gamma = 0,913$. Подібним чином визначаються і значення $U_{1.1} \dots U_{1.4}$, а різниця (рис. 4) $U_{1.4} - U_{1.1} = 251,9 - 191,7 = 60,2\text{ В}$ відповідає величині діапазону вхідної напруги U_1 .

Проте очевидно, що кожен індуктивний компонент ТКРН має свій внутрішній опір, в цьому випадку активно-індуктивного характеру, що можна представити як варіації цього опору в процесі зміни конфігурації ТКРН в процесі регулювання. Заналом з варіацією навантаження Z (рис. 1) це приводить до синхронних змін коефіцієнтів трансформації, вихідної напруги тощо.

Проаналізуємо схему, наведену на рис. 1. Увімкненому стану ключа K2 відповідає нульове значення внутрішнього опору ТКРН (при нехтуванні падінням напруги на ключах), а в інших станах (при увімкнених K1, або K3) його величина уже буде визначатися активним опором та індуктивністю розсіювання відповідних обмоток. Таким чином, це призводить до зменшення значень K_{t1} , K_{t3} за незмінної величини K_{t2} . Якщо допустити зменшення на K_{t1} і K_{t3} на 5 %, то розрахункова модель (рис. 5) та діаграма роботи ТКРН (рис. 6) дещо модифікуються та матимуть суттєво інший вигляд.

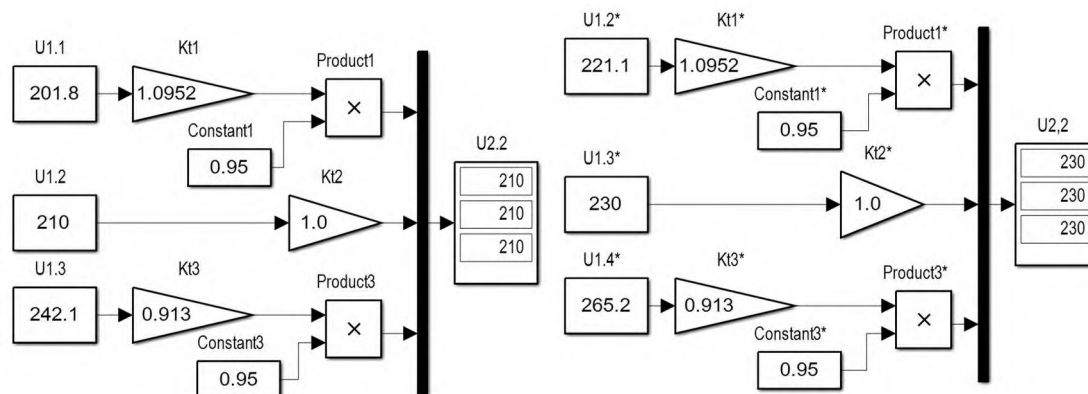


Рис. 5. Обчислювальна модель з урахуванням активного опору та індуктивності

Із порівняння рис. 4 та рис. 6 видно, що дещо збільшилось значення нижньої межі (201,8 В) діапазону вхідної напруги, проте більш суттєвим є розрив графічної діаграми роботи регулятора (230–242,1 В) при заданих межах U_2 (210–230 В). Це призводить до втрати працездатності системи шляхом переходу до стану автоколивальності в межах такого розриву. Відновлення функціональності можливо при зниженні значення $U_{2.1}$ до значення, меншого за величину проекції точки «а» (рис. 6) на вісь U_2 , проте це рівноцінно суттєвому збільшенню похибки регулювання.

Очевидно, що, як варіант, відновити якісні показники системи можна увімкнувши послідовно з ключем K2 (рис. 1) індуктивність, з характером повного опору, аналогічному еквівалентному опору автотрансформатора (Т) при його задіяній тій чи іншій секції (W2 або W3). Відповідно і розрахункова схема (рис. 5) повинна бути модифікована шляхом увімкнення двох додаткових компонентів (блоки перемноження – Product і відображення зменшення значення K_t – Constant), що виконують функцію зменшення задіяних у ТКРН відповідних коефіцієнтів трансформації. Після цього та у разі спрощення конфігурації розрахункової моделі (рис. 5) вона буде мати вигляд, наведений на рис. 7.

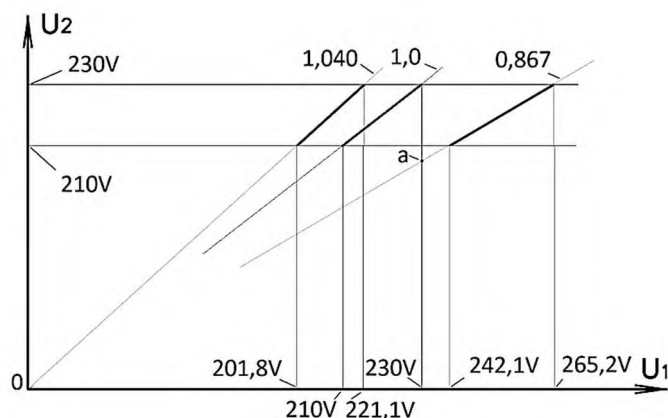


Рис. 6. Графічна діаграма роботи трансформаторно-ключового регулятора напруги по моделі рис. 5

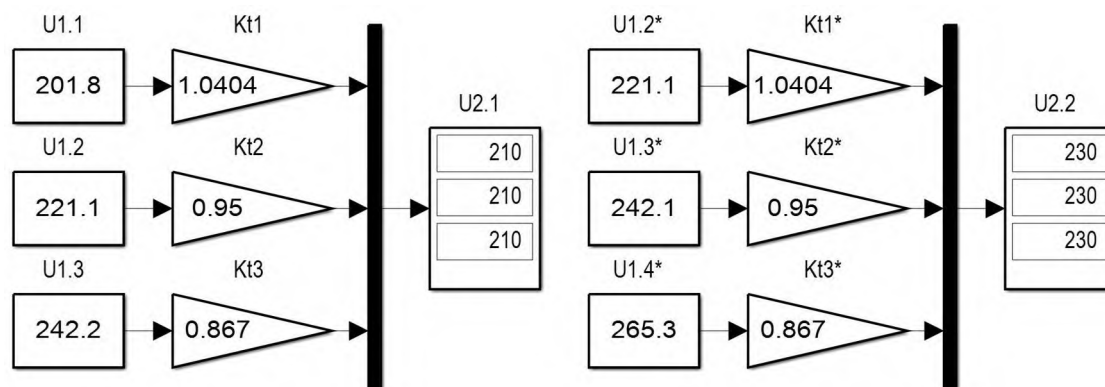


Рис. 7. Обчислювальна модель з урахуванням незмінності похибки регулювання

Цій розрахунковій моделі відповідає графічна діаграма роботи ТКРН, яка наведена на рис. 8.

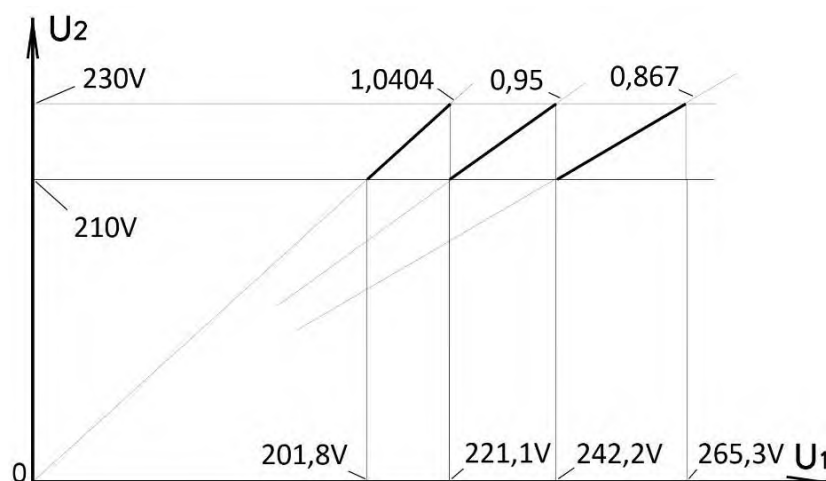


Рис. 8. Графічна діаграма роботи трансформаторно-ключового регулятора з незмінністю похибки регулювання

Якщо порівняти діаграму рис. 8 з аналогічною, характерною для режиму ХХ ТКРН, наведеною на рис. 4, то видно їх аналогічність по формі. Тобто таким способом виконано відновлення функціональності ТКРН при таких же значеннях у межах похибки регулювання ($U_{2\max} - U_{2\min} = 230 - 210$ В), як і при режимі ХХ.

Висновки. Таким чином, щоб забезпечити незмінність похибки регулювання у процесі роботи при зміні навантаження, вплив внутрішнього опору кожної наступної ступені регулювання трансформаторно-ключового пристрою на задіяний коефіцієнт трансформації K_t повинен бути таким, щоб відношення значень попереднього коефіцієнта $K_{t(n-1)}$ до наступного K_{tn} не перевищувало величину $\gamma = K_{t(n-1)}/K_{tn}$, що є характерним для режиму холостого ходу пристрою. При цьому робочий діапазон вхідної напруги відповідно зміститься, але форма діаграми роботи відносно вихідної напруги залишиться в тих самих межах.

Список використаних джерел

1. Vandoorn, T. L., De Kooning, J. D. M., Meersman, B., Guerrero, J. M., & Vandevelde, L. (2013). Voltage-Based control of a smart transformer in a microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(4), 1291-1305. <https://doi.org/10.1109/tie.2011.2165463>.
2. Липківський, К. О., Халіков, В. А., & Мажаровський, А. Г. (2012). Пристрій для регулювання величини напруги змінного струму (Патент № 67805, Україна). *Промислова власність*, (5).

3. Willems, W., Vandoorn, T. L., De Kooning, J. D. M., & Vandevelde, L. (2013b). Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. *У 2013 4th IEEE/PES innovative smart grid technologies europe (ISGT EUROPE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/isgteurope.2013.6695300>.

4. Huang, M., Dong, L., Zhang, J., Wang, J., & Hao, Z. (2014). Research on the differential protection algorithm of multi-tap special transformer. *Journal of Power and Energy Engineering*, 02(09), 98-105. <https://doi.org/10.4236/jpee.2014.29014>.

5. Adasur, M. P. P., & Chougule, D. G. (2016). *A review of power transformer tap switching using semiconductor devices*. *JournalNX – A Multidisciplinary Peer Reviewed Journal*, 2(6), 16-18. <https://repo.journalnx.com/index.php/nx/article/view/1025>.

6. Trentini, A. (2018). *The use of smart transformer in the presence of dispersed generation* (Master's thesis, Politecnico di Torino). Politecnico di Torino Institutional Repository.

7. Singh, D. K., Singh, J., & Ravela, R. R. (2020). Design and performance study of cost effective smart servo controlled automatic voltage stabilizer. *У 2020 international conference on electrical and electronics engineering (ICE3)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ice348803.2020.9122815>.

8. Липківський, К., & Можаровський, А. (2024). Узагальнення основних положень декомпозиції трансформаторно-ключових виконавчих структур регуляторів напруги з дискретно-разовим керуванням напівпровідниковими елементами. *Технічна електродинаміка*, (3), 036. <https://doi.org/10.15407/techned2024.03.036>.

References

1. Vandoorn, T. L., De Kooning, J. D. M., Meersman, B., Guerrero, J. M., & Vandevelde, L. (2013). Voltage-Based control of a smart transformer in a microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(4), 1291-1305. <https://doi.org/10.1109/tie.2011.2165463>.

2. Lypkivskyi, K. O., Khalikov, V. A., & Mozharovskyi, A. H. (2012). Prystrii dlia rehuliuвання velychyny napruhy zminnoho strumu. Patent. № 67805 na korysnu model vid 12.03.2012 r. (Ukraine).[Device for regulating the magnitude of alternating current voltage (Patent No. 67805, Ukraine)]. *Promyslova vlasnist – Industrial Property*, (5).

3. Willems, W., Vandoorn, T. L., De Kooning, J. D. M., & Vandevelde, L. (6-9 October 2013). Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. *4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT – Europe 2013)* (pp. 1-5). Lyngby, Denmark. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>.

4. Huang, M., Dong, L., Zhang, J., Wang, J., & Hao, Z. (2014). Research on the Differential Protection Algorithm of Multi-Tap Special Transformer. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2(9), 98-105. <https://doi.org/10.4236/jpee.2014.29014>.

5. Adasur, Mr Pramod Prakash, & D. G. (2016). Chougule. A review of power transformer tap switching using semiconductor devices. *Journal NX*, 2(6), 16-18. <https://repo.journalnx.com/index.php/nx/article/view/1025>.

6. Trentini, A. (2018). *The use of smart transformer in the presence of dispersed generation* [Diss. Politecnico di Torino].

7. Singh, D.K., Singh, J., & Ravela, R.R. (2020). Design and Performance Study of Cost Effective Smart Servo Controlled Automatic Voltage Stabilizer. *International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICE3)* (pp. 211-215). <https://doi.org/10.1109/ICE348803.2020.9122815>.

8. Lipkivskyi, K., & Mozharovskyi, A. (2024). Uzahalennia osnovnykh polozhen dekompozitsiyi transformatorno-klyuchovykh vykonavchykh struktur rehulyatoriv napruhy z dyskretno-razovym keruvannyam napivprovodnikovymy elementamy [Generalisation of the main provisions of the decomposition of transformer-key executive structures of voltage regulators with discrete single-shot control by semiconductor elements]. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamic*, (3), 36-40. <https://doi.org/10.15407/techned2024.03.036>.

Отримано 10.08.2025

Volodymyr Khalikov¹, Anatolii Zhernosekov², Alexander Shatan³

¹Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Senior Lecturer of Electrical Networks and Systems Department
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky KPI» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: xvavlad@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1691-5005>

²Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher,
Head of Department of Impulse Processes and Arc Welding Technologies E. O. Paton Electric Welding Institute (PWI) (Kyiv, Ukraine)

E-mail: zhernosekov@paton.kiev.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6404-2221>

³Scientific Researcher

E. O. Paton Electric Welding Institute (PWI) (Kyiv, Ukraine)

E-mail: shatanaf57@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6553-7421>

VOLTAGE REGULATION OF THE TRANSFORMER-SWITCHED DEVICE

Discrete-one-time voltage regulation by switching the appropriate taps of the power transformer and correspondingly changing its transformation ratio is the most common and obvious way to achieve the desired results. The synthesis of such voltage regulation actuators is based on a combination of multi-winding transformers and switches. The effect of the internal resistance of the transformer windings is often not taken into account. This affects the accuracy of maintaining the required voltage at the device output. The paper shows that this leads to a violation of the visual integrity of the graphic diagram of the operation of the regulating body, which can lead to a disruption of the operation of the control system, or the need to significantly increase the regulation error. Using graphical tools and MatLab/Simulink, it is shown that it is possible to avoid this problem by simple means. Understanding the problem is shown on a simple example of implementing a three-key power transformer-key voltage regulator, which must ensure that the output voltage level is maintained within specified limits during variations in the input voltage and load magnitude.

To ensure that the control error remains constant during operation when the load changes, the effect of the internal resistance of each subsequent control stage of the transformer-switch device on the transformation ratio involved must be such that the ratio of the values of the previous coefficient to the next does not exceed the same value. For such discrete-time voltage regulators, this value should be the same as for the idle mode. In general, this ratio also determines the regulation error of the system.

Keywords: transformer; switch; switching; voltage regulation; simulation; Simulink.

Fig.: 8. References: 8.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-379-389](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-379-389)

УДК 621.314

Володимир Іванович Яськів¹, Ігор Феліксович Домнін², Анна Володимирівна Яськів³

¹доктор технічних наук, професор кафедри радіотехнічних систем
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Тернопіль, Україна)
E-mail: yaskiv@yahoo.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0043-3909>. ResearcherID: KBC-7954-2024
SCOPUS Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6507314717>

²доктор технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту іоносфери НТУ «ХПІ»
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків, Україна)
E-mail: domninpro@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9824-4403>
SCOPUS Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=36092533000>

³кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних систем
Економічний університет у Вроцлаві (Вроцлав, Польща)
E-mail: anna.yaskiv@ue.wroc.pl. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1806-1322>
SCOPUS Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59545123700>

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З ВИСОКОЧАСТОТНИМИ МАГНІТНИМИ ПІДСИЛЮВАЧАМИ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Розроблено та досліджено концепцію побудови енергетичного забезпечення засобів інформаційних технологій на основі напівпровідникових перетворювачів із високочастотними магнітними підсилювачами з високою якістю вихідних напруг, високим рівнем динамічних характеристик, високою ефективністю та надійністю, низькою собівартістю.

Описано розроблений перетворювач електроенергії на вихідні параметри 5 В, 50 А для інформаційного табло. Представлено запропонований нерегульований високочастотний транзисторний інвертор (силовий автогенератор) для сумісної роботи з регуляторами напруги на основі високочастотних магнітних підсилювачів. Проведено експериментальне дослідження динамічних характеристик розробленого перетворювача. Використано запропонований метод зменшення втрат у силовому автогенераторі при побудові перетворювача електроенергії на вихідні параметри: 24 В, 10 А, коефіцієнт корисної дії його 92 %. Наведено методи підвищення ефективності енергетичного забезпечення інформаційних технологій за рахунок використання синхронного випрямлення та забезпечення режимів роботи польового транзистора замість зворотного діода у вихідному фільтрі у функції напруг дроселів насичення високочастотних магнітних підсилювачів без введення жодних додаткових зворотних зв'язків чи драйверів в їх схемотехніку. При цьому коефіцієнт корисної дії перетворювача на вихідні параметри 24 В, 15 А сягнув 95,7 %.

Ключові слова: напівпровідниковий перетворювач електроенергії; інформаційні технології; високочастотний магнітний підсилювач; прямокутна петля гістерезису; стабілізатор напруги; ефективність.

Рис.: 10. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Сучасні інформаційні технології задля свого ефективного функціонування потребують відповідного енергетичного забезпечення. На сьогодні ці функції виконують високочастотні напівпровідникові перетворювачі електроенергії (НПЕ), проєктування яких ведеться за даними замовника відповідно до таких критеріїв:

- забезпечення функціональних параметрів;
- ефективності;
- надійності;
- масо-габаритних показників;
- ціни.

У кожному випадку висуваються свої вимоги до НПЕ. Однак, зрозуміло, що найбільші значення вагових коефіцієнтів при перших чотирьох критеріях можуть бути досягнуті тільки за рахунок ціни. Тому актуальним є дослідження, яке б дозволило реалізувати НПЕ для засобів інформаційних технологій з високим рівнем експлуатаційних характеристик при мінімальних фінансових затратах.

Постановка проблеми. Специфіка роботи засобів інформаційних технологій формує особливий набір вимог до їх енергетичного забезпечення, які можна окреслити таким чином:

- висока якість вихідних напруг у 100 % діапазоні зміни струму навантаження;
- часто високий рівень струму навантаження;
- високий рівень динамічних характеристик;
- низький рівень електромагнітних завад;

- високий рівень ефективності та надійності;
- задовільний рівень масо-габаритних показників;
- споживач часто потребує кілька рівнів напруг із різними діапазонами зміни їх струмів навантаження.

Тому виникає необхідність у створенні відповідного енергетичного забезпечення, яке б дозволило в комплексі вирішити поставлені завдання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Поява сучасних високочастотних магнітом'яких матеріалів спричинила подальший розвиток тієї частини перетворювальної техніки, яка базується на використанні техніки магнітного підсилення і перетворення. Основними елементами її є силові комутаційні елементи, реалізовані на високочастотних магнітних підсилювачах (ВМП) [1-11]. Високий рівень технічних характеристик використовуваних магнітних матеріалів (аморфних сплавів з прямокутною петлею гістерезису (ППГ)) та простота методів керування ВМП на їх основі дозволяють отримати високоефективні імпульсні стабілізатори постійної напруги (ІСПН) зі 100 % діапазоном зміни струму навантаження та високим рівнем питомих показників.

За своєю суттю ВМП – це однообмотковий швидкодіючий магнітний підсилювач (дросель насичення), робочий цикл якого на високій частоті (50-100 кГц) забезпечується за рахунок рознесення в часі півперіоду керування та робочого півперіоду випрямним та розмагнічуючим діодами. При цьому широтно-імпульсна модуляція в робочий півперіод забезпечується зміною глибини розмагнічення у функції сигналу керування в керуючий півперіод, що призводить до зміни співвідношення часів насиченого та ненасиченого станів МК в межах одного періоду.

Таким чином, структура багатоканального НПЕ набуває вигляду – нерегульований високочастотний транзисторний інвертор, у вторинних обмотках силового трансформатора якого ввімкнені ІСПН на ВМП.

Переваги магнітного ключа на ВМП порівняно з транзисторним ключем є суттєвими:

- є ключем змінної напруги;
- не критичний до форми вхідної напруги;
- коефіцієнт підсилення по струму до 1000;
- простота схеми керування (1-2 транзистори в лінійному режимі);
- не є джерелом електромагнітних завад;
- є фільтром вхідних завад (як в ненасиченому, так і в насиченому станах);
- високий ККД (99 %), втрати не залежать від струму навантаження;
- висока радіаційна і механічна стійкість;
- не вимагає захисту (сам слугує елементом захисту транзисторного перетворювача);
- багатофункціональність: підсилювач потужності, силовий комутаційний елемент, широтно-імпульсний модулятор, виконує функції інтегратора, компаратора, елементу захисту.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що саме напівпровідникові перетворювачі на основі високочастотних магнітних підсилювачів є перспективними для живлення засобів інформаційних технологій. Однак вони вимагають дослідження динамічних характеристик та використання доробку авторів у напрямку підвищення ефективності перетворювачів саме для живлення засобів інформаційних технологій.

Метою статті є розроблення та дослідження концепції побудови енергетичного забезпечення засобів інформаційних технологій на основі напівпровідникових перетворювачів із високочастотними магнітними підсилювачами з високою якістю вихідних напруг, високим рівнем динамічних характеристик, високою ефективністю та надійністю, низькою собівартістю.

Виклад основного матеріалу. Для живлення інформаційного табло було розроблено перетворювач на вихідні параметри 3 В, 50 А, структурна схема якого представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структурна схема досліджуваного джерела живлення:

1 – заводозахисний фільтр; 2 – мережевий випрямляч; 3 – пристрій заряду конденсатора;
4 – ємнісний фільтр; 5 – нерегульований високочастотний транзисторний інвертор;
6 – силовий високочастотний трансформатор; 7 – імпульсний стабілізатор постійної напруги на ВМІІ

Як видно із структурної схеми, досліджуваний пристрій складається з двох основних незалежних частин, пов'язаних між собою силовим високочастотним трансформатором, а саме: нерегульованого високочастотного транзисторного інвертора і стабілізатора постійної напруги на ВМІІ. У ролі високочастотного транзисторного інвертора використано розроблений авторами нерегульований силовий автогенератор [12] по півмостовій схемі з додатними зворотними зв'язками за вихідною напругою інвертора й за струмом колектора (рис. 2.). Особливістю його є використання високочастотного дроселя насичення з матеріалу з прямокутною петлею гістерезису в колі зворотного зв'язку за напругою, час повного перемагнічування якого в режимі джерела струму визначає тривалість півперіоду робочої частоти комутації інвертора, яка є стабільною в усьому діапазоні зміни вхідної напруги живлення та струму навантаження.

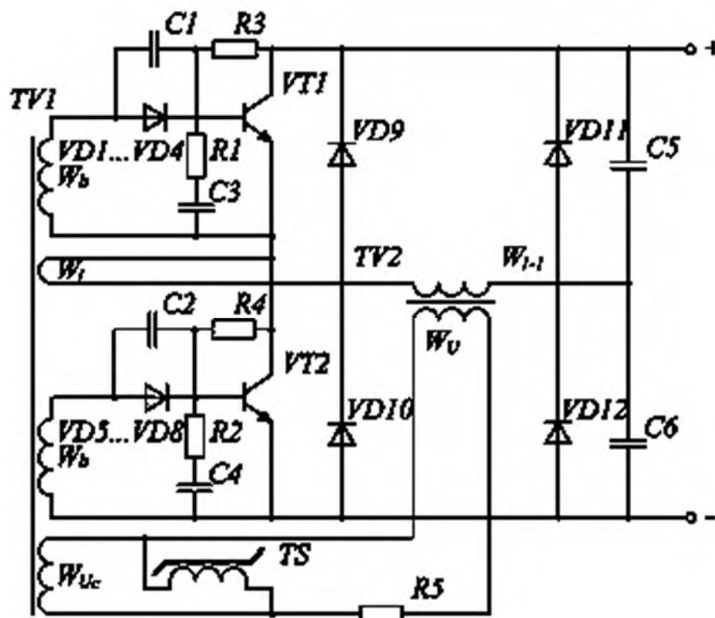


Рис. 2. Схема високочастотного нерегульованого транзисторного інвертора

До основних переваг інвертора належать: високий рівень ефективності та надійності; низький рівень електромагнітних завад; висока стабільність частоти комутації у широкому діапазоні зміни вхідної напруги та при 100 % діапазоні зміни струму навантаження; простота топології – відсутність схеми керування транзистором, не потрібно

додаткове джерело живлення для схеми керування; м'який старт починається з високої частоти комутації; відсутність асиметрії намагніченості силового трансформатора; при перевантаженні виходить з ладу лише один транзистор; низька вартість.

Стабілізатор вихідної напруги реалізовано на ВМП по двотактній схемі з середньою точкою. Функціональна схема досліджуваного джерела живлення подана на рис. 3.

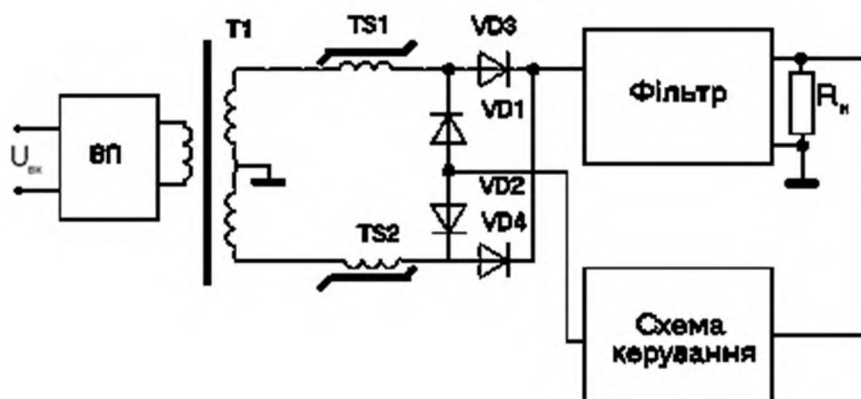


Рис. 3. Функціональна схема досліджуваного джерела живлення

Для аналізу динаміки розробленого джерела живлення функціональна схема стабілізатора напруги на ВМП може бути подана в частотній області структурною схемою (рис. 4), де K – коефіцієнт підсилення схеми керування, $W_{TS}(p)$ – функція передачі ВМП, $W_{\phi}(p)$ – функція передачі вихідного фільтра, β – коефіцієнт подільника вихідної напруги.

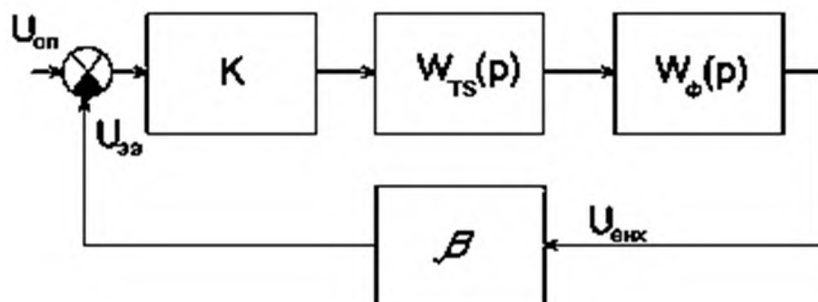


Рис. 4. Структурна схема досліджуваного джерела живлення в частотній області

У нашому випадку вихідний фільтр реалізовано у вигляді двокаскадного LC-фільтра. Функція передачі дроселя насичення (у т. ч. для ВМП) може бути подана як

$$W_{TS} = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta I_y},$$

де ΔI_y – приріст струму керування;

$\Delta U_{вих}$ – відповідний приріст вихідної напруги в магнітному підсилювачі (напруга на навантаженні).

Відношення приросту вихідної напруги магнітного підсилювача до відповідного приросту струму керування є так званим передавальним опором K_R , який може бути виражений через основні параметри магнітного підсилювача таким чином

$$K_R = \frac{2fW^2S \times \Delta B_y}{\Delta H_y l} = 2fW^2 \frac{S}{l} \mu_0 \mu_d,$$

де f – робоча частота;

W – кількість витків обмотки;

S – активна площа перерізу осердя ВМП;

l – середня довжина магнітної лінії;

μ_0 – абсолютна магнітна проникність;

μ_d – динамічна магнітна проникність (за динамічною кривою розмагнічення);

ΔH_y – приріст напруженості зовнішнього поля у півперіод керування;

ΔB_y – відповідний приріст індукції.

В інший спосіб K_R може бути виражений таким чином

$$K_R = \frac{U_1 W^2}{H_m l} = r_B W^2,$$

де H_m – напруженість поля повного перемагнічування на заданій частоті;

U_1 – приведені значення напруги насичення на один виток;

r_B – еквівалентний опір перемагнічування на один виток.

Оскільки зміна вихідної напруги ВМП є функцією струму керування в попередній півперіод керування, то його можна розглядати як ланку із запізненням. Час запізнення рівний півперіоду частоти напруги живлення. Функція передачі ВМП з урахуванням часу запізнення має вигляд

$$W_{TS}(p) = K_R \cdot \exp(-pT/2).$$

Динаміка джерела живлення буде визначатись лише параметрами елементів стабілізатора напруги на ВМП, оскільки час перемикання транзисторних ключів високочастотного інвертора є на кілька порядків меншим за час комутації магнітного підсилювача.

Зовнішній вигляд досліджуваного джерела живлення на вихідні параметри 5 В, 50 А представлено на рис. 5. Дослідний зразок виготовлено в межах виконання спільного проєкту за Програмою українсько-китайського науково-технічного співробітництва. Його експериментальні дослідження проводились у лабораторіях фірми Jinan Rongda Electronics Co., Ltd (м. Цзинань, КНР) і в лабораторії систем вторинного електроживлення ТНТУ (Тернопіль, Україна).



Рис. 5. Зовнішній вигляд досліджуваного джерела живлення на вихідні параметри 5 В, 50 А

Основні технічні дані дослідного зразка джерела живлення:

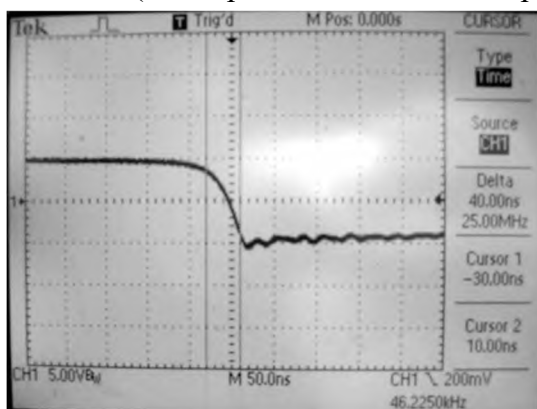
- | | |
|---|---------------------|
| - вхідна напруга | 135...270 В, 50 Гц; |
| - вихідна напруга | 5 В; |
| - струм навантаження | 0...50 А; |
| - робоча частота | 5 0 кГц; |
| - ККД | 70-80 %; |
| - загальна нестабільність вихідної напруги | <1 %; |
| - високочастотні пульсації вихідної напруги | 20 мВ; |
| - подвійний розмах високочастотних піків | <100 мВ; |

- питома потужність при природньому охолодженні
- габарити

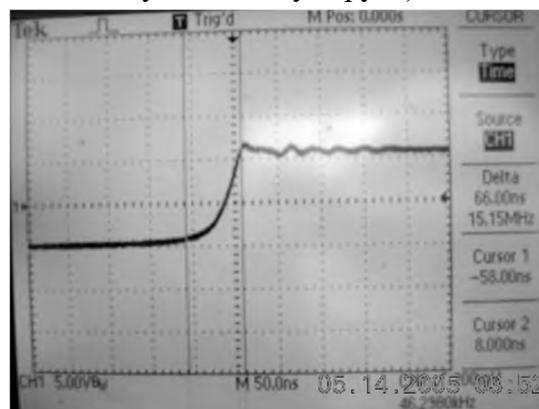
130 Вт/дм³;
100×220×60 мм.

Для експериментальних досліджень динаміки розробленого джерела живлення використовувалась наступна вимірювальна апаратура: осцилограф «Tektronix TDS1012» та програмоване електронне навантаження «Chroma 63103».

На рис. 6 показано осцилограми напруг, отриманих з одного витка силового високо-частотного трансформатора, які ілюструють процеси перемикання силових транзисторних ключів (час перемикання 40-50 нс при номінальному вихідному струмі).



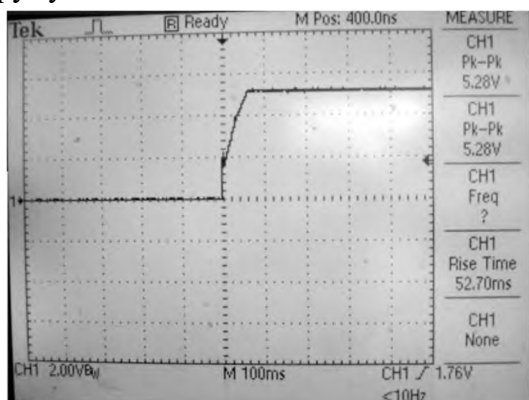
а



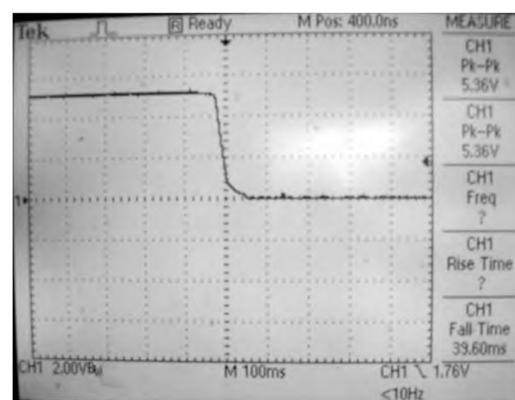
б

Рис. 6. Передній (а) та задній (б) фронти на силовому ключа при його комутації в транзисторному нерегульованому інверторі (силовому автогенераторі) при номінальному вихідному навантаженні

Рис. 7 ілюструє процеси зміни вихідної напруги при ввімкненні джерела живлення в первинну мережу та його вимкненні. Тривалість перехідних процесів знаходиться на рівні 50 мс. Осцилограми, подані на рис. 8, ілюструють перехідні процеси вихідної напруги при дії циклічного навантаження частотою 5 кГц із щільністю двійка при зміні струму навантаження в межах 0-100 % та 60-100 % відповідно.



а



б

Рис. 7. Перехідний процес вихідної напруги:
а – при ввімкненні джерела; б – при вимкненні джерела живлення при номінальному вихідному навантаженні

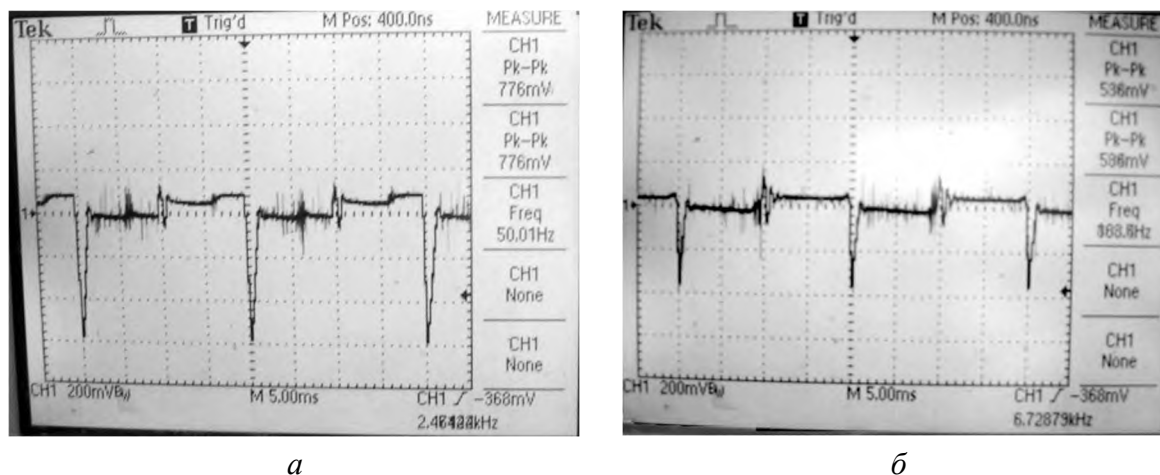


Рис. 8. Перехідні процеси вихідної напруги при дії циклічного навантаження частотою 5 кГц з цілинністю двійка при зміні навантаження:
а – в межах 0-100 %; б – в межах 60-100 %

Як видно з наведених результатів досліджень:

- в усіх випадках відсутні будь-які перерегулювання вихідної напруги;
- тривалість перехідних процесів є мінімальною;
- надзвичайно малий час переключення силових біполярних транзисторів високочастотного перетворювача.

Таким чином, досягнутий результат є наслідком правильного поєднання напівпровідникових та магнітних елементів із забезпеченням оптимальних режимів їхньої роботи. Для досягнення схожих результатів традиційними методами постає складна задача синтезу відповідних схем керування силовими ключами.

На рис. 9 наведено графік залежності коефіцієнта корисної дії від струму навантаження, отриманий для різних значень вхідної напруги.

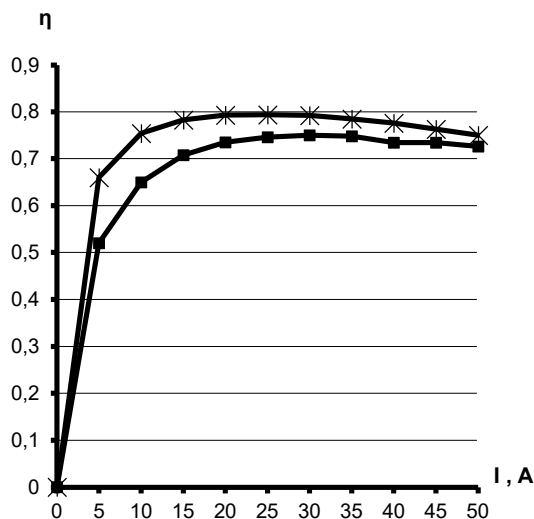


Рис. 9. Графік залежності коефіцієнта корисної дії від струму навантаження при різних значеннях вхідної напруги:

- * – для напруги 150 В, 50 Гц;
- – для напруги 220 В, 50 Гц

Підвищення ефективності перетворювача за запропонованою структурою можливе за рахунок зменшення втрат на резисторі R_5 , який задає струм перемагнічення дроселю насичення TS у високочастотному нерегульованому транзисторному інверторі [12]. З цією метою було запропоновано використати генератор струму, як показано на рис. 10. Це дозволило на порядок зменшити втрати в колі додатного зворотного зв'язку за вихідною напругою інвертора.

Саме таке рішення було використано при розробці НПЕ для інформаційних технологій на вихідні параметри 24 В, 10 А і дозволило досягнути ККД на рівні 92 % при живленні від мережі промислової частоти. Для порівняння був поміряний ККД аналогічного перетворювача тайванського виробництва, який склав 88 %.

Наступне підвищення коефіцієнта корисної дії є можливим за рахунок зменшення втрат на діодах вихідного випрямляча. Так, у роботі [13] авторами запропоновано використання синхронного випрямляча в перетворювачі на ВМП. У запропонованому стабілізаторі постійної напруги забезпечується високий рівень коефіцієнта корисної дії за рахунок того, що у двотактному випрямлячі із середньою точкою використано польові транзистори, які керуються синхронно від відповідних вторинних обмоток силового високочастотного трансформатора. А поява наскрізних струмів у двотактній схемі є неможливою завдяки принципу роботи ІСПН на ВМП – силовий струм у робочий півперіод ВМП у кожному плечі двотактної схеми з'являється після досягнення насичення матеріалу осердя ВМП. Тобто завжди перекомутація у двотактній схемі відбувається при відсутності струму навантаження в силовому колі. Саме це дозволило безпосереднє використання синхронних випрямлячів (без введення будь-яких додаткових елементів чи схем керування ними) в ІСПН на ВМП і створило передумови для побудови НПЕ з високим рівнем струму навантаження (десятки-сотні ампер) при високому коефіцієнті корисної дії перетворювача в цілому з мінімальними фінансовими затратами.

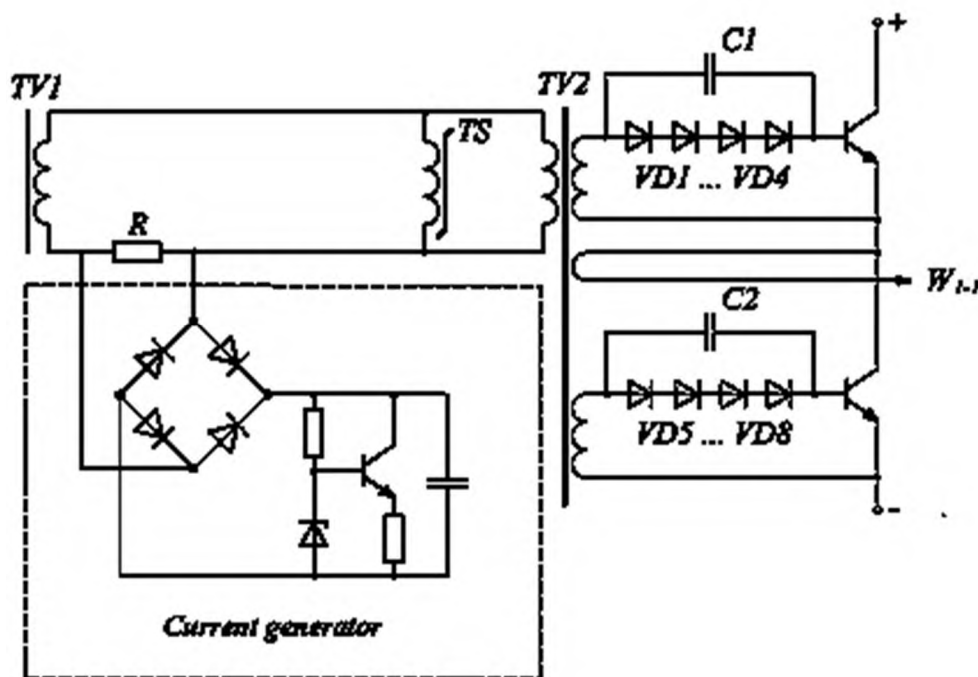


Рис. 10. Генератор струму на напівпровідникових компонентах у колі додатного зворотного зв'язку за вихідною напругою високочастотного нерегульованого транзисторного інвертора

Окрім того, в запропонованому стабілізаторі постійної напруги забезпечується високий рівень коефіцієнта корисної дії за рахунок і того, що у вихідному фільтрі встановлено польовий транзистор, який керується напругами додатково встановлених відповідних обмоток керованих дроселів насичення без введення будь-яких додаткових елементів чи схем керування (драйверів). Пропонований метод реалізації ІСПН на ВМП із синхронним випрямленням забезпечує 100 % діапазон зміни струму навантаження при дії всіх збурюючих факторів.

Так, для перетворювача на вихідні параметри 24 В, 15 А при живленні його від джерела постійної напруги 310 В (еквівалент мережі промислової частоти) при використанні запропонованих методів ефективність його досягла 95,7 %, а в діапазоні зміни струму навантаження від 3 А до 11 А знаходиться в межах 94-95,7 %.

Забезпечення високого рівня ККД забезпечується при низькій собівартості перетворювача. Так, вартість досліджуваного дослідного зразка на вихідну потужність до 400 Вт на робочій частоті 50 кГц, реалізованого за структурою: високочастотний нерегульований транзисторний перетворювач напруги (силовий автогенератор) і ІСПН на ВМП у вторинному колі, становить менше 20 \$, що співмірно з вартістю одного силового приладу по GaN-технології.

Висновок. Запропоновано та досліджено концепцію побудови енергетичного забезпечення засобів інформаційних технологій на основі напівпровідникових перетворювачів із високочастотними магнітними підсилювачами, яка передбачає використання наступної структури: нерегульований високочастотний інвертор, у вторинних обмотках силового трансформатора якого ввімкнені ІСПН на ВМП. Переваги:

- висока якість вихідних напруг (відсутня низькочастотна складова, мінімальні високочастотна складова та високочастотні піки);
- високий рівень динамічних характеристик (відпрацювання збурення здійснюється за час, рівний півперіоду робочої частоти комутації, відсутні будь-які перерегулювання в перехідних режимах, перехідний процес завершується в момент досягнення регульованою величиною її усталеного значення);
- висока ефективність;
- вища надійність за рахунок як фізичної природи МК, так і суттєвого спрощення схемотехніки;
- можливість реалізації високого рівня струму навантаження;
- нижча собівартість;
- широкий діапазон зміни вхідної напруги;
- високий рівень питомої потужності;
- високий рівень уніфікації – можливість використання одного типорозміру осердя ВМП та одних і тих же схемотехнічних рішень для реалізації НПЕ в широкому діапазоні вихідних параметрів;
- можливість реалізації багатоканальних ДВЕЖ із рівноцінними і незалежними вихідними каналами із 100 % діапазоном зміни струму навантаження.

Список використаних джерел

1. Harada K., & Nabeshima T. (1988). Applications of magnetic amplifiers to high-frequency DC-to-DC converters. *Proceedings of the IEEE*, 4 (76), 355-361. <https://doi.org/10.1109/5.4422>.
2. Lee, J., Chen, D. Y., & Jamerson, C. (1988). Magamp postregulators: Practical design considerations to allow operation under extreme loading conditions. *Proceedings of the IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 1988)*, 368-376.
3. Jamerson, C., & Chen, D. Y. (1993). Magamp postregulators for symmetrical topologies with emphasis on half-bridge configuration. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 8(1), 26-29.
4. Wen, C. C., Chen, C. L., Chen, W., & Jiang, J. (2001). Magamp post regulation for flyback converter. *Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, 333-338. <https://doi.org/10.1109/PESC.2001.954042>.

5. Chen W., Han J., & Wen C. C. (2002). Bi-directional resetting scheme of the magamp post-regulator. *In Proceedings of the IEEE Applied Power Electronics Conference*, 838-842.
6. Chen C.-L., & Wen C.-C. (2005). Magamp application and limitation for multiwinding flyback converter. *IEE Proceedings – Electric Power Applications*, 3(152), 517-525. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:20040829>.
7. Chen W., & Hui S. Y. (2011). A Dimmable Light-Emitting Diode (LED) Driver with Mag-Amp Postregulators for Multistring Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 6 (26), 1714-1722.
8. Austrin L. (2007). On Magnetic Amplifiers in Aircraft Applications. Royal Institute of Technology. Sweden. Electromagnetic Engineering, School of Electrical Engineering.
9. Yao, W.-X., Hong, X.-Y., & Lu, Z.-Y. (2008). A novel current-sharing scheme based on magamp. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 9(8), 1150-1156. <https://doi.org/10.1631/jzus.A0720112>.
10. Mamano, B. (n.d.). *Magnetic amplifier control for simple, low-cost, secondary regulation* (SLUP129). Unitrode Corp. Retrieved from <http://www.ti.com/lit/ml/slup129/slup129.pdf>.
11. NASA Technical Reports Server (NTRS). (1993, March 1). *Large space structures and systems in the space station era: A bibliography with indexes (Supplement 05)* (NASA SP-7085(05), Document ID 19940009938). Retrieved from https://archive.org/details/NASA_NTRS_Archive_19940009938/page/n145/mode/2up.
12. Yaskiv V., & Oleg Yurchenko. (2020). Unregulated Transistor Inverter for High-Frequency MagAmp Power Converters. *Computational Problems of Electrical Engineering*, 1(10), 45-50. <https://doi.org/10.23939/jcpee2020.01.045>.
13. Яськів, В. І., Юрченко, О. М., & Яськів, А. В. (2025). Синхронний випрямляч в імпульсному стабілізаторі постійної напруги на основі високочастотних магнітних підсилювачів. *Технічна електродинаміка*, 1, 35-41. <https://doi.org/10.15407/techned2025.01.035>.

References

1. Harada K., & Nabeshima T. (1988). Applications of magnetic amplifiers to high-frequency DC-to-DC converters. *Proceedings of the IEEE*, 4 (76), 355-361. DOI:10.1109/5.4422.
2. Lee, J., Chen, D. Y., & Jamerson, C. (1988). Magamp postregulators – practical design considerations to allow operation under extreme loading conditions. *Proceedings of IEEE APEC*. 1988. (P. 368-376).
3. C. Jamerson, & D. Y. Chen. (1993). Magamp Postregulators for Symmetrical Topologies with Emphasis on Half-Bridge Configuration. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1(8), 26-29.
4. Wen C. C., Chen C. L., Chen W., & Jiang J. (2001). Magamp Post Regulation for Flyback Converter. *Proceedings of the IEEE Power Electron. Spec. Conf., PESC Record*, (P. 333-338). DOI: 10.1109/PESC.2001.954042.
5. Chen W., Han J., & Wen C. C. (2002). Bi-directional resetting scheme of the magamp post-regulator. *Proceedings of the IEEE Applied Power Electronics Conference*. (P. 838-842).
6. Chen C.-L., & Wen C.-C. (2005). Magamp application and limitation for multiwinding flyback converter. *IEE Proceedings – Electric Power Applications*, 3(152), 517-525. DOI: 10.1049/ip-epa:20040829.
7. Chen W., & Hui S. Y. (2011). A Dimmable Light-Emitting Diode (LED) Driver with Mag-Amp Postregulators for Multistring Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 6 (26), 1714-1722.
8. Austrin L. (2007). On Magnetic Amplifiers in Aircraft Applications. Royal Institute of Technology. Sweden. Electromagnetic Engineering, School of Electrical Engineering.
9. Yao W.-X., Hong X.-Y., & Lu Z.-Y. (2008). A novel current-sharing scheme based on magamp. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 1150-1156. DOI: 10.1631/jzus.A0720112.
10. Mamano, B. (n.d.). *Magnetic amplifier control for simple, low-cost, secondary regulation* (SLUP129). Unitrode Corp. Retrieved from <http://www.ti.com/lit/ml/slup129/slup129.pdf>.
11. NASA Technical Reports Server (NTRS) 19940009938: Large space structures and systems in the space station era: A bibliography with indexes (supplement 05). 139. https://archive.org/details/NASA_NTRS_Archive_19940009938/page/n145/mode/2up.
12. Yaskiv V., & Yurchenko, O. (2020). Unregulated Transistor Inverter for High-Frequency MagAmp Power Converters. *Computational Problems of Electrical Engineering*, 1(10), 45-50. DOI: <https://doi.org/10.23939/jcpee2020.01.045>.

13. Yaskiv V. I., Yurchenko O. M., & Yaskiv A. V. (2025). Synchronnyi vypriamlach v impulsnomu stabilizatori postiinoi napruhy na osnovi vysokot chastotnykh mahnitnykh pidsyluvatchiv [Synchronous rectifier in DC voltage stabilizer based on high-frequency magnetic amplifiers]. *Tekhnichna Elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 1, 35-41. <https://doi.org/10.15407/techned2025.01.035>.

Отримано 20.09.2025

UDC 621.314

Volodymyr Yaskiv¹, Ihor Domnin², Anna Yaskiv³

¹Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Radio Engineering Department
Ternopil Ivan Puluj National Technical University (Ternopil, Ukraine)

E-mail: yaskiv@mail.yahoo.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0043-3909>. **ResearcherID:** IZE-2184-2023

SCOPUS Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6507314717>

²Doctor of Engineering Sciences, Leading Researcher, Institute of Ionosphere
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: domninpro@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9824-4403>

SCOPUS Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=36092533000>

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Information Systems Department
Wroclaw University of Economics (Wroclaw, Poland)

E-mail: anna.yaskiv@ue.wroc.pl. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1806-1322>

SCOPUS Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59545123700>

SEMICONDUCTOR POWER CONVERTERS WITH HIGH-FREQUENCY MAGNETIC AMPLIFIERS FOR INFORMATION TECHNOLOGIES

Modern information technologies require appropriate power supply systems to function efficiently. Therefore, it is relevant to conduct research that enables the implementation of semiconductor power converters for information technology devices with high operational performance and minimal financial costs.

The operational specifics of information technology devices imposes particular set of requirements on their power supply systems, which can be summarized as follows: high quality of output voltages across the 100 % range of load current variation, often a high level of load current, high efficiency, reliability, and dynamic characteristics, low electromagnetic interference, and satisfactory weight and size characteristics. Additionally, consumers often require multiple voltage levels with different load current ranges.

The aim of the article is to develop and investigate a concept for designing power supply systems for information technology devices based on semiconductor converters with high-frequency magnetic amplifiers that provide high output voltage quality, superior dynamic characteristics, high efficiency and reliability, and lower cost.

A developed power converter with output parameters of 5 V and 50 A for an information display is described. A proposed unregulated high-frequency transistor inverter (power self-oscillator) designed to operate together with voltage regulators based on high-frequency magnetic amplifiers is presented. Experimental studies of the dynamic characteristics of the developed converter were conducted. The proposed method for reducing losses in the power self-oscillator was used to build a power converter with output parameters of 24 V and 10 A, achieving an efficiency of 92 %. The paper also presents methods for improving the efficiency of power supplies for information technology systems using synchronous rectification and by enabling field-effect transistor operation instead of a reverse diode in the output filter, in a function of the voltages across the windings of the saturable cores of the high-frequency magnetic amplifiers, without introducing any additional feedback or driver circuits. As a result, the efficiency of the converter with output parameters of 24 V and 15 A reached 95,7 %.

A concept for building power supply systems for information technology devices based on semiconductor converters with high-frequency magnetic amplifiers is proposed and investigated. This concept consists in the use of the following structure: an unregulated high-frequency transistor inverter (power self-oscillator), in whose the secondary circuits the pulse voltage stabilizers based on high-frequency magnetic amplifiers are connected. The advantages of this approach include high quality of output voltages, high level of dynamic performance, efficiency, and reliability, the ability to operate at high load currents, lower cost at wide range of change of input voltage, high power density, and unification.

Keywords: semiconductor power converter; information technology; high-frequency magnetic amplifier; rectangular hysteresis loop; voltage stabilizer; efficiency.

Fig.: 10. References: 10.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-390-400](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-390-400)

УДК 669.117.56.002.6

Володимир Георгійович Соловйов¹, 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, за якої клема живлення струмопідвідної секції кристалізатора з'єднана з клемою піддона. 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.: 12.

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. Попри 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 шляхом регулювання електромагнітних процесів у шлаковій ванні, розширює технологічні можливості, наприклад, наплавлення шару завтовшки до десятків сантиметрів за один прохід, виробництва біметалевих труб з корозійно-стійким покриттям, наплавлення прокатних валків та штамсів тощо.

Постановка проблеми. Процес ЕШН у стаціонарному СПК вимагає стабільності для забезпечення високої якості наплавленого металу. Стабільність такого 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 та 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 плоскостонного 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 переплаві (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 збільшується 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 у 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, окрім [8; 9], проблеми стабілізації процесу розглядалися переважно для кристалізаторів канонічного типу. Однак для СПК найважливішим дестабілізаційним 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.

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

Ця 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].

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_p) 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.

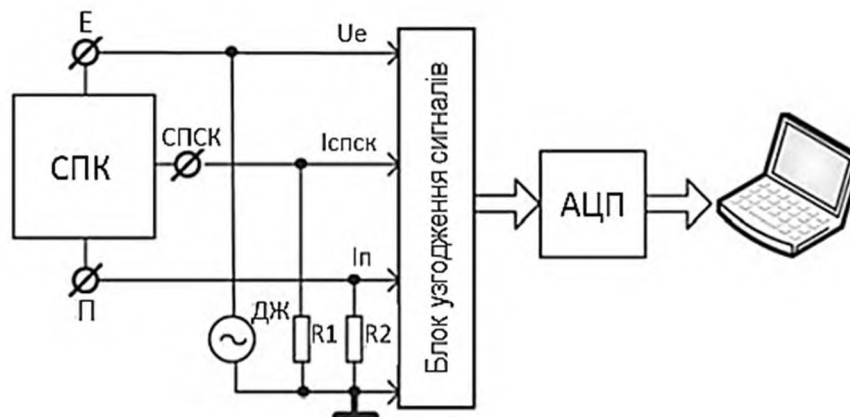


Рис. 1. Схема підключення джерела живлення до стаціонарного струмопровідного кристалізатора

За допомогою програмного забезпечення PowerGraph розраховувалися ефективні (діючі) значення вхідних сигналів змінного струму, які зберігалися в пам'яті комп'ютера. Струм джерела живлення ($I_{\text{дж}}$) 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 цього експерименту характеризувався набагато меншою провідністю каналу «електрод–піддон», ніж режим експерименту з наплавлення за схемою типу «П» (із загальним піддоном), за якого 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 їхня амплітуда відносно зменшилася. Аналіз частоти та амплітуди цих коливань дозволив встановити, що вони корелюють зі змінами провід-

ності 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.

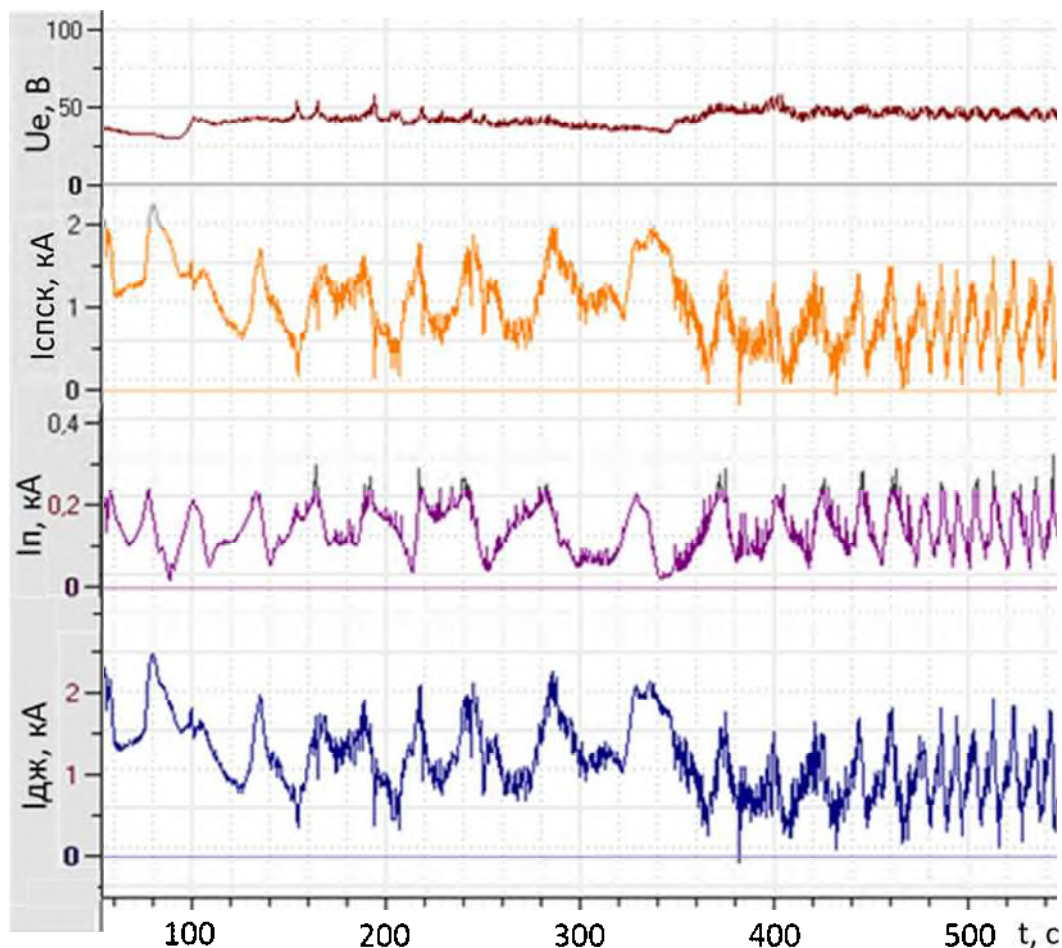


Рис. 2. Осцилограми зміни струмів та напруги кристалізатора, отриманих у результаті експерименту:

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.

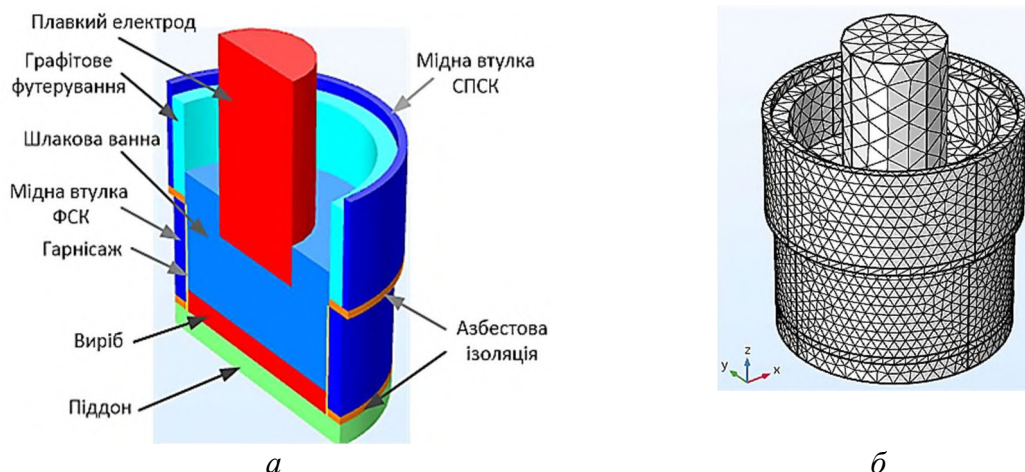


Рис. 3. Мультифізична модель стаціонарного СПК з плавким електродом:
а – структура СПК; б – розрахункова сітка СПК

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

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, в 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. Під час аналізу 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.

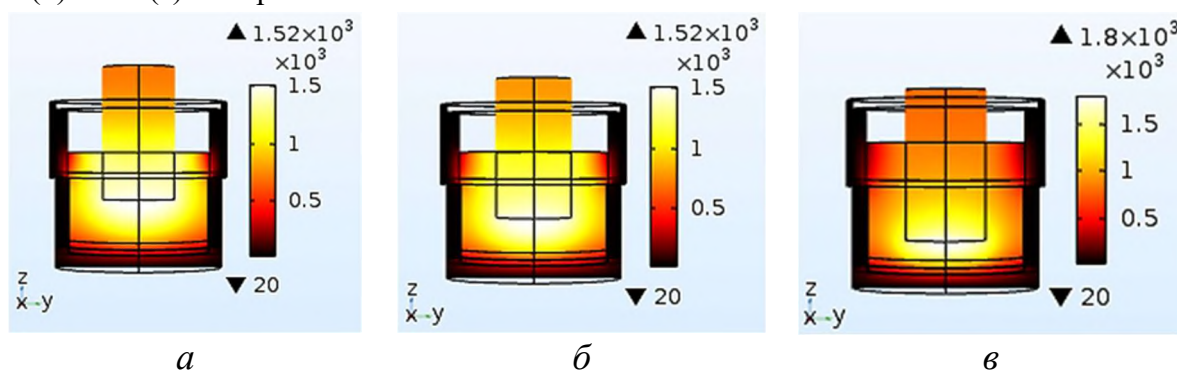


Рис. 4. Розподіл температури у шлаковій ванні для величин заглиблення електрода 60 (а), 80 (б) і 110 (в) мм

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.

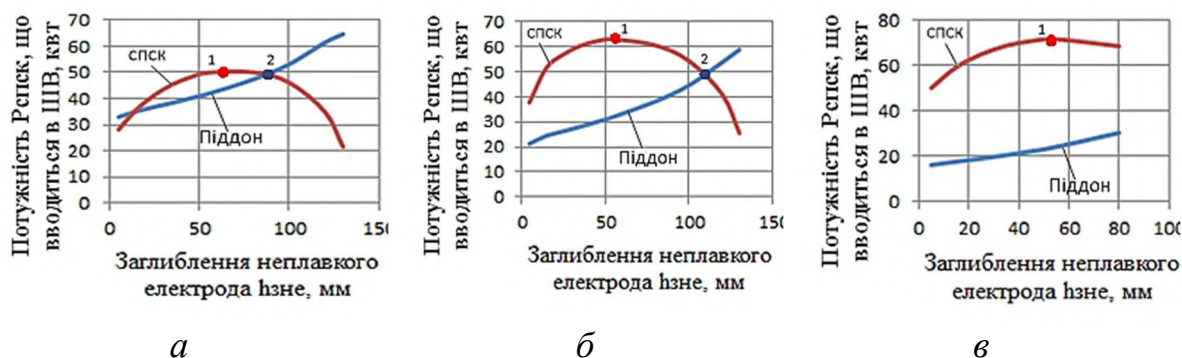


Рис. 5. Залежності зміни потужності, що вводиться у шлакову ванну, від величини заглиблення електрода при висоті наплавленого зливка 0 (а), 25 (б) і 50 (в) мм

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 $h_{\text{нпш}} = 50$ 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 його зміщення 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).

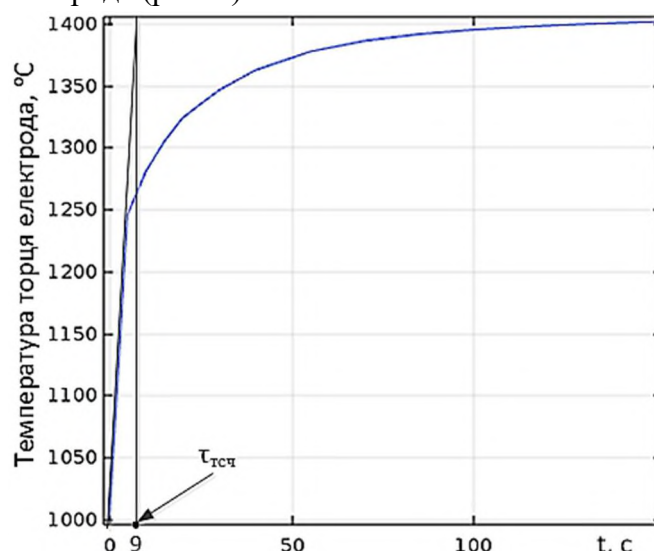


Рис. 6. Відгук температури торця електрода на стрибкоподібну зміну заглиблення неплавкого електрода

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 коливаль зварювального струму з частотою $0,01 \dots 0,04$ Гц. Зазвичай період для усталеного процесу становить 3...4 значення теплової сталої часу.

Значення $\tau_{\text{тсч}}$ 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 $T_{\text{те}}(t)$ і величини заглиблення плавкого електрода $h_{\text{зе}}(t)$ (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 $T_{\text{те}}(t) = 2254$ °С, 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 °С (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, $h_{\text{зе}}$ збільшується і струм $I_e(t)$ також збільшується. Виникає своєрідна «гойдалка» із незатухаючою амплітудою коливаль.

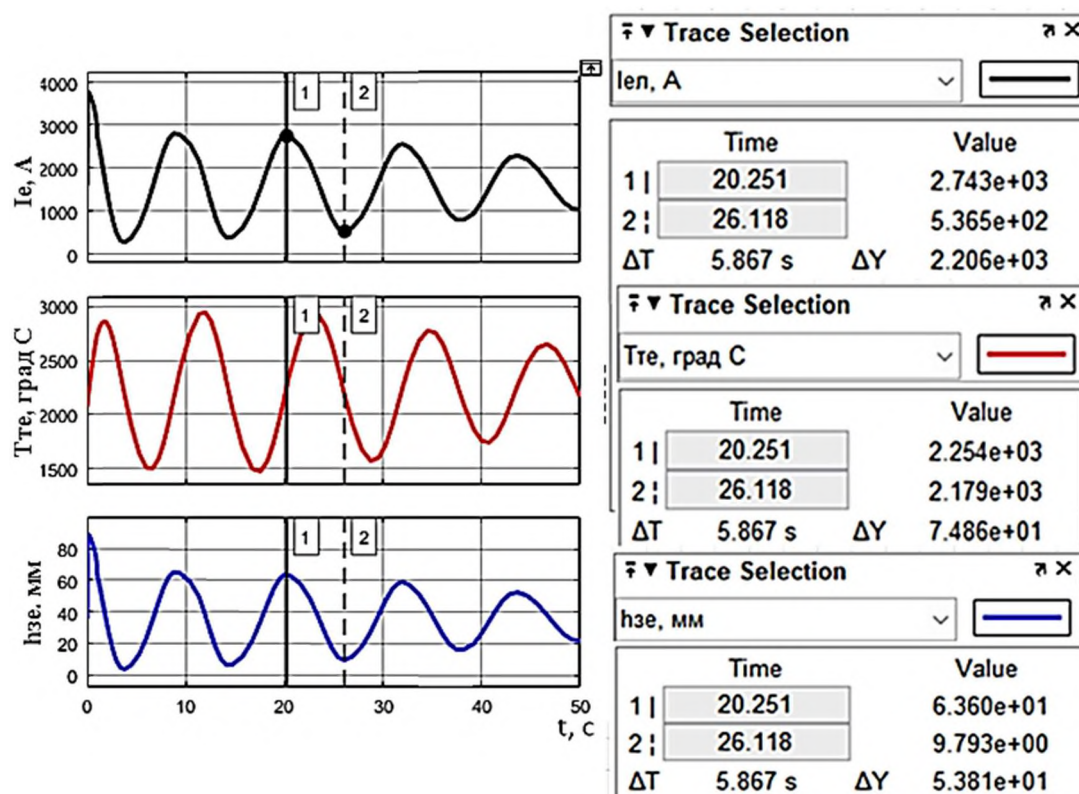


Рис. 7. Зміни в часі функцій $I_e(t)$, $T_{\text{те}}$ та $h_{\text{зе}}$ з таблицею поясень

Таким чином, можна стверджувати, що амплітуда коливаль 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 коливаль 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 проектуванні 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 у 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 electroslog 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 electros slag 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 electros slag 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 electros slag 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 electros slag 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 electros slag 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. <http://dx.doi.org/10.15407/as2019.04.07>.
9. Гориславец, Ю.М., Бондар, О.І., Проскудин, В.М., Кусков, Ю.М., Римар, С.В., & Нетяга 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. (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. Voloshkevych, G. Z. (1962). Stabilizatsiya elektroshlakovogo protsesssa [Stabilization of the electros slag process]. *Avtomatycheskaia swarka – 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 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 electros slag 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 electros slag 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 electros slag 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 electros slag 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 electros slag 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., Gryshchenko, T. I. (2019). Formyrovanye metallicheskoï vannы pry elektroshlakovom protsesse v tokopodvodiashchem krystallyzatore [Formation of metal pool in current-supplying mould at electros slag process]. *The Paton Welding Journal*, 4, 33-36. <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.04.07>.

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 dlya elektroshlakovogo naplavlennya 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]. *The Paton Welding Journal*, 12, 29-32. <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.12.05>.
11. Medovar, B. I. (Ed.). (1976). *Elektroshlakovyye pechi [Electroslag furnaces]*. Naukova Dumka.
12. Paton, B. E. (Ed.). (1980). *Elektroshlakovaya svarka i naplavka [Electroslag welding and melting]*. *Machine-building*.
13. Solovyov, V. G., Kuskov, Yu.M., & Romanova, I.Yu. (2024). Optyimizatsiia formy metalevoi vanny pry elektroshlakovomu naplavlenni v statsionarnomu strumopidvidnomu krystalizatori dlia otrymannia bimetallevykh vyrobiv [Optimization of the metal pool shape during electroslag melting in a stationary current-carrying mould for manufacturing of bimetallic products]. *The Paton Welding Journal*, 5, 28-36. <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.05.04>.

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 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 the stability of the melting process are presented.

Keywords: stationary current-driven crystallizer; self-regulating mechanism; multiphysics modeling; electroslag melting; stabilization of the electroslag process.

Fig.: 7. References: 12.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-401-409](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-401-409)

UDC 681.5:004.77

Volodymyr Voytenko¹, Alexander Pisarevskiy²

¹PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine);
researcher at the Department of Automatic Control
Lund University (Lund, Sweden)

E-mail: v.voytenko@stu.cn.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1490-0600>ResearcherID: [F-8698-2014](https://orcid.org/0000-0003-1490-0600). Scopus Author ID: [36167678700](https://orcid.org/0000-0003-1490-0600)

²Research at the Department of Automatic Control
Lund University (Lund, Sweden)

E-mail: alexander.pisarevskiy@control.lth.se. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0019-1502>

REMOTE DESIGN OF SAFETY CONTROLLERS FOR INDUSTRIAL AUTOMATION SYSTEMS

PLCs are the core of most industrial automation systems (IAS). Modern IAS development emphasizes hardware unification and increased software significance. Remote PLC programming boosts efficiency by reducing time and travel costs, while supporting advanced training. Using safety controllers in the example of IAS, this paper presents hardware and PLC-specific software tools enabling remote PLC programming and IAS monitoring. The results are applicable in IAS development and engineering education.

Keywords: industrial automation systems (IAS); programmable logic controllers (PLC); safety controllers; PLC software; remote PLC programming; remote engineering education; microprocessor.

Fig.: 6. References: 27.

Urgency of the research. The current stage of industrial development is characterized by the widespread use of automation technologies, which ensure high quality of mass-produced end-products while simultaneously reducing production costs. This automation largely relies on programmable logic controllers (PLCs) [1, 2], which, through associated input and output devices, integrate a variety of field equipment, including switches, sensors, converters, relays, motors and other devices. Modern PLCs [3, 4], in contrast to earlier relay-based controllers, are based on microprocessor technologies. This allows for the use of a unified structural framework to control diverse industrial processes, with customization for specific applications achieved through modifications to the software executed by the microprocessor.

In 2024, the global market for PLCs was valued at approximately USD 13 billion, representing a 7% increase compared to the previous year [5]. Consequently, PLC programming remains a crucial aspect of developing and configuring automation systems, particularly in sector, including: industrial manufacturing, automotive engineering, pharmaceuticals, and energy.

Target setting. Manufacturers of PLCs typically provide proprietary software tools for programming their controllers, which generally support the programming languages defined by the standard [6]. Most PLC software development environments follow a similar approach: a computer running the specific development tool is connected to the PLC via a programming interface. The application, developed and debugged in simulation mode, is then uploaded to the PLC. Afterward, an interactive process of testing and iterative refinement begins directly within the industrial automation system. This allows for verification of functionality and performance during interaction with the intended field devices.

Testing the PLC program within the specific configuration of field devices, including the length and characteristics of connection lines, power supply sources, and operational conditions, enables an accurate assessment of critical timing parameters, detection of developer errors, identification of equipment incompatibilities, and an overall evaluation of the industrial automation system's operability. If the outcome of this testing is unsatisfactory, it becomes necessary to return to the PLC software development environment and refine the program accordingly.

The challenge becomes even more critical when developing the safety system, a crucial component of any modern industrial automation system. In this context, numerous regulatory requirements must be met, typically achieved through the integration of additional PLCs,

known as safety controllers. Industrial automation systems incorporating such safety controllers rely on specialized hardware and software tools to enable certification by stringent and comprehensive safety standards.

The physical separation of certain industrial automation system components from the PLC, the need to improve production technologies and/or safety systems, as well as reconfiguration for different product types, often necessitate regular updates to PLC programs. This, in turn, requires the frequent presence of developers on-site, which is economically inefficient.

This issue can be addressed by enabling remote access capabilities, both during the initial development and throughout the maintenance and operation phases of the industrial automation system. Such an approach can reduce labor costs associated with in-house developers or travel expenses for external specialists, while also minimizing their downtime.

Moreover, the ability to remotely program and verify PLC software opens new opportunities in education and the training of highly qualified specialists. It allows for reduction in the amount of expensive laboratory equipment by enabling individual students to access it at convenient times, facilitates resource sharing among educational institutions, enhances the specialization of laboratories and the quality of instruction, and improves safety in the context of pandemics and other contemporary disruptions.

Actual scientific research and issues analysis. Due to the widespread PLCs adoption and the growing demand for specialists capable of working with them, as well as the increasing relevance of remote education, research in this field has been ongoing for quite some time. For instance, [7] the concept and architecture of an automation laboratory that enables users to remotely connect to a PLC is offered. The software for direct interaction with PLCs, referred to as PLC-specific software (PSS), is installed exclusively on the host computer, while the remote user's computer functions as an authorized client accessing the PSS. The network connection is established using Cisco VPN Client and Cisco VPN Server through a secure VPN tunnel.

In [8], a solution for remote monitoring of mechatronic devices is proposed by integrating PLCs with the Advantech WebAccess/SCADA software. In [9] and [10], PLCs are employed as intermediary components for collecting data from remote industrial process sensors and subsequently transmitting this information to end users.

Uninvestigated aspects of general problem definition. The main drawbacks of the aforementioned and other known solutions lie in the fact that the IAS developer working with PLCs does not interact directly with the instrumental PSS and lacks access to the full range of features provided by the programming environment. Special attention should be given to safety controllers (e.g., [11]), which are similar to conventional PLCs but possess specific characteristics due to their intended purpose. These specifics must be strictly observed during IAS development and are supported by dedicated PSS tailored for such controllers [12].

In the education context, it should be noted that when students rely on various intermediate or auxiliary software tools, they cannot fully acquire practical skills in working directly with a specific PSS. This includes essential steps, including locating the software, reviewing its documentation on the manufacturer's website, downloading, installing, and configuring it. As a result, future challenges may arise, i.e. difficulties in mastering new PLCs and PSS platforms or adapting to the continuous changes inherent in both this domain and computer technologies in general.

The research objective. The objective of this study is to develop an architecture for a hardware-software system that enables a safety subsystem developer of an industrial automation system to perform, from their local workstation equipped with the original instrumental PLC-specific software, any actions supported by the safety PLC manufacturer for program development, as well as to verify the results on a real remote IAS.

To achieve the stated objective, it is necessary to develop a generalized structure of the hardware components and connection schemes for individual elements, using specific predefined models of PLCs, field devices, and auxiliary components. Based on the obtained results, appropriate software tools must be selected, configured, refined, and adjusted to ensure the functionality of the proposed structure. Finally, a comprehensive verification of the developed architecture should be carried out, the results analyzed, and a plan for further actions formulated.

Achieving the stated objective will yield positive outcomes across various areas related to interaction with PLC-based industrial automation systems, including:

- Reducing working time and other expenses associated with the activities of IAS developers.
- Minimizing the amount of laboratory equipment required for training IAS developers.
- Enabling interaction with IAS at a convenient and safe time.

The statement of basic materials

Structure and hardware components of the PLC-based system under study. The structure of the PLC-based system under investigation is shown in Fig. 1. The system is built using components from SICK [11], specifically the *SICK Safety Controller FX3-CPU000000* (denoted as Main PLC Module in the figure) [13], which serves as a main control and interfacing module. Directly connected to it are the *FX3-GEPR00000* (Ethernet Gateway) [14] and the *FX3-XTIO84002* (Input/Output Module) [15], both of which can be configured via software. Additionally, the system includes the *UE410-4RO4* (Relay Module) [16], which can only be controlled through hardware using additional wired connections.

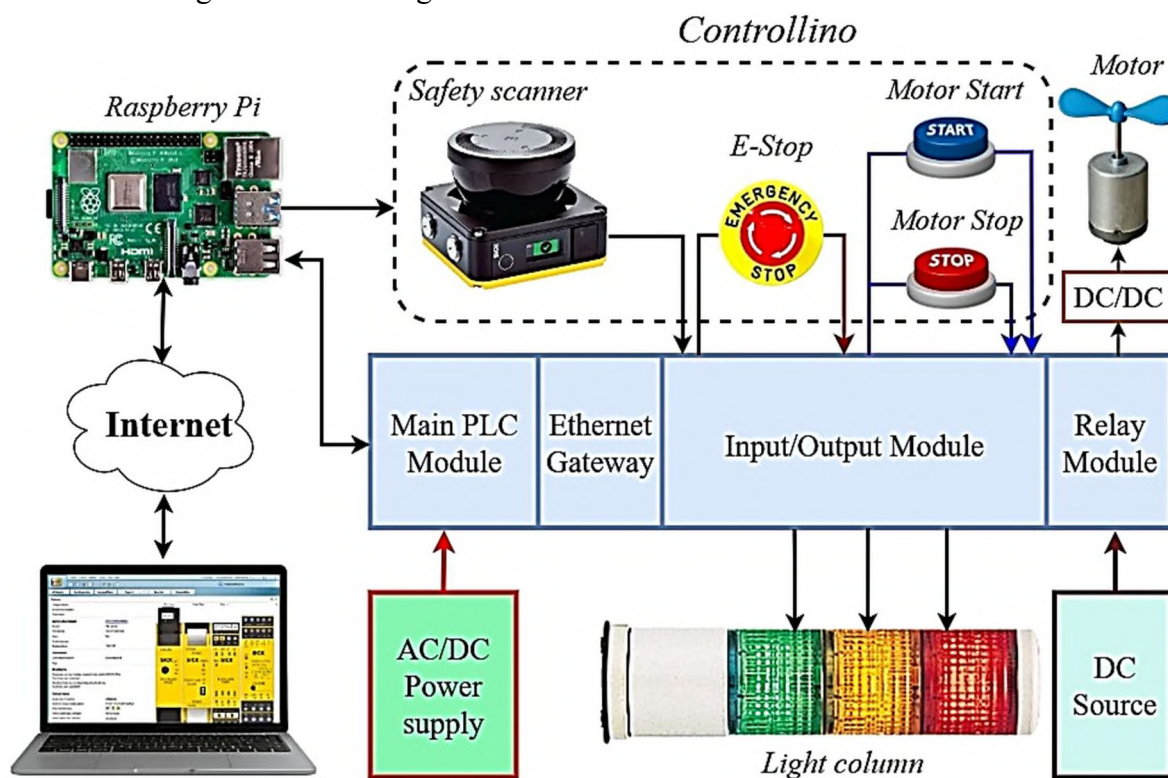


Fig. 1. Structure of the PLC-Based System Under Study

Source: developed by the authors.

The industrial compatible PLC *Controllino* [17] is applied for substitution of typical infrastructure components of industrial safety systems, such as *Emergency stop* button, *Motor Start* and *Motor Stop* buttons, and *Safety scanner*. Also, the real LED-based *Light column* is connected to the outputs of the *Safety PLC*. The opening and closing of a pair of built-in *Controllino*

relays emulates for the *Safety PLC* the effect of pushing and releasing a typical 2-chain *E-Stop button* like *ES21* [18], which, according to the industrial safety standards, opens and closes the electrical loop between built-in special signal sources to *Safety PLC* and safe inputs of the same PLC. Another couple of built-in relays produce an effect of pressing of *Motor Start* and *Motor Stop* buttons, which correspond to a high logical level applied to non-safe inputs of *Safety PLC*. The pair of digital outputs of *Controllino* emulates the OSSD1 and OSSD2 signals like on the output of *nanoScan3* safety laser scanner [19]. The logic outputs of the input/output module are connected to three signal lamps – red, yellow, and green located on a *Light column*, as well as to the *Relay module*, which connects the *Motor* via a DC/DC converter *DTJ2024D05* [20] to power. Closing the relay upon command from the main module supplies power to the converter input, thereby starting the motor. A single-board computer, *Raspberry Pi 4* with 8 GB of RAM [21], is a key element of experimental setup, connecting main units to a unified system. The entire setup is powered by an AC/DC Power supply unit *WDR-120-24* [22].

Fig. 2 shows the physical appearance of the connected hardware components during the execution of the test program.

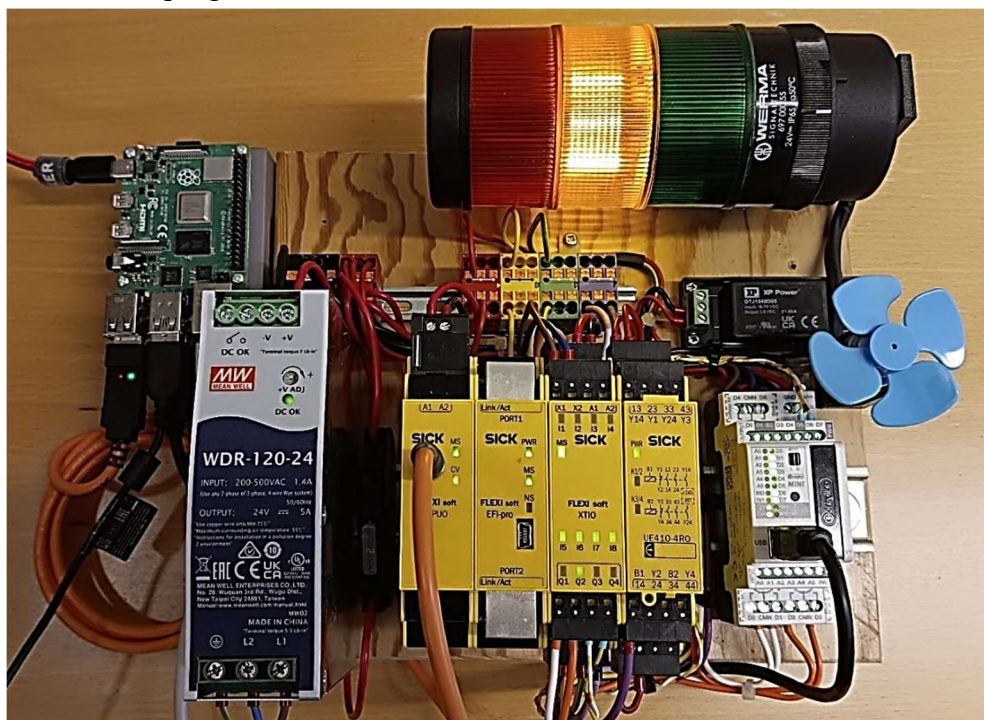


Fig. 2. Physical view of the connected hardware components

Source: developed by the authors.

Architecture and software components of the studied PLC-based system. The deployed software architecture generally resembles a typical three-tier web architecture, as used, for example, in [23], and illustrated in Fig. 3.

The most critical component of the system is *Raspberry Pi*, which runs on the Debian-based *Raspberry Pi OS* (32-bit). The three virtual servers provide Internet-based access and interaction between remote users and experimental hardware.

- The web server *Apache2* is listening for remote TCP connections on port 80. It provides an interactive web interface, which contains software buttons and an embedded video stream. Each pressing of a software button is being processed by *PHP/AJAX* handler to a specific code and forwarded via USB interface to *Controllino*.
- The streaming server *MJPEG-streamer* [24] listens for TCP connections on port 8080 and allows a web server to capture and broadcast the video stream from a web camera.

- The *USB/IP Linux* package runs the process which accepts TCP connections on port 3240 via the Internet from installed on user computer *USB/IP client* [25].

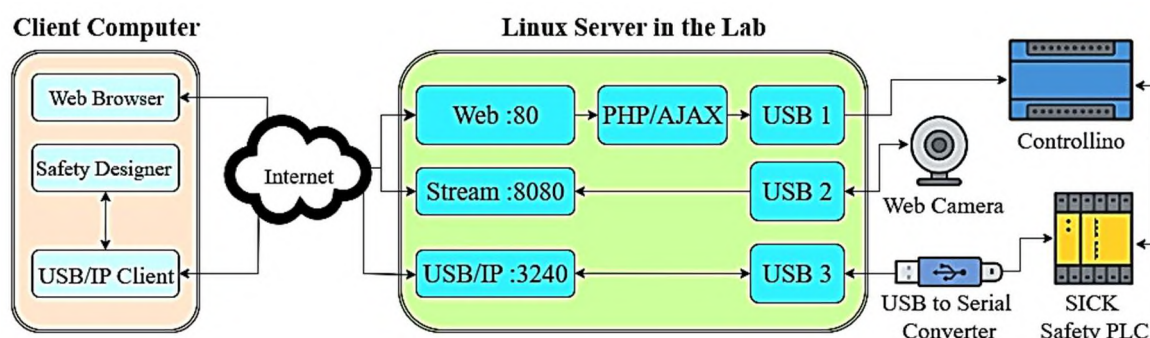


Fig. 3. Architecture of remote interaction with electronic equipment

Source: developed by the authors

On the client PC side (*Windows 10 Pro*, version 22H2, build 19045.5965; *Intel(R) Core(TM) i7-4770 CPU @ 3.40 GHz*, 16.0 GB RAM), in addition to the *Sick Safety Designer* PLC development environment, the *USB/IP Client for Windows* [25] is also installed. This setup enables *Sick Safety Designer* on the client PC to access the *Safety PLC* remotely via the standard driver as if it has a virtual USB cable connected directly to the PLC.

A screenshot of the *Sick Safety Designer* PSS window in PLC configuration view mode is presented in Fig. 4.

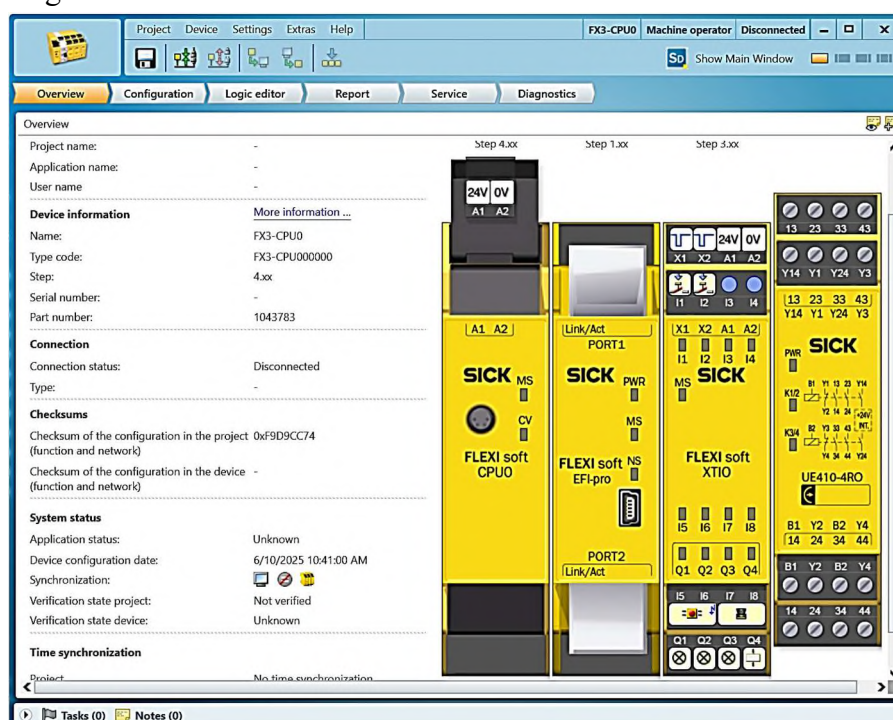


Fig. 4. Screenshot of the Sick Safety Designer window in PLC configuration view mode

Source: developed by the authors.

Functional opportunities. The hardware and software components of the system described above allow their main functions to be implemented.

- Program and debug the *Safety PLC* from a remote computer as if his computer were connected to the PLC using a USB cable.

- Change remotely via web interface the state of different inputs of *Safety PLC* as if the real corresponding hardware were connected to *Safety PLC*.
- Get visual feedback, observe indicators on the *Safety PLC*, *Light column*, and propeller of electric motor through the video stream from web camera.

The web interface, presented in Fig. 5, allows control of the virtual input devices by emulating via the *Controllino* corresponding input signals for the *I/O module*. This setup enables remote testing of the PLC program's response to the pressing and releasing of the *E-Stop* button, introducing a fault (breaking one of the wires of the safety chain) and fixing it. It also allows for initiating or canceling the confirmation from *Safety scanners*. In case the user program, which is uploaded remotely into the *Safety PLC*, is correct and the safety chain is correctly "assembled", the *Motor* can be started and stopped by pressing of corresponding buttons.

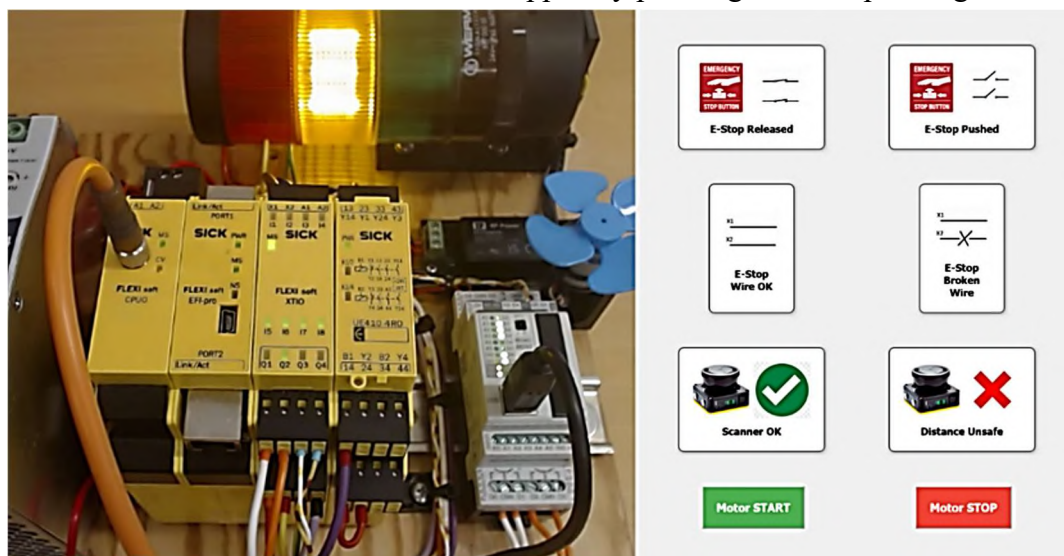


Fig. 5. Screenshot of the client browser window in PLC monitoring mode

Source: developed by the authors.

Fig. 6 illustrates the procedure of visual PLC programming using the *Sick Safety Designer* software.

While monitoring the system in real time, it is also possible to work with *Sick Safety Designer* to create a new project or modify the current one and upload it to the internal memory of the PLC.

Conclusions. As a result of the conducted research, the newest hardware-software system architecture has been developed and experimentally validated for the first time. This architecture enables the use of the original PLC development environment, *Sick Safety Designer*, both in standard local mode and remotely via the Internet. It allows the users to upload the created program to the industrial automation system located in the remote research or educational laboratory, as well as to monitor the operation of this system in real time.

The developed system is configured at the hardware level; however, due to the use of an intermediate industrial controller, it is possible to emulate specific safety scenarios within the industrial automation system under development and to perform hardware modifications remotely. This expands the potential applications of the proposed architecture in the educational process of training engineers in the fields of electronics and automation.

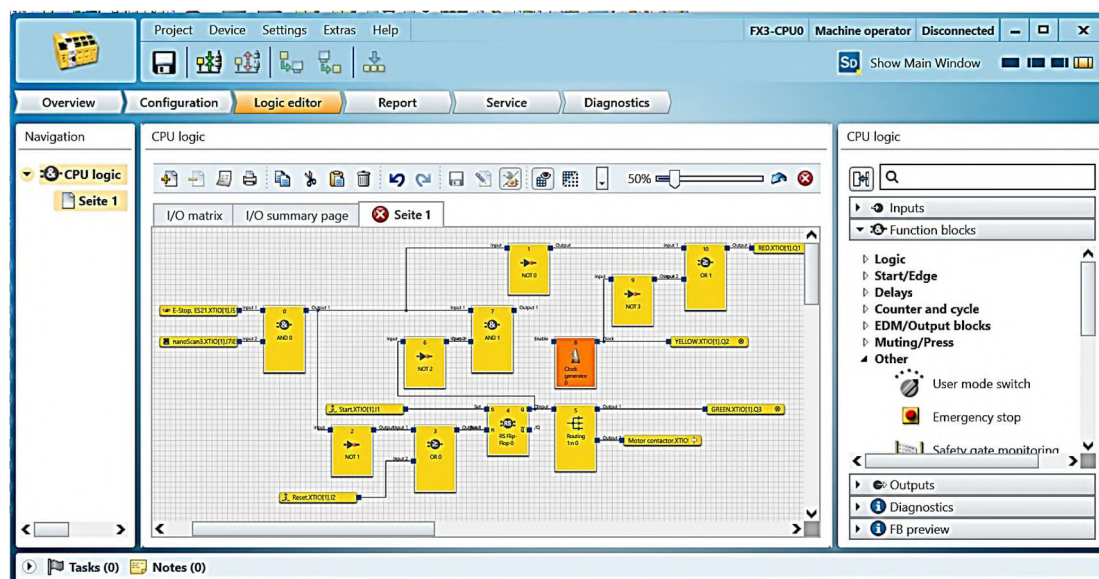


Fig. 6. Screenshot of the Sick Safety Designer window in Logic Editor mode

Source: developed by the authors.

The obtained practical results confirm the validity of the chosen strategy and demonstrate the feasibility of organizing remote work for industrial automation system (IAS) developers, as well as enabling students to conduct laboratory research in the distant - learning format.

To integrate the developed system into the educational process, it is necessary to extend its functionality by incorporating access control mechanisms, implementing a queuing system [26], and enabling interaction with a learning management system (e.g., *MOODLE* or *CANVAS*).

It is also advisable to experimentally verify the effectiveness of the proposed approach when working with other PLCs, as well as to implement remote interaction with laboratory equipment including various development boards (e.g., *STM32 Nucleo Board* and others). This would enable the execution of remote laboratory assignments for other engineering courses, including *Microcontrollers*, *Microprocessor Technology*, *Analog Electronics Devices*, *Electronic Monitoring and Visualization Tools*, and others [27].

Declaration of generative AI and AI-assisted technologies in the writing process. During the production of this work, the authors utilized Grammarly, Copilot, and DeepL services to enhance readability and language quality. After using these services, the authors reviewed and edited the content as needed and take full responsibility for the content of the publication.

Acknowledgements. The authors are highly grateful to the Crafoord Foundation for providing a grant.

References

1. Petruzella, F. D. (2023). *Programmable Logic Controllers*. (6th ed.). New York: McGraw-Hill.
2. Bolton, W. (2015). *Programmable Logic Controllers*. (6th ed.). Oxford: Newnes.
3. Electronicsinfos. (2024, July 24). *Top 11 PLC Brands of 2024*. <https://www.electronicsinfos.com/2024/07/top-11-plc-brand-in-2024.html>.
4. INSTBLOG. (2020, December 27). *Top 20 PLC Manufacturers: A List of PLC Brands and Their Rankings*. <https://instrumentationblog.com/plc-manufacturers-plc-brands/>.
5. Future Market Insights, Inc. (2024, Dec 4). *Programmable logic controller market*. <https://www.futuremarketinsights.com/reports/programmable-logic-controller-market>.
6. IEC Webstore. (n.d.). *IEC 61131-3:2025. Programmable controllers – Part 3: Programming languages*. <https://webstore.iec.ch/en/publication/68533>.

7. Eslami, A., Williams, A., Krauss, K., Rezaei, A. (2009, June). A remote access robotics and PLC laboratory for a distance learning program. Paper presented at the 2009 Annual Conference & Exposition, Austin, Texas. <https://peer.asee.org/a-remote-access-robotics-and-plc-laboratory-for-distance-learning-program>.
8. Shyr, W-J, Su, T-J, Lin, C-M. (2017). Development of Remote Monitoring and a Control System Based on PLC and WebAccess for Learning Mechatronics. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2017, 10(2). <https://doi.org/10.5772/55363>.
9. Bakshi, S., Khairmode, G., Varkhede, N., Ayane, S. (2019, Mar). Monitoring and control of PLC based automation system parameters using IoT. *International Research Journal of Engineering and Technology* (IRJET). 2019, 6(3). <https://www.irjet.net/archives/V6/i3/IRJET-V6I3124.pdf>.
10. Aravind, C., Suji Prasad, S. J., Ponni Bala, M. (2020, Jan). Remote Monitoring and Control of Automation System with Internet of Things. *International Journal of Scientific & Technology Research*. 2020, 9(1). <https://www.ijstr.org/final-print/jan2020/Remote-Monitoring-And-Control-Of-Automation-System-With-Internet-Of-Things.pdf>.
11. SICK. (n.d.). *Safety controllers Flexi Soft*. <https://www.sick.com/gb/en/catalog/products/safety/safety-controllers/flexi-soft/c/g186176>.
12. SICK. (n.d.). *Safety controllers: Safety Designer*. <https://www.sick.com/gb/en/catalog/products/safety/safety-controllers/safety-designer/safety-designer/p/p674218?tab=detail>.
13. SICK. (n.d.). *Safety controllers Flexi Soft. FX3-CPU000000*. <https://www.sick.com/gb/en/catalog/products/safety/safety-controllers/flexi-soft/fx3-cpu000000/p/p80477?tab=detail>.
14. SICK. (n.d.). *Safety controllers Flexi Soft. FX3-GEPR00000*. <https://www.sick.com/gb/en/catalog/products/safety/safety-controllers/flexi-soft/fx3-gepr00000/p/p592553?tab=detail>.
15. SICK. (n.d.). *Safety controllers Flexi Soft. FX3-XTIO84002*. <https://www.sick.com/gb/en/catalog/products/safety/safety-controllers/flexi-soft/fx3-xtio84002/p/p80480>.
16. SICK. (n.d.). *Safety controllers Flexi Soft. UE410-4RO4*. <https://www.sick.com/gb/en/catalog/products/safety/safety-controllers/flexi-classic/ue410-4ro4/p/p54589>.
17. CONTROLLINO. (n.d.). *CONTROLLINO MINI*. <https://www.controllino.com/product/controlino-mini/>, last accessed 2025/04/10.
18. SICK. (n.d.). *Safety switches. ES21*. <https://www.sick.com/gb/en/catalog/products/safety/safety-switches/es21/c/g195527?tab=overview>.
19. SICK. (n.d.). *Safety laser scanners. nanoScan3*. <https://www.sick.com/gb/en/catalog/products/safety/safety-laser-scanners/nanoscan3/c/g507056?tab=overview>.
20. XP Power. (n.d.). *Quality Power Supplies and Converters. DTJ20 series power product range*. <https://www.xppower.com/product/DTJ20-Series?m=DTJ2024D05>.
21. Raspberry Pi. (n.d.). *Raspberry Pi 4 model B*. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>.
22. Mean Well. (n.d.). *Power Supply. WDR Series. WDR-120 Series*. <https://www.meanwell.com/productSeries.aspx?i=52&c=7#tag-7-52>.
23. Li, Y., Esche, S.K., & Chassapis, C. (2008). A scheduling system for shared online laboratory resources. *2008 38th Annual Frontiers in Education Conference, Saratoga Springs, NY, USA, 2008, pp. T2B-1-T2B-6*, doi: 10.1109/FIE.2008.4720253.
24. Grinberg, M. (2013, Oct 1). *How to build and run MJPG-streamer on the raspberry Pi*. miguelgrinberg.com. <https://blog.miguelgrinberg.com/post/how-to-build-and-run-mjpg-streamer-on-the-raspberry-pi>.
25. Vadimgrn/usbip-win2. (2025, May 30). *USB/IP client for Windows*. GitHub. <https://github.com/vadimgrn/usbip-win2>.
26. Liguori, C., Pietrosanto, A., Carratù, M., Paciello, V., De Santos, M., Di Leo, G., Ferro, M. (2024). Remote laboratories for measurement courses during the Covid-19 era. *AIP Conf. Proc.* 2816, 160003. <https://doi.org/10.1063/5.0179433>.
27. Vera, R.J., Galilea, J.L.L.G., Vicente, A.G., De-La-Llana-Calvo, A. & Munoz, I.B. (2024). A Flexible Framework for the Deployment of STEM Real Remote Laboratories in Digital Electronics and Control Systems. *IEEE Access*, 12, 14563–14579. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3357991>.

Отримано 23.07.2025

Володимир Павлович Войтенко¹, Олександр Ілліч Писаревський²

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки, робототехніки, автоматики та мехатроніки

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна);

дослідник кафедри автоматичного керування

Лундський університет (Лунд, Швеція)

E-mail: v.voytenko@stu.cn.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-1490-0600>

ResearcherID: F-8698-2014. **Scopus Author ID:** 36167678700

²Інженер-дослідник

Лундський університет (Лунд, Швеція)

E-mail: alexander.pisarevskiy@control.lth.se. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-0019-1502>

**ДИСТАНЦІЙНА РОЗРОБКА КОНТРОЛЕРІВ БЕЗПЕКИ
ДЛЯ ПРОМИСЛОВОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ**

Програмовані логічні контролери (PLC) є основою сучасних промислових систем автоматизації, а також широко застосовуються у транспорті, енергетиці, робототехніці, системах безпеки, водопостачання та водовідведення, в будівлях і спорудах, у медичних приладах. В основі побудови PLC лежить мікропроцесор, а тому розробка та супроводження системи на базі PLC потребує висококваліфікованих спеціалістів, які розуміють можливості PLC, особливості їхньої взаємодії з польовими пристроями та здатні працювати із специфічним інструментальним програмним забезпеченням PLC. Звідси випливає актуальність проблеми підвищення ефективності роботи таких спеціалістів, а також їхньої якісної підготовки, що потребує багато часу та вартісного обладнання.

Розвиток інформаційних і комп'ютерних технологій відкриває таку можливість у вирішенні зазначеної проблеми, як застосування дистанційних методів розробки, а також навчання роботі з віддаленими системами автоматизації на базі PLC. Цей підхід стає особливо актуальним в Україні, оскільки дозволяє не тільки економити на відрядженнях спеціалістів чи кількості потрібного лабораторного устаткування, але й підвищує безпеку завдяки розосередженню людей. Синергетичний ефект може бути досягнутий і за рахунок планування часу роботи як спеціалістів, так і обладнання, а також можливості їхньої узгодженої спільної взаємодії.

Особливу роль у промисловій автоматизації відіграють системи безпеки, оскільки виробничий травматизм є неприпустимим ані з суспільного, ані з економічного погляду. Ця стаття зорієнтована на дистанційну розробку та навчання роботи саме з контролерами безпеки, які, по суті, являють собою PLC, проте мають специфічні польові пристрої, використовують надійні протоколи зв'язку з PLC та потребують відповідної сертифікації перед тим, як бути запровадженими у виробництво. Мета виконаного дослідження – створення архітектури програмно-апаратної системи, яка дає можливість працювати з контролерами безпеки дистанційно, використовуючи стандартне інструментальне забезпечення PLC, а також і додаткові компоненти. Ці компоненти дозволяють в реальному часі спостерігати за віддаленою системою автоматизації та модифікувати і програму, і апаратну конфігурацію.

Для вирішення поставлених задач була розроблена структура системи безпеки на базі PLC, розгорнуте відповідне програмне забезпечення, а також проведені експериментальні дослідження, які підтверджують можливість дистанційної взаємодії з потрібними апаратними засобами, у тому числі під час виконання лабораторних завдань студентами інженерних спеціальностей.

Стаття може бути корисною для розробників систем автоматизації на базі PLC, а також використана в освітньому процесі.

Ключові слова: промислові системи автоматизації; програмовані логічні контролери (PLC); контролери безпеки; програмне забезпечення PLC; дистанційна розробка програми для PLC; дистанційне інженерне навчання; мікропроцесор.

Рис.: 6. **Бібл.:** 27.

Віталій Анатолійович Мардзявко¹, Андрій Юрійович Руденко²

¹асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

Миколаївський національний аграрний університет (Миколаїв, Україна)

E-mail: vitalijmardzavko@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7327-9215>

²асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

Миколаївський національний аграрний університет (Миколаїв, Україна)

E-mail: andrey0911r@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5103-6412>

ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРАЛЬНОГО СКЛАДУ LED-ФІТОЛАМП ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ОВОЧЕВИХ КУЛЬТУР У ЗАКРИТОМУ ҐРУНТІ

Розглянуто спектральні режими роботи LED-фітоламп як ефективного засобу стимулювання росту та підвищення продуктивності овочевих культур у закритому ґрунті. Проаналізовано результати експериментальних досліджень впливу червоного, синього, інфрачервоного та ультрафіолетового випромінювання на основні біометричні показники томатів і салату. Наведено порівняльні характеристики чотирьох варіантів спектрального освітлення, що дозволило встановити оптимальну комбінацію спектрів для підвищення врожайності та фотосинтетичної активності. Отримані результати можуть бути використані для проєктування енергоефективних систем освітлення в тепличному господарстві.

Ключові слова: фітолампа; спектральний склад; LED-освітлення; тепличне виробництво; фотосинтез; овочеві культури.

Рис.: 3. Табл.: 3. Бібл.: 14.

Постановка проблеми. Післявоєнне відновлення України вимагає системного підходу до забезпечення продовольчої безпеки держави. Одним із критичних напрямів такого відновлення є інтенсифікація агропромислового комплексу, особливо в регіонах, де через руйнування, замінування або зміни кліматичних умов відкритий ґрунт став малопридатним для традиційного землеробства. У цьому контексті тепличне овочівництво набуває особливого значення як стратегічний інструмент для стабільного та контрольованого виробництва овочевої продукції протягом року.

Завдяки можливості цілорічного вирощування овочів, зелені та ягід тепличні комплекси дозволяють забезпечити стабільне постачання свіжих продуктів харчування навіть у зимовий період і зменшити залежність від імпорту, що є критично важливим у період нестабільності логістичних ланцюгів і валютних коливань. Окрім того, тепличне виробництво сприяє швидкому економічному відновленню постраждалих регіонів, надаючи можливість малим і середнім фермерам повернутися до аграрної діяльності з відносно меншими капіталовкладеннями, ніж у випадку традиційного польового землеробства. У світлі кліматичних змін, що призводять до дедалі частіших посух, злив та температурних аномалій, закритий ґрунт із контрольованим мікрокліматом виступає як надійний інструмент стабільного виробництва незалежно від зовнішніх умов.

Сучасні технології – автоматизовані системи поливу, клімат-контролю, гідропоніка, енергоощадне LED-освітлення та відновлювальні джерела енергії – відкривають перспективи розвитку високотехнологічного тепличного сектору, що поєднує продовольчу функцію з інноваційною [1]. Таким чином, інвестиції в розвиток тепличного господарства є не лише тактичним, а й стратегічним кроком для відновлення та зміцнення аграрного потенціалу України в умовах повоєнної трансформації.

Успішне вирощування овочевих культур у закритому ґрунті значною мірою залежить від параметрів штучного освітлення, зокрема від спектрального складу світла, який визначає фізіологічні процеси рослин – фотосинтез, формування біомаси, процеси цвітіння та плодоношення [2]. На відміну від природного сонячного світла, фітолампи дають змогу

цілеспрямовано впливати на рослини, покращити їх розвиток шляхом регулювання співвідношення довжин хвиль у світловому потоці. Це особливо важливо в умовах України, де тепличні комплекси змушені працювати в умовах нестабільного енергозабезпечення, короткого світлового дня та необхідності максимального використання ресурсів.

Використання фітоламп із різними спектральними характеристиками дозволяє оптимізувати фотосинтетичну активність рослин, підвищити їх продуктивність та покращити якість врожаю [3]. Дослідження реагування рослин до змін спектрального складу світла сприятиме розвитку технологій, що забезпечують стабільне виробництво овочевої продукції в умовах закритого ґрунту та вертикального землеробства.

Сучасні LED-фітолампи дозволяють формувати спеціальні спектральні профілі освітлення з акцентом на червоний (660 нм), синій (450 нм), а також інші діапазони, що забезпечують фотоморфогенетичну регуляцію росту культур [4]. Проте ефективність конкретного спектрального складу може варіюватися залежно від культури, етапу розвитку рослини, умов мікроклімату теплиці та технології вирощування.

Незважаючи на активне використання фітоламп у промисловому тепличному виробництві, залишається недостатньо вивченим вплив окремих спектральних діапазонів на продуктивність овочевих культур, які потребують енергоефективних та адаптивних рішень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Світлодіодні фітолампи для опромінення рослин конструкцією не відрізняються від звичайних LED освітлювальних пристроїв – випромінюючі кристали під впливом електричного струму генерують світловий потік певної довжини хвилі (табл. 1).

Таблиця 1 – Світловий потік залежно від довжини хвилі

Колір	Діапазон довжини хвилі, нм	Діапазон частот, ТГц	Діапазон енергії фотонів, еВ
Фіолетовий	380-440	790-680	2,82-3,26
Синій	440-485	680-620	2,56-2,82
Блакитний	485-500	620-600	2,48-2,56
Зелений	500-565	600-530	2,19-2,48
Жовтий	565-590	530-510	2,10-2,19
Помаранчевий	590-625	510-480	1,98-2,10
Червоний	625-740	480-405	1,68-1,98

Відмінність фітоламп та LED-пристроїв спостерігається у складі спектра – не вузький інтервал теплого білого світіння як ламп розжарювання, а широкий діапазон від ультрафіолету і аж до червоних променів [5]. У цьому спектрі, що випромінюється, і полягає основна перевага світлодіодних фітоламп для рослин – LED випромінюють світло найпотрібніших для кімнатних рослин спектрів.

Фітолампи є спеціальними джерелами світла, які імітують природне сонячне освітлення та забезпечують рослини необхідним спектром для їхнього росту та розвитку. Вони особливо корисні в умовах недостатнього природного освітлення, наприклад, взимку або при вирощуванні рослин у приміщеннях.

Різні спектри світла мають значний вплив на фотосинтетичну активність рослин, і це питання активно досліджувалося у багатьох наукових роботах. Аналіз роботи [6] розглядає механізми, за допомогою яких різні спектральні компоненти світла – зокрема, червоний, синій та зелений спектри – можуть покращувати або знижувати ефективність фотосинтезу в рослинах. У їхньому дослідженні наголошується на важливості взаємодії світла з фотосистемами рослин на рівні хлоропластів, де спектральний склад світла безпосередньо впливає на енергетичний баланс фотосинтетичного апарату.

Робота [7] детально розглядає вплив спектрів світла, зокрема червоного та синього, на фотосинтетичну активність рослин. Автори підкреслюють, що для оптимізації фотосинтезу рослини використовують різні спектральні компоненти світла залежно від інтенсивності та умов навколишнього середовища. Вони також підкреслюють важливість комбінованого використання цих спектрів для максимізації ефективності фотосинтезу, оскільки кожен спектр стимулює різні фотосистеми рослин.

У роботі [8] акцентується увага на тому, як спектральний склад світла, зокрема червоний та синій діапазони, впливає на швидкість фотосинтетичних процесів і загальний ріст рослин. Вони зосереджуються на аналізі того, як зміни в інтенсивності світла і спектрі можуть змінювати продуктивність фотосинтезу в різних умовах, зокрема в лабораторних експериментах.

У роботах [9, 10] вивчається вплив світла на фотосинтетичну активність з особливим акцентом на роль фотосинтетичних пігментів, таких як хлорофіл і каротиноїди. Дослідження показують, як різні спектри світла впливають на вироблення енергії в хлоропластах, що є критичним для ефективного фотосинтезу. Зокрема, він аналізує, як спектральні компоненти світла можуть призводити до стресу в рослинах або, навпаки, покращувати їх фотосинтетичну активність в умовах певних спектральних складових.

Результати роботи [11] зосереджуються на методах вимірювання флуоресценції хлорофілу, яка є важливим інструментом для оцінки фотосинтетичної активності. Вони описують, як різні спектри світла змінюють параметри флуоресценції, що дозволяє точно вимірювати ефективність фотосинтетичних процесів. Зокрема, флуоресценція хлорофілу є дуже чутливим показником для вивчення того, як світло різної довжини хвилі впливає на фотосинтез.

Загалом, ці дослідження підтверджують, що спектральний склад світла є важливим фактором для оптимізації фотосинтетичних процесів. Червоний та синій спектри особливо важливі для стимулювання фотосистеми, а комбіноване використання різних спектрів дозволяє досягти найкращих результатів у фотосинтезі. Таким чином, ці роботи відкривають нові можливості для покращення умов вирощування рослин, зокрема в умовах штучного освітлення або теплиць.

Отже, основні спектри світла відіграють ключову роль у процесах росту, розвитку та продуктивності рослин, забезпечуючи їхні потреби на різних стадіях життєвого циклу.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри значну кількість досліджень, присвячених впливу спектрального складу світла на ріст і розвиток рослин, окремі аспекти цієї проблеми залишаються недостатньо вивченими. Зокрема, потребує подальшого вивчення комплексна дія різних спектральних компонентів (червоного, синього, інфрачервоного та ультрафіолетового) у поєднанні, їх вплив на продуктивність на різних етапах онтогенезу, а також ефективність такого освітлення з погляду енергоспоживання та економічної доцільності. Відсутність цілісного підходу до визначення оптимального спектра для конкретних культур в умовах закритого ґрунту зумовлює актуальність подальших досліджень у цьому напрямі.

Метою роботи є вивчення впливу спектрального складу LED-фітоламп на ріст, розвиток і продуктивність основних овочевих культур, вирощуваних у закритому ґрунті, з метою покращення технології тепличного виробництва.

Виклад основного матеріалу. За результатами дослідження [12; 13] можна побудувати графік (рис. 1), з якого видно, як різні довжини хвиль світла впливають на фотосинтетичну активність рослин. Видно, що червоний (близько 650 нм) і синій (близько 450 нм) спектри найефективніші для фотосинтезу.

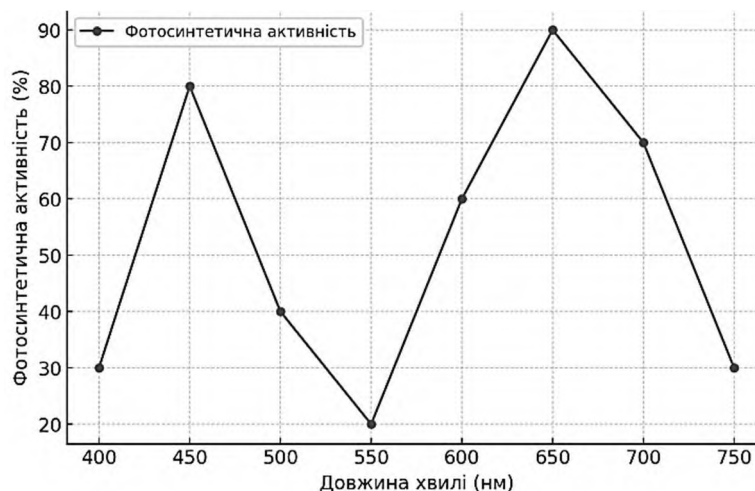


Рис. 1. Вплив спектра світла на фотосинтез

За результатами [14] також можна побудувати графік (рис. 2), який демонструє загальний вплив довжини хвилі світла на ріст рослин.

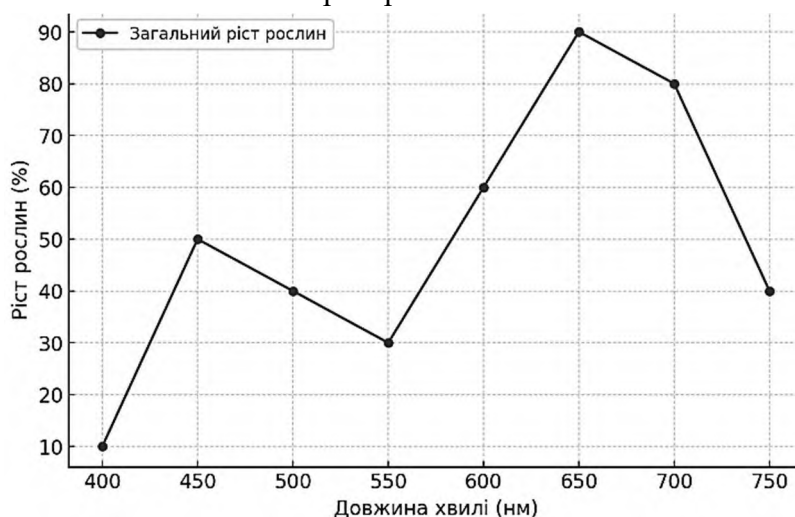


Рис. 2. Вплив довжини хвилі світла на ріст рослин

Найбільший ріст спостерігається в червоному (650-700 нм) та синьому (450 нм) спектрах, що відповідає основним фотосинтетично активним діапазнам. Таким чином, має сенс застосовувати комбіноване використання цих спектрів у фітолампах, що забезпечує комплексну стимуляцію ростових і продуктивних процесів, що може бути основою для ефективного тепличного виробництва в умовах сучасних агротехнологій.

Відповідно до мети цієї роботи, нами було проведено експериментальні дослідження щодо впливу спектрального складу LED-фітоламп на ріст, розвиток і врожайність овочевих культур на базі навчальної теплиці. Як розсаду було обрано томати (*Solanum lycopersicum* сорту «Чумак») та салат листковий (*Lactuca sativa* сорту «Одеса 75»).

Для проведення дослідів було сформовано 4 експериментальні варіанти освітлення з використанням LED-фітоламп потужністю 100 Вт, встановлених на висоті 25 см над рослинами:

Варіант 1 (контрольний) – повний спектр (380-780 нм).

Варіант 2 – переважно синій спектр (70 % синій, 30 % червоний).

Варіант 3 – переважно червоний спектр (70 % червоний, 30 % синій).

Варіант 4 – комбінований спектр із додаванням ІЧ і УФ (50 % червоний, 30 % синій, 10 % ІЧ, 10 % УФ).

Усі інші умови вирощування були стандартними та однаковими:

- **Температура:** + 23 °С вдень, + 18 °С вночі;
- **Вологість повітря:** 65-70 %;
- **Фотоперіод:** 16 год/добу;
- **Субстрат:** торф'яно-кокосова суміш;
- **Полив:** крапельний, автоматизований;
- **Живлення:** розчин NPK 12-12-18 з мікроелементами.

Параметри, що досліджувалися: середня висота рослин (см); кількість справжніх листків (шт); площа листкової поверхні (см²); маса сирової біомаси (г); вміст хлорофілу a + b (за Арнон); урожайність (кг/м²).

Дані збиралися щотижня протягом 8 тижнів вегетації. Статистичну обробку результатів здійснювали методом дисперсійного аналізу (ANOVA) з рівнем значущості $p \leq 0,05$.

У результаті дослідження встановлено, що спектральний склад освітлення істотно впливає на ріст, розвиток та продуктивність овочевих культур у закритому ґрунті. Узагальнені дані по варіантах дослідження подано в таблицях 2, 3.

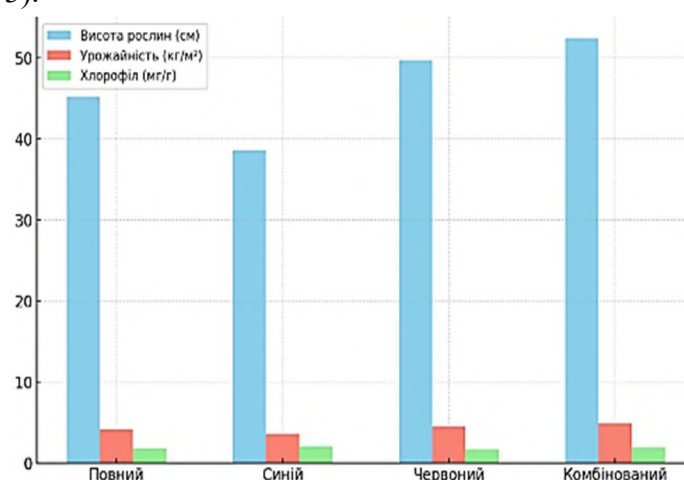
Таблиця 2 – Вплив спектрального складу фітоламп на показники томату

Показник	Варіант 1 (повний спектр)	Варіант 2 (синій)	Варіант 3 (червоний)	Варіант 4 (комбінований)
Висота рослин, см	45,2	38,6	49,7	52,4
Кількість квіток, шт	15	11	18	20
Маса плодів, г/рослина	243	211	267	288
Урожайність, кг/м ²	4,1	3,6	4,5	4,9
Вміст хлорофілу, мг/г	1,82	2,06	1,67	1,94

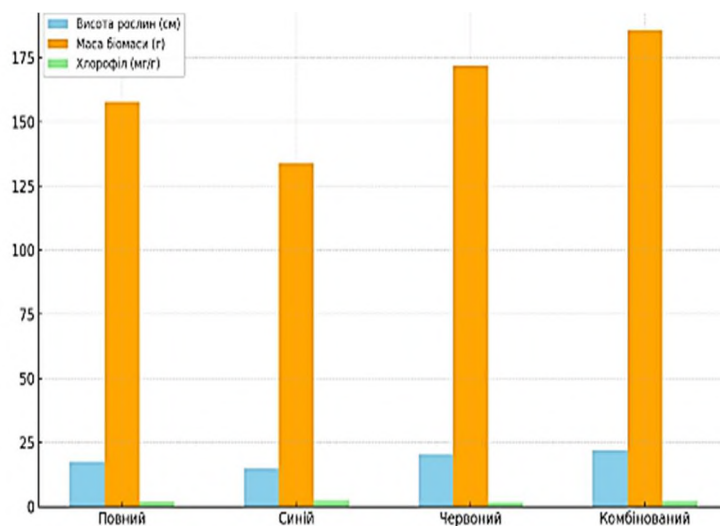
Таблиця 3 – Вплив спектрального складу фітоламп на показники салату

Показник	Варіант 1 (повний спектр)	Варіант 2 (синій)	Варіант 3 (червоний)	Варіант 4 (комбінований)
Висота рослин, см	17,5	14,9	20,4	22,1
Листкова поверхня, см ²	282	316	268	305
Маса сирової біомаси, г	158	134	172	186
Вміст хлорофілу, мг/г	2,08	2,47	1,77	2,38
Сухий залишок, %	6,2	6,5	6,8	7,1

За узагальненими даними таблиць 2, 3, можна побудувати діаграми, які показують вплив різних спектральних режимів LED-фітоламп на висоту рослин, вміст хлорофілу та урожайність (рис. 3).



a



б

Рис. 3. Вплив спектра фітолампи на ріст та продуктивність:
а – томату; б – салату

Як видно, найвищі показники за всіма критеріями досягнуто при використанні комбінованого спектра.

Аналіз отриманих результатів засвідчив, що для томату найвищі показники за всіма ключовими параметрами спостерігалися при використанні комбінованого спектра освітлення. Урожайність у цьому варіанті сягала 4,9 кг/м², що на 19,5 % вище за контрольний варіант (повний спектр) і на 36 % – за варіант із домінуванням синього спектра. Аналогічна динаміка виявлена за масою плодів та кількістю квіток. Збільшення біомаси та ріст рослин у цьому режимі пояснюється синергічною дією синього (формування листяної маси), червоного (регуляція плодоношення), інфрачервоного (розвиток кореневої системи) та ультрафіолетового світла (активація стійкості).

Хоча синій спектр забезпечив найвищий вміст хлорофілу (2,06 мг/г), він не компенсував загальну втрату продуктивності, ймовірно через відсутність активного стимулювання генеративних процесів. Червоний спектр, навпаки, суттєво активізував плодоношення, але без належної вегетативної підтримки, що позначилося на рівні хлорофілу та довготривалості розвитку.

Для салату перевага комбінованого спектра проявилася у максимальних значеннях біомаси (186 г), висоти (22,1 см) та сухої речовини (7,1 %), що вказує на збалансований ріст і високу якість продукції. Синій спектр забезпечив найвищий вміст хлорофілу (2,47 мг/г) і площу листової поверхні (316 см²), однак поступався у загальній масі врожаю. Це підтверджує, що синій спектр є критично важливим для ранніх етапів росту, але для максимальної продуктивності необхідна присутність червоного та ІЧ-компонентів.

Таким чином, поєднання червоного, синього, ІЧ та УФ-випромінювання в адаптивному режимі LED-освітлення створює оптимальні умови для розвитку як вегетативних, так і генеративних органів овочевих культур.

Висновок. Результати моделювання та аналізу спектрального впливу фітоламп на ріст, фотосинтетичну активність і продуктивність овочевих культур свідчать про вирішальну роль комбінованого спектрального режиму у підвищенні ефективності тепличного вирощування. Поєднання червоного, синього, інфрачервоного та ультрафіолетового випромінювання забезпечує збалансований розвиток рослин на всіх етапах онтогенезу – від формування вегетативної маси до плодоношення.

Встановлено, що при використанні комбінованого спектра спостерігається максимальне зростання урожайності томату (до 4,9 кг/м²), а також збільшення біомаси салату (до 186 г/рослина) з одночасним покращенням якісних параметрів, таких як вміст хлорофілу та сухої речовини. Порівняно з моноспектральними варіантами, комбіноване освітлення забезпечує найвищу ресурсну ефективність, оптимізує фотоморфогенез та підвищує стійкість рослин до стресових факторів.

Також необхідно враховувати, що LED-фітолампи можуть динамічно змінювати співвідношення різних довжин хвиль, на відміну від традиційних ламп, вони дозволяють точно налаштовувати спектр у режимі реального часу. Таким чином, застосування LED-фітоламп з комбінованим спектром є не лише агротехнічно ефективним, але й економічно доцільним рішенням для сучасного тепличного господарства. Це оптимізує процес опромінення та енергоспоживання, забезпечує зниження витрат на закупівлю додаткових ламп та сприяє підвищенню економічної рентабельності тепличного виробництва в умовах обмежених ресурсів.

Отже, впровадження адаптивних світлодіодних систем із керованим спектром у тепличному виробництві слід розглядати як інноваційну складову сучасного аграрного середовища, особливо в контексті післявоєнного відновлення продовольчої безпеки України.

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

Під час написання цього матеріалу автор(и) використовували [<https://chatgpt.com>] – [Для зменшення об'єму тексту проаналізованих досліджень за тематикою публікації та систематизація і узагальнення результатів експерименту]. Після використання цього інструменту/сервісу автор(и) переглянув(ли) та відредагував(ли) зміст за потреби і взяв(ли) на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Петров, О., & Іваненко, Л. (2023). Сучасні технології в тепличному господарстві: Автоматизація, енергоефективність та інновації. *Технічні науки та агротехнології*, 2(18), 45-52.
2. Ковальчук Р., & Савчук І. (2022). Вплив спектрального складу штучного освітлення на ріст і розвиток овочевих культур у захищеному ґрунті. *Агротехнології та біоенергетика*, 4(12), 33-40.
3. Ткаченко Л., & Бондар А. (2023). Ефективність застосування фітоламп із різним спектральним складом у тепличному рослинництві. *Світ аграрної науки*, 1(25), 58-64.
4. Мельник Д., & Гринюк О. (2024). Спектральна оптимізація LED-фітоламп для регуляції росту рослин у закритому ґрунті. *Інженерія аграрних систем*, 2(30), 41-48.
5. Сидоренко В., & Литвиненко Ю. Порівняльний аналіз спектральних характеристик фітоламп і традиційних джерел світла в аграрному виробництві. *Світло в агросистемах*, 3(11), 27-34.
6. Ehleringer J., & Björkman O. (1997). Quantum yields for CO₂ uptake in C₃ and C₄ plants: dependence on temperature, CO₂, and O₂ concentration. *Plant Physiology*, 1(59), 86-90.
7. Murchie E., & Lawson T. (2013). Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. *Journal of Experimental Botany*, 13(64), 3983-3998.
8. Sager J., & McFarlane J. (1989). Radiation and photosynthesis. *Plant Growth Chamber Handbook*. 1-29.
9. Havaux, M. (1992). Stress tolerance of photosystem II in vivo: Antagonistic effects of photodamage and photoprotection due to carotenoids and epoxidation state of the xanthophyll cycle. *Planta*, 186(3), 450-460.
10. Дяченко І., & Романенко Л. (2023). Вплив спектрального складу світла на фотосинтетичну активність та пігментну систему рослин. *Фізіологія рослин і клітинна біологія*, 2(16), 21-28.
11. Maxwell K., & Johnson G. (2000). Chlorophyll fluorescence-a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345), 659-668.

12. Tyystjärvi E., & Herranen M. (2018). Blue light reduces photosynthetic efficiency of cyanobacteria through an imbalance between photosystems I and II. *Photosynthesis Research*, 138, 103-116.
13. Zhang C., & Porcar-Castell A. (2019). Do all chlorophyll fluorescence emission wavelengths capture the spring recovery of photosynthesis in boreal evergreen foliage?. *Plant, Cell & Environment*, 42, 2455-2469.
14. Mickens M., & Torralba M. (2017). Modeling light distribution within plant canopies using ray tracing and computational geometry techniques. *Frontiers in Plant Science*, 8, 805-917.

References

1. Petrov, O., & Ivanenko, L. (2023). Suchasni tekhnolohii v teplychnomu hospodarstvi: Avtomatyzatsiia, enerhoefektyvnist ta innovatsii [Modern technologies in greenhouse farming: automation, energy efficiency and innovation]. *Tekhnichni nauky ta ahrotekhnolohii. – Technical sciences and agricultural technologies*, 2(18), 45-52.
2. Kovalchuk R., & Savchuk I. (2022). Vplyv spektralnogo skladu shtuchnoho osvittlenia na rist i rozvytok ovochevykh kultur u zakhyshchenomu grunti [The influence of the spectral composition of artificial lighting on the growth and development of vegetable crops in protected soil]. *Ahrotekhnolohii ta bioenerhetyka. – Agrotechnology and Bioenergy*, 4(12), 33-40.
3. Tkachenko L., & Bondar A. (2023). Efektyvnist zastosuvannia fitolamp iz riznym spektralnym skladom u teplychnomu roslynnytstvi [The effectiveness of the use of phytolamps with different spectral composition in greenhouse crop production]. *Svit ahrarynoi nauky. – World of Agricultural Science*, 1(25), 58-64.
4. Melnyk D., & Hryniuk O. (2024). Spektralna optymizatsiia LED-fitolamp dlia rehuliacii rostu roslyn u zakrytomu grunti [Spectral optimization of LED phytolamps for plant growth regulation in closed soil]. *Inzheneriia ahrarynykh system. – Agricultural Systems Engineering*, 2(30), 41-48.
5. Sydorenko V., & Lytvynenko Yu. Porivnialnyi analiz spektralnykh kharakterystyk fitolamp i tradytsiinykh dzherel svitla v ahrarynomu vyrobnytstvi [Comparative analysis of spectral characteristics of phytolamps and traditional light sources in agricultural production]. *Svitlo v ahrosystemakh. – Light in Agricultural Systems*, 3(11), 27-34.
6. Ehleringer J., & Björkman O. (1997). Quantum yields for CO₂ uptake in C₃ and C₄ plants: dependence on temperature, CO₂, and O₂ concentration. *Plant Physiology*, 1(59), 86-90.
7. Murchie E., & Lawson T. (2013). Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. *Journal of Experimental Botany*, 13(64), 3983-3998.
8. Sager J., & McFarlane J. (1989). Radiation and photosynthesis. *Plant Growth Chamber Handbook*. 1-29.
9. Havaux, M. (1992). Stress tolerance of photosystem II in vivo: Antagonistic effects of photo-damage and photoprotection due to carotenoids and epoxidation state of the xanthophyll cycle. *Planta*, 186(3), 450-460.
10. Diachenko I., & Romanenko L. (2023). Vplyv spektralnogo skladu svitla na fotosyntetychnu aktyvnist ta pihmentnu systemu Roslyn [The influence of the spectral composition of light on the photosynthetic activity and pigment system of plants]. *Fiziolohiia roslyn i klitynna biolohiia Plant. – Physiology and Cell Biology*, 2(16), 21-28.
11. Maxwell K., & Johnson G. (2000). Chlorophyll fluorescence-a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345), 659-668.
12. Tyystjärvi E., & Herranen M. (2018). Blue light reduces photosynthetic efficiency of cyanobacteria through an imbalance between photosystems I and II. *Photosynthesis Research*, 138, 103-116.
13. Zhang C., & Porcar-Castell A. (2019). Do all chlorophyll fluorescence emission wavelengths capture the spring recovery of photosynthesis in boreal evergreen foliage?. *Plant, Cell & Environment*, 42, 2455-2469.
14. Mickens M., & Torralba M., (2017). Modeling light distribution within plant canopies using ray tracing and computational geometry techniques. *Frontiers in Plant Science*, 8, 805-917.

Отримано 22.07.2025

Vitaliy Mardzyavko¹, Andriy Rudenko²

¹Assistant Professor, Department of Electric Power, Electrical Engineering and Electromechanics
Mykolaiv National Agrarian University (Mykolaiv, Ukraine)

E-mail: vitalijmardzavko@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7327-9215>

²Assistant Professor, Department of Electric Power, Electrical Engineering and Electromechanics
Mykolaiv National Agrarian University (Mykolaiv, Ukraine)

E-mail: andrey0911r@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5103-6412>

RESEARCH OF THE SPECTRAL COMPOSITION OF LED PHYTOLAMPS TO INCREASE THE PRODUCTIVITY OF VEGETABLE CROPS IN CLOSED GROUND

In the current conditions of development of the agricultural sector of Ukraine, especially in the context of post-war recovery, the relevance of implementing highly efficient technologies for growing vegetable crops in closed soil is increasing. One of the key factors in successful greenhouse production is the rational use of artificial lighting, in particular LED phytolamps with variable spectral composition. The use of modern LED light sources allows increasing the efficiency of photosynthetic processes, activate plant growth and development, reduce energy consumption, and increase the profitability of greenhouse farming.

The aim of the article is to experimentally study the effect of the spectral composition of LED phytolamps (red, blue, IR, UV components) on the growth, physiological state, and yield of tomatoes and lettuce grown in protected soil.

The paper presents results of the comparison of four spectral lighting options using similar microclimate conditions, which allowed us to clearly trace the effect of each spectrum and their combinations. Data are provided on changes in plant height, leaf surface area, chlorophyll content, biomass mass, and yield for each option.

It has been shown for the first time that the combined use of red, blue, infrared, and ultraviolet radiation creates a synergistic effect that ensures balanced development of both vegetative and generative organs of vegetable crops. Statistical analysis of the results confirmed the reliability of the positive impact of the combined spectrum on key agronomic indicators.

The presented results can be used to improve methods for selecting LED lighting, designing adaptive spectrum management systems in greenhouses, and as a basis for further scientific research in the field of energy-efficient agricultural production.

Keywords: phytolamp; spectral composition; LED lighting; greenhouse production; photosynthesis; vegetable crops.

Fig.: 3. Table: 3. References 14.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-419-431](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-419-431)

UDC 621.314.1

Vasyl Tarasiuk¹, Oleksiy Gorodny²¹PhD Student of the Department of Electrical Engineering and Information and Measurement Technologies
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)E-mail: vasyltarasiuk.ua@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5310-9202>²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)E-mail: aleksey.gorodny@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5303-9564>

ADAPTIVE CONTROL TO ENHANCE ENERGY EFFICIENCY IN QUASI-RESONANT SWITCHED-MODE CONVERTERS UNDER DYNAMIC LOADS

Modern demands for energy efficiency and power density are stimulating the transition to quasi-resonant converters capable of minimizing switching losses. This article systematizes the limitations of both classical linear regulators and common nonlinear approaches to power switch control. To increase the energy efficiency of quasi-resonant converters, a hybrid control architecture based on artificial intelligence is proposed. The task of an artificial intelligence control system is to ensure stability and increase the energy efficiency of switched-mode voltage converters. AI-based control options are considered, namely: neural networks, fuzzy logic, and reinforcement learning.

Keywords: quasi-resonant converter; zero-current switching; zero-voltage switching; artificial intelligence; pulse-width modulation; energy efficiency; switched-mode voltage converter.

Fig.: 4. Table: 4. References: 21.

Relevance of the research. Modern energy efficiency standards impose strict requirements on switched-mode voltage converters, demanding high power conversion efficiency (PCE) not only in nominal mode but across the entire range of load parameter variations. For classical converters with pulse-width modulation (PWM), this task is challenging, as their PCE significantly decreases at light loads due to the dominance of switching power losses inherent to PWM converters at high operating frequencies. A promising alternative is quasi-resonant converters, which, by implementing zero-current switching (ZCS) or zero-voltage switching (ZVS), can minimize switching losses.

The main obstacle limiting their application is a systemic problem: the primary control method—pulse-frequency modulation (PFM), used to maintain the zero-current or zero-voltage switching mode of the power switches as the load changes—itself becomes a source of significant losses. The physics of the process is that to increase the energy transferred to the load, the system reduces the on-time of the power switch, while the duration of the resonant process remains constant, leading to a sharp increase in operating frequency. Such an increase in frequency negates the advantages of operating with ZVS and ZCS by activating other loss mechanisms: gate drive losses and core losses in magnetic components increase. Thus, a fundamental contradiction exists between the necessity of maintaining zero-current or zero-voltage switching modes and the reduction in efficiency due to the side effects of traditional control methods, which necessitates the search for new intelligent approaches.

Target setting. The drawback of classical approaches to controlling quasi-resonant converters, including industrial controllers and PID (Proportional-Integral-Derivative) based regulators, is their optimization for a narrow operating region. When operating beyond its boundaries, these systems are unable to adapt to a wide range of loads and other factors, which manifests in the loss of the zero-current or zero-voltage switching mode and, as a consequence, a significant drop in efficiency. The analysis of existing research shows that a key gap remains as follows: the absence of comprehensive solutions that simultaneously optimize integral efficiency, dynamic regulation performance, and compliance with electromagnetic compatibility (EMC) standards.

In this context, the research objective is to create an adaptive control method capable of calculating optimal switching instants in real-time for the guaranteed maintenance of the zero-current or zero-voltage switching mode. This controller must not only stabilize the output voltage

but also minimize total power losses (conduction, switching, and control), considering hardware limitations and requirements for the level of electromagnetic interference. The idea is that combining a model-oriented part to guarantee stability with intelligent methods (neural networks, reinforcement learning) will make it possible to solve this complex problem.

Actual scientific researches and issues analysis. Over the last decade, power electronics has seen a steady transition towards quasi-resonant and switched-mode voltage converters. Fundamental research has substantiated the advantages of using quasi-resonant converters, which have enabled increased power density and efficiency compared to classical converters with PWM [1]. These solutions are enhanced by the introduction of wide-bandgap semiconductors (GaN, SiC), which, thanks to their high-speed operation, allow for raising operating frequencies into the megahertz range, imposing even stricter requirements on the accuracy and adaptability of control systems [2].

The implementation of wide-bandgap semiconductor power switches (GaN, SiC) is a promising direction for the development of switched-mode voltage converters. The ability to operate at frequencies measured in units and tens of megahertz allows for achieving high power density, but at the same time, it reduces the time windows for decision-making to nanoseconds. Under these conditions, traditional controllers based on discrete calculations with a fixed clock cycle prove to be too slow. Their limited speed does not allow for tracking instantaneous changes in the resonant circuit, leading to the inevitable loss of the soft-switching mode, a sharp increase in dynamic losses, and potential loss of stability. Thus, the transition to GaN/SiC transforms the task of adaptive control from a desirable optimization into a critically necessary condition for realizing the potential of the modern component base.

Systems based on Fuzzy Logic Control (FLC) have proven their effectiveness in controlling complex nonlinear quasi-resonant converters, demonstrating improved transient responses without the need for a precise mathematical model [3]. The latest research demonstrates the potential of Deep Reinforcement Learning (DRL), which has been successfully applied to create a fully autonomous [4], model-dependent control system for a complex three-level Neutral-Point-Clamped (NPC) inverter, showing results that surpass even Model Predictive Control (MPC) [5].

However, the analysis reveals key gaps, including: most works on DRL concern simple PWM topologies, while for more complex switched-mode voltage converters, they are limited to simulation. There is a lack of comprehensive solutions that simultaneously optimize integral efficiency, dynamics, and EMC indicators, and that have been brought to experimental proof on real equipment.

The aim of the research is to develop an experimental validation of a hybrid adaptive control method that solves the problem of efficiency drop under dynamic load changes and ensures consistently high integral energy efficiency. The key objectives to achieve this goal are increasing integral energy efficiency and complying with strict constraints on the level of electromagnetic interference and the thermal management of the switched-mode voltage converter elements. Moreover, the synthesized controller must be oriented towards practical implementation with a minimal set of required sensors and acceptable computational costs for microcontrollers or Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs) [6]. The effectiveness of the proposed approach must be proven through comparative simulation and experimental research on a test bench using the proposed control strategies.

The statement of basic materials. For decades, converters with PWM have been the foundation of power electronics, which was fully justified by their simplicity and reliability. However, the technological revolution, driven by the rapid development of very-large-scale integrated circuits, has fundamentally changed the requirements for energy efficiency. The transition to com-

pact and increasingly powerful digital systems has brought entirely new priorities for power supplies to the forefront, namely: maximum power density and high energy efficiency across different load levels. It is under these new conditions that classical PWM topologies require significant improvement.

The main drawback of PWM converters lies in high switching losses, which arise from the simultaneous presence of high voltage and current on the switching element during switching transients. These losses, dissipated as heat, become excessive as the operating frequency increases. Thus, high switching losses impose a strict upper limit on the operating frequency, which, in turn, limits the achievable power density. In practice, this limits the power density of PWM converters. In addition to losses, the high rates of change of current (di/dt) and voltage (dv/dt), characteristic of hard switching, generate significant electromagnetic interference (EMI), which complicates the design and requires additional filters [7].

Table 1 presents a comparative analysis of two fundamental approaches to designing switched-mode voltage converters, namely: traditional PWM with hard switching and modern quasi-resonant converter topologies with soft switching. The table systematizes the key differences across five criteria. Switching losses are the main drawback of PWM, whereas quasi-resonant converters minimize them by switching at zero current or zero voltage. This, in turn, allows for a significant increase in the operating frequency in quasi-resonant converter systems, which is limited in PWM systems due to rising losses. Consequently, quasi-resonant converters have a much lower level of electromagnetic interference. The final row highlights the trade-off: although quasi-resonant converter technologies are generally more efficient, their efficiency can decrease during rapid changes in load parameters not using complex adaptive control algorithms [8].

Table 1 – Comparison of PWM and quasi-resonant converters

Characteristic	PWM converters (hard switching)	Quasi-resonant converters (soft switching)
Switching losses	High, dominant	Minimal (theoretically zero)
Operating frequency	Limited by losses	High (allows for smaller component sizes)
EMI level	High (due to sharp di/dt and dv/dt)	Low (due to sinusoidal current or voltage waveforms)
Efficiency	Decreases at high frequencies and light loads	High over a wide range, but can decrease under variable loads without adaptive control

Source: developed by the authors.

Soft switching is a key technology that allows overcoming the limitations of PWM converters. Its fundamental principle consists of using a resonant circuit—a network of inductors and capacitor—to shape the voltage and current signals in such a way as to avoid their simultaneous presence on the power switch during switching. This is achieved through two main mechanisms: zero-current switching or zero-voltage switching.

Zero-voltage switching: This mechanism ensures that the voltage across the switching element is zero immediately during its turn-on or turn-off. This effectively eliminates the losses associated with recharging the power switch's capacitances, which are dominant at high frequencies. This is typically achieved using a resonant capacitor connected in parallel with the power switch.

Zero-current switching: This mechanism guarantees that the current flowing through the switch is zero during its turn-on or turn-off. This minimizes the losses associated with breaking an inductive circuit. It is implemented using a resonant inductor connected in series. The schematic of a parallel quasi-resonant converter with zero-current switching and its timing diagrams are shown in Figure 1 and Fig. 2, respectively.

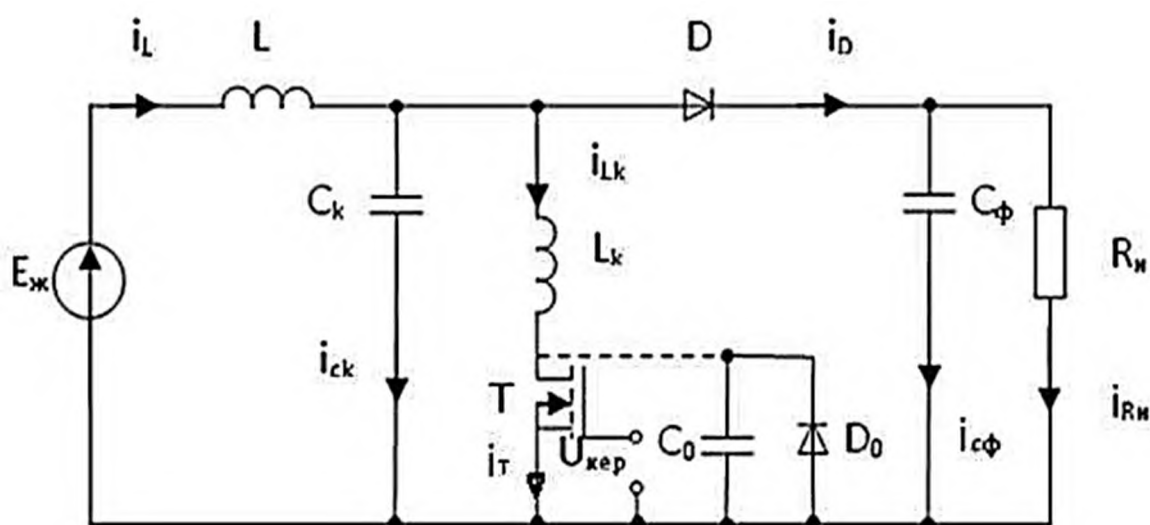


Fig. 1. Schematic of a parallel ZCS quasi-resonant converter

Source: [9].

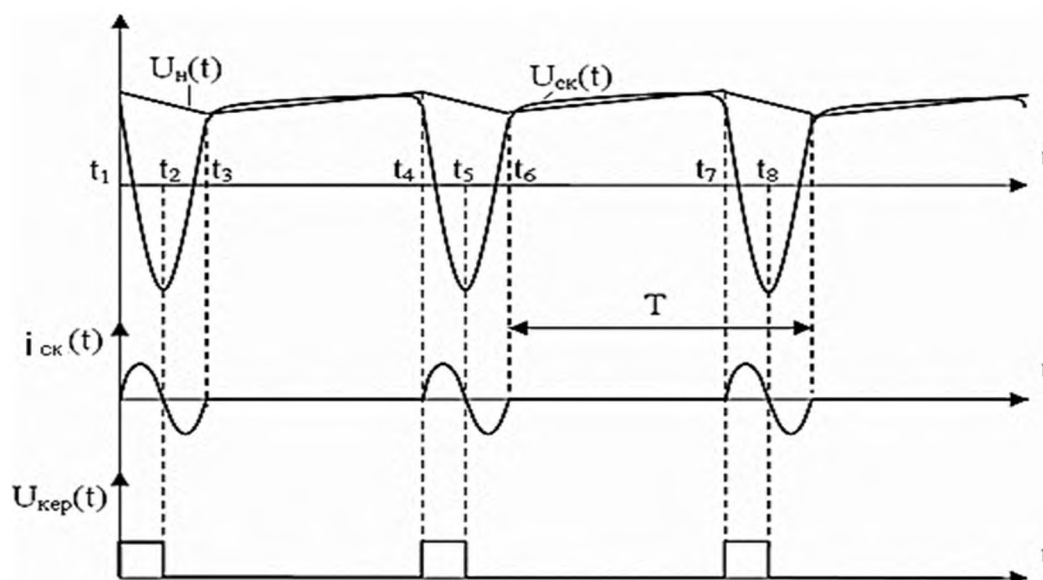


Fig. 2. Timing diagrams of the ZCS quasi-resonant converter

Source: [9].

The advantage of zero-current or zero-voltage switching is the ability to significantly increase the operating frequency of the switched-mode voltage converter without a substantial increase in switching losses. High-frequency operation, in turn, allows using smaller electronic components, leading to a significant increase in power density and overall system efficiency.

Table 2 details the two main mechanisms underlying soft-switching technology, namely: zero-current and zero-voltage switching. For each mechanism, the table explains the principle of operation—the condition under which the power switch is turned on. It then identifies the specific type of loss that is eliminated: for zero-current switching, it is the losses from recharging the power switch's output capacitance, which is critical at high frequencies, and for zero-voltage switching, it is the losses associated with breaking an inductive circuit. This table serves to clearly distinguish between these two fundamental principles.

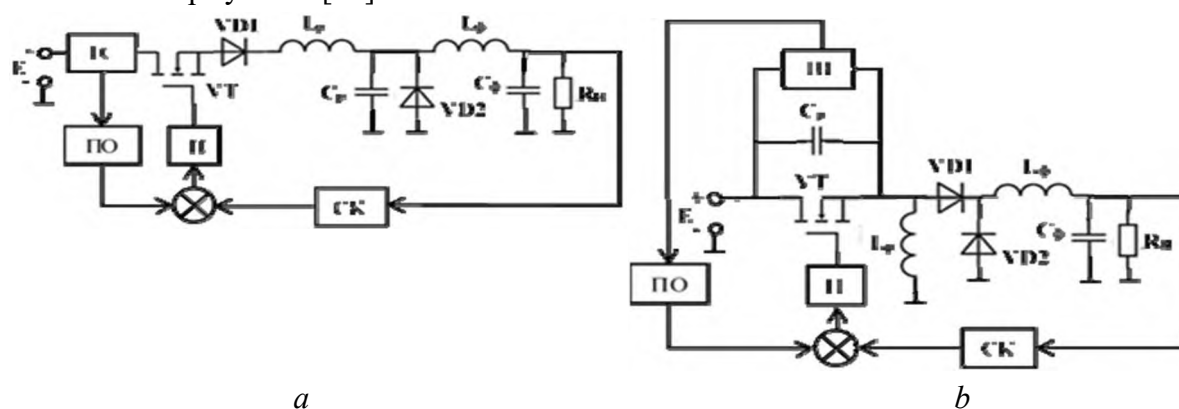
Table 2 – Main mechanisms of soft switching

Principle of operation	Type of loss eliminated	Key resonant element
Switching occurs when the voltage across the switch is zero	Losses from recharging the power switch's output capacitance	Capacitor connected in parallel with the power switch
Switching occurs when the current through the switch is zero	Losses associated with breaking the inductive circuit	Inductor connected in series with the power switch

Source: developed by the authors.

Figure 3 shows the functional schematics for implementing the quasi-control mode in quasi-resonant converters: a – ZCS quasi-resonant converter, b – ZVS quasi-resonant converter. In the initial stage of operation, the control system generates a short pulse that turns on the power switch. Subsequently, on the secondary windings of the current transformer (for a ZCS quasi-resonant converter) or voltage transformer (for a ZVS quasi-resonant converter), signals appear that are proportional to the resonant current or resonant voltage, respectively. The resulting signals are amplified by a threshold amplifier and converted into control pulses for the power switches, creating a local positive feedback loop that holds the transistors in the on state. At this point, the initial pulse from the control system is no longer needed; during the subsequent on-state interval, the power switches operate directly from the feedback loop. This forms the basis of the quasi-control principle.

When the value of the resonant current (in the case of a ZCS quasi-resonant converter) or voltage (for a ZVS quasi-resonant converter) approaches zero, the positive feedback action ceases, and the power switches automatically turn off. The conditions for the emergence and cessation of the positive feedback are determined by the principles of automatic control theory for closed-loop systems [10].



a

b

A – amplifier (- П – підсилювач)

AL – amplifier-limiter (ПО – підсилювач-обмежувач)

CT – current transformer (ТС – трансформатор струму)

VT – voltage transformer (ТН – трансформатор напруги)

CS – control system (СК – система керування)

Fig. 3. Functional schematics of the quasi-control mode implementation:

a – ZCS quasi-resonant converter; b – ZVS quasi-resonant converter

Source: [10].

Equation 1 shows the calculation of energy losses in the power switch of a series of the quasi-resonant converter with zero-current switching. The approach consists of dividing the operating period of the switched-mode voltage converter into four characteristic intervals, for each of which the time dependencies $U_{TP}(t)$ and $i_{TP}(t)$ are determined. Based on these dependencies, the instantaneous power losses are calculated [10]:

$$P_n = \frac{1}{t_n - t_{n-1}} \int_{t_{n-1}}^{t_n} U_{TP}(t) \cdot i_{TP}(t) dt. \quad (1)$$

Sliding Mode Control (SMC) is a powerful nonlinear technique that has gained recognition for its energy efficiency in various operating modes. In many power electronics applications, SMC is considered a more appropriate and widely researched alternative to fuzzy and adaptive control [11].

Principle of operation: In a switched-mode converter that switches at zero current or zero voltage, the power switch is part of a resonant circuit with an inductor L and a capacitor C , in which energy is periodically exchanged between the magnetic field of the inductor and the electric field of the capacitor. When the power switch turns on, the current through it begins to rise not linearly, but according to a sinusoidal law. At the moment of switching, the control system waits for this sinusoidal current to naturally decrease to zero. It is at this moment that it turns off the transistor. “Sliding” is the process during which the controller “slides” along the curve of the falling current, awaiting the moment of zero crossing. It does not forcibly turn off the power switch when the current is still high but “allows” the oscillatory process to bring the current to zero on its own. This provides ideal conditions for turn-off. There are two main approaches to implementing SMC in converters:

- SMC based on hysteresis modulation: This is a classical approach that is simple to implement, but its main drawback is a variable switching frequency. This complicates the design of output filters and can create problems with electromagnetic compatibility.
- SMC based on fixed-frequency PWM: This more modern approach solves the problem of operating over a wide frequency range, making it significantly more effective in practical applications. General methods have been developed for synthesizing PWM control laws for switched-mode converters operating in both continuous and discontinuous current modes.

The application of SMC allows bridging the gap between control theory and the practice of power electronics, providing reliable and fast regulation for DC-DC converters.

Fuzzy logic-based control is another intelligent strategy that does not require a precise mathematical model. It is based on human experience and qualitative control rules in an “if-then” format, making it ideal for complex nonlinear systems, including quasi-resonant converters where linear PID regulators are challenging to apply.

The standard architecture of a traditional FLC includes three stages: converting crisp input values, such as the error and the change in error, into fuzzy sets; applying a rule base (e.g., a 7×7 table with 49 rules); and converting the fuzzy conclusion into a crisp control signal. However, this approach has significant practical drawbacks, especially for embedded systems: high computational complexity, substantial memory requirements for storing the rule base, and difficulty in tuning the scaling factors and the rules themselves. These limitations can reduce the maximum achievable switching frequency and complicate implementation on microcontrollers or digital signal processors.

To solve these problems, simplified fuzzy logic controllers (SFLC) have been developed. The innovation of SFLC lies in using a single input variable and a one-dimensional rule base. This significantly reduces memory requirements and computational complexity. As a result, the algorithm becomes simpler to implement and tune, and also increases performance speed, allowing it to be effectively used in high-frequency quasi-resonant converters for current or voltage regulation. The evolution from FLC to SFLC is a clear example of the engineering search for a compromise between energy efficiency, control system stability, and the complexity of its practical implementation [12].

A promising direction in the control of electronic power switches is the application of deep learning. Reinforcement learning is based on the purposeful acquisition of experience: the controller manages the power switch and the load, and through trial and error, learns to make better decisions.

The control task is conveniently formalized as a Markov Decision Process (MDP) [13], namely: “states – actions – reward function”. The goal of the controller is to find an effective control policy, that is, a rule for selecting actions based on the current state. In deep reinforcement learning, deep neural networks are used to approximate the value function, which allows for handling diverse situations and preparing the control system for operation with a real device. The practical design of a DRL controller requires the careful definition of three main elements:

- State (st): This is a set of observable variables that fully characterize the current state of the system. For a power converter, this would include: the output voltage error, inductor currents, and capacitor voltages.
- Action (at): This is the set of possible control inputs. For switched-mode converters, this can be a discrete set corresponding to the permissible switching states of the power switches, or a continuous value such as the duty cycle or switching frequency. The choice of control algorithm depends on the capabilities of the quasi-resonant converter and the expected results.
- Target (reward) Function (rt): The design of the reward function is of paramount importance as it defines the control objective. A well-designed reward function allows for achieving minimization of the output voltage error, ensuring voltage balancing in the DC link of NPC inverters, and improving energy efficiency [14].

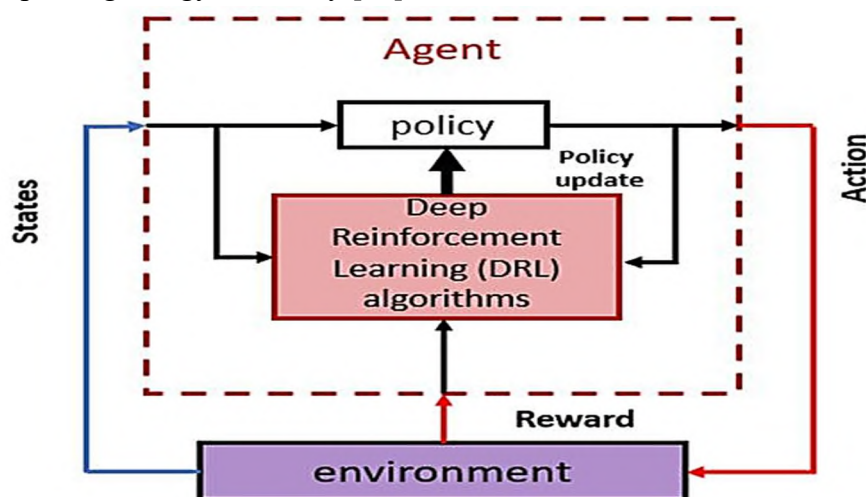


Fig. 4. Schematic of a DRL controller's operation

Source: [15].

The NPC inverter is a fundamental topology for low and medium-power switched-mode converters due to its reduction of total harmonic distortion, limitation of the rate of voltage change (dv/dt), and lower operating voltages across the power switches. At the same time, synthesizing a control system for this inverter is a complex task, as it requires simultaneously ensuring voltage balance on the DC-link capacitors and selecting optimal switching vectors from a set of permissible configurations, considering criteria for loss minimization and compliance with electromagnetic compatibility requirements.

DRL (specifically, a Deep Q-Network, DQN, agent) offers a model-free solution that can control the switching process to simultaneously regulate output parameters and balance the neutral-point voltage. This is achieved through a reward function whose goal is to maintain the system's stability and energy efficiency. The DRL approach compares favorably to traditional methods, including space-vector modulation [16] or model predictive control [17], thanks to its ability to adapt to parameter changes and system uncertainties without requiring a precise mathematical model.

A critical problem for applying DRL in physical systems is the difference between simulation and real-world operation (the “sim-to-real” gap). DRL agents require millions of iterations for training.

ning, which is impractical and unsafe on real equipment. Therefore, training is conducted in a simulation environment. The problem is that control policies trained in an ideal simulation can show significantly worse results when deployed on a real system due to unmodeled dynamics, sensor errors, and parameter discrepancies. To overcome this gap, the following strategies are used:

- Environment randomization: Training the agent in various simulation environments with randomized physical parameters (inductance, capacitance, load) to force it to learn more robust methods for stabilizing the system's energy efficiency.
- System identification: Using experimental data to build a more accurate model of the real equipment, which is then used in the simulation.
- Fine-tuning on hardware [18]: After initial training in simulation, a short and safe stage of online training is conducted on the real switched-mode voltage converter to adapt the control policies.

Hardware-in-the-Loop (HIL) simulation: The use of HIL systems, such as Opal-RT, as an intermediate stage between pure simulation and a physical prototype is a key tool for verifying the effectiveness of the control method [19].

The success of DRL in power electronics depends not only on the algorithm itself but also on the parallel development of high-precision simulations and knowledge transfer methods. This changes the role of the control engineer—from a developer of mathematical models to a designer of training environments and reward function systems.

The practical implementation of advanced control systems requires consideration of two key aspects, namely: combining different methodologies to create synergistic hybrid systems and selecting the appropriate hardware platform (Digital Signal Processor (DSP) [20] or FPGA) for executing computationally intensive algorithms in real-time.

Modern control approaches do not require the complete replacement of old approaches with new ones. Instead, hybrid architectures allow for combining the effective aspects of different methods to achieve better results. In renewable energy systems, an artificial neural network [21] can predict the optimal operating point (e.g., the maximum power point), while SMC is used as a fast and reliable inner loop to track this reference point.

The main principle of these hybrid systems lies in functional distribution: the tasks of learning and adaptation are assigned to the artificial intelligence component (neural network/fuzzy logic), while guaranteed stability and energy efficiency are provided by the traditional component (SMC/PID). Executing complex control algorithms in real-time requires appropriate hardware platforms. The two main classes of devices used for these purposes are DSPs and FPGAs.

DSPs are specialized microprocessors optimized for the rapid execution of mathematical operations. They are programmed using high-level languages (e.g., C/C++), which provides flexibility and a relatively fast development cycle. DSPs are best suited for sequential, complex algorithms.

FPGAs are a configurable hardware platform. They do not execute program code but are configured to create specialized digital circuits. Their key advantage is the ability to perform a multitude of simple operations simultaneously with very low latency. This makes them effective for tasks that can be executed in parallel.

The choice between a DSP and an FPGA for implementing AI-based control systems largely depends on the structure of the algorithm itself. DSPs are well-suited for traditional control loops and more sequential AI algorithms. In contrast, FPGAs, thanks to their architecture that enables the massive parallel execution of a large number of tasks, are the appropriate choice for implementing neural networks, as quasi-resonant converter systems require processing a large amount of data in parallel. Modern FPGAs contain specialized tensor blocks to accelerate the matrix and vector operations that form the basis of AI algorithms, providing higher performance and energy efficiency for such tasks. The low latency of FPGAs is also critically important for high-frequency control loops.

To generalize and systematize the considered control methods, their key characteristics, advantages, and disadvantages are summarized in two comparative tables. This approach allows for a separate evaluation of the technical performance indicators and the practical aspects of implementing each control method.

Table 3 presents a comparison of the technical characteristics and performance indicators of the considered control methods. The analysis is conducted based on four key criteria. Model dependency shows how sensitive the method is to the accuracy of the system's mathematical description. Robustness to disturbances assesses the controller's ability to maintain stable operation during changes in load or parameters. Dynamic response characterizes the speed of reacting to changes, and computational complexity indicates the requirements for hardware implementation. The table demonstrates the evolution from simple (PID), but unstable, methods to complex intelligent methods (SMC, DRL), which offer high stability and speed at the cost of significant computational resources.

Table 3 – Characteristics and performance indicators of control strategies

Control Strategy	Model Dependency	Robustness to disturbances and parameter changes	Dynamic response	Computational complexity
Linear PID	High	Low	Slow	Low
Phase-shift	Medium	Low	Moderate	Low
SMC	Low	Very high	Very fast	Medium
FLC	Model-free	High	Fast	Medium-High
DRL	Model-free	Very high	Very fast	Very high
Hybrid (FNSM)	Low	Very high	Very fast	High

Source: developed by the authors.

Table 4 supplements the previous analysis, focusing on the practical aspects of the implementation and application of each control method. Design complexity assesses the effort required to develop and tune the controller. For each method, its key advantages and disadvantages are highlighted. The final column defines the primary application domain, which allows a developer to choose the optimal approach for a specific task, balancing performance and implementation complexity.

Table 4 – Practical aspects and application domains of control strategies

Control Strategy	Design Complexity	Key Advantage	Key Disadvantage	Primary Application Domain
Linear PID	Low (systematic tuning)	Simplicity	Poor performance for nonlinear systems	Simple DC-DC converters
Phase-shift	Low	Simple implementation of zero-current or zero-voltage switching	Limited control range, high circulating currents	Resonant inverters
SMC	Medium (requires expertise)	Guaranteed stability	Variable frequency (in hysteretic types)	Reliable industrial drives, DC-DC converters
FLC	High (requires expert knowledge)	Handles nonlinearities, intuitive	Computational cost, tuning complexity	Quasi-resonant converters, nonlinear systems
DRL	Very high (requires simulation and data)	Autonomous optimization, adaptability	Difference between ideal simulation conditions and the real device	Complex multi-objective systems, real-time system adaptation
Hybrid (FNSM)	High	Combination of learning (NN) and stability (SMC)	Implementation complexity	High-performance systems with uncertainties

Source: developed by the authors.

Conclusions. The analysis has shown that in quasi-resonant converters, energy efficiency can decrease during rapid changes in operating load due to the limitations of classical control methods. Modern power switches based on GaN and SiC have switching times measured in nanoseconds. Therefore, the future of power electronics lies in the realm of hybrid control architectures. The combination of existing control methods that guarantee stability with intelligent, AI-based control methods is the most promising path for creating switched-mode voltage converters capable of realizing their maximum efficiency under a wide range of changing external factors (e.g., changes in supply voltage, load parameters, temperature).

Future research directions. Future research should focus on creating a control model using AI; validating the results through simulation; and comparing the simulation results with experimental research.

References

1. Obrubov, A. V. (2013, July). Quasi-resonant single-ended converter. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/245024076_Kvazirezonsnyj_odnotaknyj_preobrazovatel.
2. Jeng, S. L., Peng, M. T., Hsu, C. Y., Chieng, W. H., & Shu, J. P. H. (2012). Quasi-resonant flyback DC/DC converter using GaN power transistors. *World Electric Vehicle Journal*, 5(2), 567-573. <https://doi.org/10.3390/wevj5020567>.
3. Bendaoud, K., Krit, S., Kabrane, M., Ouadani, H., Elaskri, M., & Karimi, K. (2017, May 8-10). Fuzzy logic controller (FLC): Application to control DC-DC buck converter. *2017 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS)*, Monastir, Tunisia (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEMIS.2017.8272980>.
4. Mazaheri, N., Santamargarita, D., Bueno, E., Pizarro, D., & Cobrecas, S. (2024). A deep reinforcement learning approach to DC-DC power electronic converter control with practical considerations. *Energies*, 17(14), 3578. <https://doi.org/10.3390/en17143578>.
5. Li, M., Zhan, S., Chu, B., & Yan, X. (2019, May 27-30). Model predictive control of neutral point clamped inverter with reduced switching frequency. *2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia)*, Busan, South Korea (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.23919/ICPE2019-ECCEAsia42246.2019.8797232>.
6. Souza, N. O., Coelho, E. A. A., & Freitas, L. C. G. (2017, November 19-22). FPGA applied to the control of DC-AC converters using repetitive and feedforward control laws. *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, Juiz de Fora, Brazil (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/COBEP.2017.8257291>.
7. Heldwein, M. L., & Kolar, J. W. (2009). Impact of EMC filters on the power density of modern three-phase PWM converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(6), 1577-1588. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2014238>.
8. Dymereys, A. V. (2019). Program system for studying electrical and energy indicators of pulse converters. Chernihiv National Technological University. Supervisor: O. M. Gorodny. <https://inel.stu.cn.ua/konkurs/2019/Aktivator.pdf>.
9. Denysov, Yu. O., Gorodny, O. M., & Kupko, O. A. (2012). Features of operation and static characteristics of parallel quasi-resonant converters with zero-current switching. *Visnyk Chernihiv State Technological University*, 1(55), 239-245. <https://ir.stu.cn.ua/bitstream/handle/123456789/7119/663.pdf>.
10. Gorodny, O. M. (2018). Features of electronic switches control in quasi-resonant pulse converters. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (51), 94-98. http://nbuv.gov.ua/UJRN/PIED_2018_51_17.
11. Wu, L., Liu, J., Vazquez, S., & Mazumder, S. K. (2022). Sliding mode control in power converters and drives: A review. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 9(3), 392-406. <https://doi.org/10.1109/JAS.2021.1004380>.
12. Ramirez-Gonzalez, M., & Malik, O. P. (2009). Simplified fuzzy logic controller and its application as a power system stabilizer. In *2009 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISAP.2009.5352817>.

13. Alfred, D., Czarkowski, D., & Teng, J. (2024). Reinforcement learning-based control of a power electronic converter. *Mathematics*, 12(5), 671. <https://doi.org/10.3390/math12050671>.
14. Khajesalehi, J., & Afjei, E. (2022). Model predictive control of NPC inverter coupled to voltage doubled high step-up DC/DC converter in PV-active power filter application. In 2022 13th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC) (pp. 01-03). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PEDSTC53976.2022.9767461>.
15. Mazaheri, N., Santamargarita, D., Bueno, E., Pizarro, D., & Cobrecas, S. (2024). A deep reinforcement learning approach to DC–DC power electronic converter control with practical considerations. *Energies*, 17(14), 3578. <https://doi.org/10.3390/en17143578>.
16. Sabarad, J., & Kulkarni, G. H. (2015). Comparative analysis of SVPWM and SPWM techniques for multilevel inverter. In 2015 International Conference on Power and Advanced Control Engineering (ICPACE) (pp. 151-156). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICPACE.2015.7274949>.
17. Qashqai, P., Babaie, M., Zgheib, R., & Al-Haddad, K. (2023). A model-free switching and control method for three-level neutral point clamped converter using deep reinforcement learning. *IEEE Access*, 11, 105394-105409. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3318264>.
18. Zeng, Y., Jiang, S., Konstantinou, G., Pou, J., Zou, G., & Zhang, X. (2025). Multi-objective controller design for grid-following converters with easy transfer reinforcement learning. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 40(5), 6566-6577. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2025.3525500>.
19. Tasnim, M. N., Ahmed, T., Ahmad, S., & Mekhilef, S. (2023). Hardware in the loop implementation of the control strategies for the AC-microgrid in OPAL-RT simulator. In 2023 IEEE IAS Global Conference on Renewable Energy and Hydrogen Technologies (GlobConHT) (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/GlobConHT56829.2023.10087462>.
20. Lv, F., Dai, C., & Zhang, S. (2020). Design and application of software phase-locked loop based on DSP under voltage asymmetry. In 2020 7th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE) (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICISCE50968.2020.00106>.
21. Kumari, N., Abul Kalam, M., & Modi, V. (2022). Analysis of ANN control with buck converter for output voltage control of wind turbine for battery charging. In 2022 IEEE 2nd International Symposium on Sustainable Energy, Signal Processing and Cyber (iSSSC) (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/iSSSC56467.2022.10051353>.

Список використаних джерел

1. Обрубков, А. В. (2013, липень). Квазірезонансний одноктактний перетворювач. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/245024076_Kvazirezonsnyj_odnotaktnyj_preobrazovatel.
2. Jeng, S. L., Peng, M. T., Hsu, C. Y., Chieng, W. H., & Shu, J. P. H. (2012). Quasi-resonant flyback DC/DC converter using GaN power transistors. *World Electric Vehicle Journal*, 5(2), 567-573. <https://doi.org/10.3390/wevj5020567>.
3. Bendaoud, K., Krit, S., Kabrane, M., Ouadani, H., Elaskri, M., & Karimi, K. (2017, May 8-10). Fuzzy logic controller (FLC): Application to control DC-DC buck converter. *2017 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS)*, Monastir, Tunisia (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEMIS.2017.8272980>.
4. Mazaheri, N., Santamargarita, D., Bueno, E., Pizarro, D., & Cobrecas, S. (2024). A deep reinforcement learning approach to DC–DC power electronic converter control with practical considerations. *Energies*, 17(14), 3578. <https://doi.org/10.3390/en17143578>.
5. Li, M., Zhan, S., Chu, B., & Yan, X. (2019, May 27–30). Model predictive control of neutral point clamped inverter with reduced switching frequency. *2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 – ECCE Asia)*, Busan, South Korea (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.23919/ICPE2019-ECCEAsia42246.2019.8797232>.
6. Souza, N. O., Coelho, E. A. A., & Freitas, L. C. G. (2017, November 19–22). FPGA applied to the control of DC–AC converters using repetitive and feedforward control laws. *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, Juiz de Fora, Brazil (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/COBEP.2017.8257291>.

7. Heldwein, M. L., & Kolar, J. W. (2009). Impact of EMC filters on the power density of modern three-phase PWM converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(6), 1577-1588. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2014238>.
8. Димерець, А. В. (2019). *Програмна система для дослідження електричних та енергетичних показників імпульсних перетворювачів* (Кваліфікаційна робота, Чернігівський національний технологічний університет, Чернігів, Україна). <https://inel.stu.cn.ua/konkurs/2019/Aktivator.pdf>.
9. Денисов, Ю. О., Городний, О. М., & Купко, О. А. (2012). Особливості роботи та статичні характеристики паралельних квазірезонансних перетворювачів із комутацією за нульового струму. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, 1(55), 239-245. <https://ir.stu.cn.ua/bitstream/handle/123456789/7119/663.pdf>.
10. Городний, О. М. (2018). Особливості керування електронними ключами у квазірезонансних імпульсних перетворювачах. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, (51), 94-98. http://nbuv.gov.ua/UJRN/PIED_2018_51_17.
11. Wu, L., Liu, J., Vazquez, S., & Mazumder, S. K. (2022). Sliding mode control in power converters and drives: A review. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 9(3), 392-406. <https://doi.org/10.1109/JAS.2021.1004380>.
12. Ramirez-Gonzalez, M., & Malik, O. P. (2009). Simplified fuzzy logic controller and its application as a power system stabilizer. In *2009 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISAP.2009.5352817>.
13. Alfred, D., Czarkowski, D., & Teng, J. (2024). Reinforcement learning-based control of a power electronic converter. *Mathematics*, 12(5), 671. <https://doi.org/10.3390/math12050671>.
14. Khajesalehi, J., & Afjei, E. (2022). Model predictive control of NPC inverter coupled to voltage doubled high step-up DC/DC converter in PV-active power filter application. In *2022 13th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)* (pp. 01-03). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PEDSTC53976.2022.9767461>.
15. Mazaheri, N., Santamargarita, D., Bueno, E., Pizarro, D., & Cobrecas, S. (2024). A deep reinforcement learning approach to DC-DC power electronic converter control with practical considerations. *Energies*, 17(14), 3578. <https://doi.org/10.3390/en17143578>.
16. Sabarad, J., & Kulkarni, G. H. (2015). Comparative analysis of SVPWM and SPWM techniques for multilevel inverter. In *2015 International Conference on Power and Advanced Control Engineering (ICPACE)* (pp. 151-156). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICPACE.2015.7274949>.
17. Qashqai, P., Babaie, M., Zgheib, R., & Al-Haddad, K. (2023). A model-free switching and control method for three-level neutral point clamped converter using deep reinforcement learning. *IEEE Access*, 11, 105394-105409. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3318264>.
18. Zeng, Y., Jiang, S., Konstantinou, G., Pou, J., Zou, G., & Zhang, X. (2025). Multi-objective controller design for grid-following converters with easy transfer reinforcement learning. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 40(5), 6566-6577. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2025.3525500>.
19. Tasnim, M. N., Ahmed, T., Ahmad, S., & Mekhilef, S. (2023). Hardware in the loop implementation of the control strategies for the AC-microgrid in OPAL-RT simulator. In *2023 IEEE IAS Global Conference on Renewable Energy and Hydrogen Technologies (GlobConHT)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/GlobConHT56829.2023.10087462>.
20. Lv, F., Dai, C., & Zhang, S. (2020). Design and application of software phase-locked loop based on DSP under voltage asymmetry. In *2020 7th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICISCE50968.2020.00106>.
21. Kumari, N., Abul Kalam, M., & Modi, V. (2022). Analysis of ANN control with buck converter for output voltage control of wind turbine for battery charging. In *2022 IEEE 2nd International Symposium on Sustainable Energy, Signal Processing and Cyber Security (iSSSC)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/iSSSC56467.2022.10051353>.

Отримано 02.09.2025

Василь Анатолійович Тарасюк¹, Олексій Миколайович Городній²

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

E-mail: vasyltarasiuk.ua@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-5310-9202>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри електроніки, автоматики, робототехніки і мехатроніки
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

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

**АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
У КВАЗІРЕЗОНАНСНИХ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ
ЗА УМОВ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

Актуальність дослідження зумовлена сучасними стандартами енергоефективності, які висувають жорсткі вимоги до імпульсних перетворювачів напруги, а саме: високого коефіцієнта корисної дії (ККД) у всьому діапазоні навантажень. Класичні перетворювачі з широтно-імпульсною модуляцією не задовольняють цим вимогам через підвищені комутаційні втрати. Перспективною альтернативою є квазірезонансні імпульсні перетворювачі (КРІП), що мінімізують втрати завдяки комутації при нульовому струмі або напрузі. Однак їхня ефективність може знижуватися через недоліки існуючих методів керування, зокрема частотно-імпульсної модуляції, яка при зміні навантаження призводить до швидкої зміни робочої частоти та збільшує комутаційні втрати. Постановка проблеми полягає в тому, що класичні підходи до керування КРІП, включно з ПІД-регуляторами, оптимізовані для вузької робочої області. Це може спричинити втрату режиму м'якої комутації та зменшення ККД. Перспективним є створення комплексних рішень, що одночасно оптимізують енергоефективність, якісні динамічні показники та відповідність стандартам електромагнітної сумісності (ЕМС). Метою дослідження є розробка гібридного адаптивного методу керування, здатного збільшити ККД при динамічній зміні навантаження та забезпечити стабільно високу енерго-ефективність. Контролер має в реальному часі обчислювати оптимальні моменти комутації, стабілізувати вихідну напругу та мінімізувати втрати. У статті проаналізовано переваги м'якої комутації над жорсткою, розглянуто механізми перемикання при нульовому струмі та напрузі. Систематизовано існуючі методи керування: від лінійних ПІД до нелінійних, таких як керування у ковзному режимі (SMC) та на основі нечіткої логіки (FLC). Особливу увагу приділено перспективним підходам на основі глибокого навчання з підкріпленням (DRL). Висновки підтверджують потребу в створенні гібридних систем керування на основі штучного інтелекту.

Ключові слова: квазірезонансний перетворювач; комутація при нульовому струмі; комутація при нульовій напрузі; штучний інтелект; широтно-імпульсна модуляція; нечітка логіка; енергоефективність; імпульсний перетворювач напруги.

Рис.: 4. Табл.: 4. Бібл.: 21.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-432-441](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-432-441)

UDC 621.311.4

**Mykhailo Shevchenko-Hryshko¹, Vladyslav Parkhomets²,
Anatoliy Revko³, Oleksiy Gorodniy⁴**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ResearcherID: H-1425-2016. Scopus Author ID: 55327980200

RESEARCH ON METHODS OF MODIFICATION OF WINDING MACHINE FOR TOROID TRANSFORMERS

In the paper, the design of a winding machine for toroidal cores, developed to reduce the cost and improve the ergonomics of the machine in the process of its operation is considered. The main shortcomings of analogues are analyzed. Modifications are proposed, including the use of modern production methods to reduce the cost of the winding machine while maintaining quality performance, automation of the winding process and the introduction of a sensor system to control the quality parameters of transformer winding. Special attention is paid to the prospects for the application of machine learning algorithms to improve the quality of winding. The proposed solutions contribute to the creation of an effective and inexpensive winding machine, compared to analogues, for laboratory, educational and small-scale use.

Keywords: winding machine; toroidal cores; transformer; automation; machine learning; microcontroller; digital interface; Raspberry Pi; electric drive.

Fig.: 4. References: 13.

Relevance of the research topic. In modern electrical industry and scientific research, toroidal transformers play a key role, have high efficiency, compactness and reduced level of electromagnetic interference, due to the evenly distributed magnetic flux in the form of a circle in the middle of the core [1]. Toroidal coils with several windings such as transformers and chokes on a common core are also widely used. However, the process of their manufacture remains complex and resource-intensive, especially for small-scale production, for the needs of educational, scientific and laboratory research.

The proposed research is aimed at developing an affordable toroid winding machine (TWM), which has a low cost, a fairly simple design and the ability to be individually configured, which will make the technology more accessible to scientific, technological and educational institutions.

Thus, the study of the modification of TWM is of considerable relevance, as it contributes to reducing the cost of equipment, accelerating the development process, automating production and increasing the versatility of the device. This opens up new opportunities for scientific and educational activities, ensuring more efficient use of resources and expanding technological capabilities in the field of manufacturing electronic components.

Problem Statement. Industrial winding machines for toroidal transformers are designed mainly for mass production, which largely determines their design solutions, functionality and cost. Types of these devices are JG-6204[3] and NTK-1[4], which, although they provide high performance, have a number of significant limitations. The vast majority of such machines have a high cost (from 3,000 US dollars), which increases the cost of production, especially in laboratories and

small enterprises. The high cost is explained by the industrial high-cost production of components of winding machines and specialized control systems that are adapted to mass production.

In addition, these devices have a significant weight, which complicates their transportation and installation. For example, the mass of the NTK-1 is 460 kg, which limits its mobility and makes it impractical for use in research laboratories or small production workshops. The high weight is due to massive metal structures, which, although they provide strength, at the same time increase the costs of production and operation.

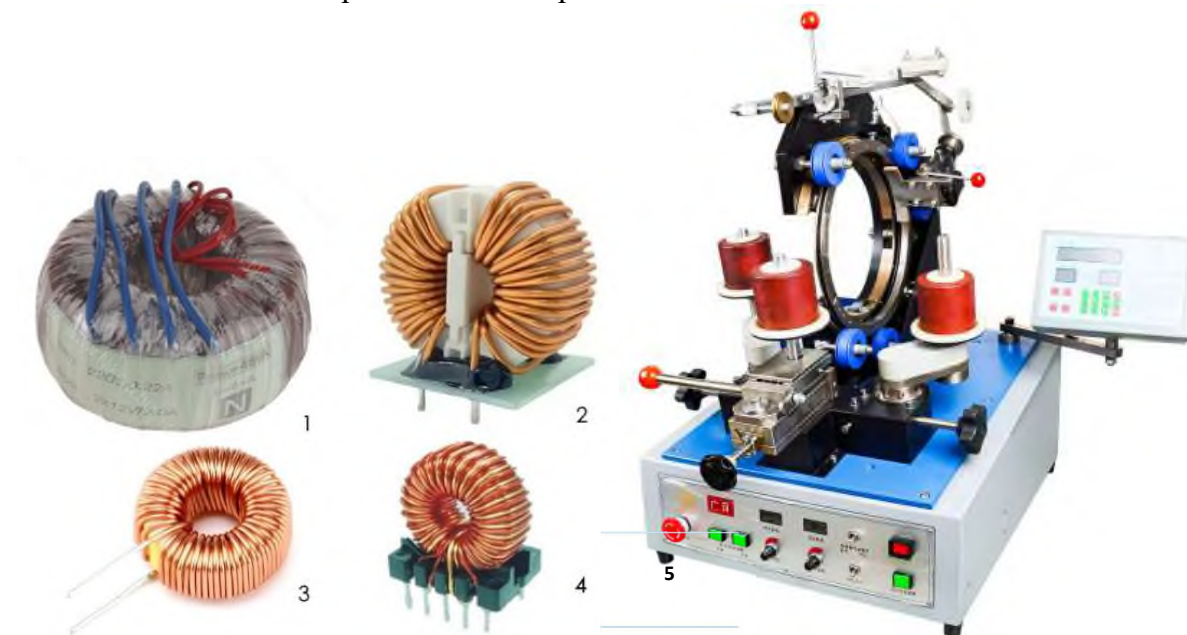


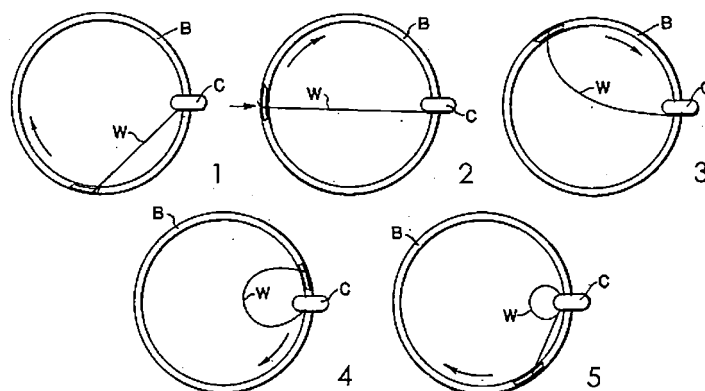
Fig. 1. Electrical products on a toroidal core:

1 – Step-down network transformer [2], 2 – Common-mode coil [2], 3 – Inductance coil [2], 4 – Four-winding choke [2]; 5 – TWM manufactured by Guangri [3]

Another significant drawback is low ergonomics and the complexity of user interaction. For example, in the JG-6204, program control is implemented through a button interface that wears out during use. The NTK-1 lacks even basic means of automation of settings, which significantly increases the requirements for operator qualifications.

Thus, the high cost, significant weight, complexity in use and insufficient automation of existing solutions create serious obstacles to small-scale production of toroidal transformers. These problems necessitate the development of a more accessible and versatile winding device that would allow for efficient wire winding on toroidal cores without significant financial and technical costs.

Analysis of recent research and publications. The development of toroidal transformer winding technologies is reflected in a number of patents that offer various approaches to automating and improving this process. Let us consider patents US4424939 [5], CN110600260 [6], US2850247A [7], US3506207A [8], US3400894A [9] and EP0190929 [10] from the point of view of their suitability for use in small-scale production, educational processes and laboratory research.



*Fig. 2. Illustration from patent US2850247A [6]
stages of wire drawing on a ring-type machine
c – core, w – wire, b – bobbin*

The analysis of the mentioned patents revealed both original technical solutions and most of the above-mentioned shortcomings of commercial machines, such as: complexity of design and control, high cost of manufacturing and operation, and limited flexibility and adaptability.

Additionally, the analysis of the patents revealed the following aspects that indicate their obsolescence and inconsistency with modern technological requirements:

1. Lack of flexible digital control. In many cases, the winding process is controlled using analog, mechanical, or simple digital systems with a push-button interface [3], which limits accuracy, ease of use, and repeatability of operations.

2. Use of outdated materials and technologies. Some patents describe the use of massive metal structures and traditional processing methods, which increases the weight and cost of the equipment. Modern technologies, such as 3D printing and laser cutting, allow for the creation of lighter and cheaper components with sufficient strength in small-scale production.

3. Lack of integration with modern manufacturing processes. Many of the described solutions do not take into account the possibility of integration with computer-aided design and manufacturing (CAD/CAM) systems, which is a standard in modern engineering practice.

In accordance with the above limitations, the project [11] deserves attention. This project is aimed at developing an inexpensive and easy-to-use winding machine for toroidal coils and transformers, based on the use of available materials, 3D printing technologies and laser cutting. This approach allows you to significantly reduce the cost of manufacturing equipment, while maintaining the necessary functionality and accuracy.

Thus, the analysis of existing patents and modern developments indicates the need to create affordable, flexible and technologically modern solutions for winding toroidal transformers that would meet the requirements of small-scale production, educational and scientific research.

Purpose of the article. The purpose of this article is to find ways to modify the existing TWM, created as part of the project [11], taking into account its further development. The main emphasis is on improving the versatility, increasing the reliability and accuracy of operation, as well as expanding the functionality of the device without significantly increasing its dimensions and weight.

One of the important tasks is to ensure greater versatility of the device, which will allow it to be adapted to different types and sizes of toroidal cores without the need for significant design modifications. Special attention is also paid to increasing the winding accuracy, which is critically important for the quality of transformer parameters, especially in cases where the uniform distribution of turns determines the electromagnetic parameters of the product.

Maintaining the compactness and low weight of the device is another priority area of research, as this will ensure its availability for educational institutions, laboratories and small-scale production. A lightweight and compact design will facilitate transportation and installation.

In addition, an important aspect is the expansion of the device's functionality, which will allow automating some winding processes, reducing the impact of the human factor and increasing the repeatability of results. The proposed improvements are aimed at creating an effective, personalized solution for small workshops and research laboratories, which will significantly simplify the manufacturing toroidal transformers while maintaining its economic feasibility.

Main part. The winding machine considered in the thesis was created to provide an affordable and effective method of winding wire onto toroidal cores. The design solutions used in its development are partly based on the principles set forth in patents [7, 10], which describe the mechanisms for tensioning and uniform distribution of wire. The frame of the machine was made of affordable materials, which significantly reduced the cost of production. The main advantage of such a design will be its compactness and lightness. Fig. 3, *a* shows a diagram with the minimum required number of mechanical elements.

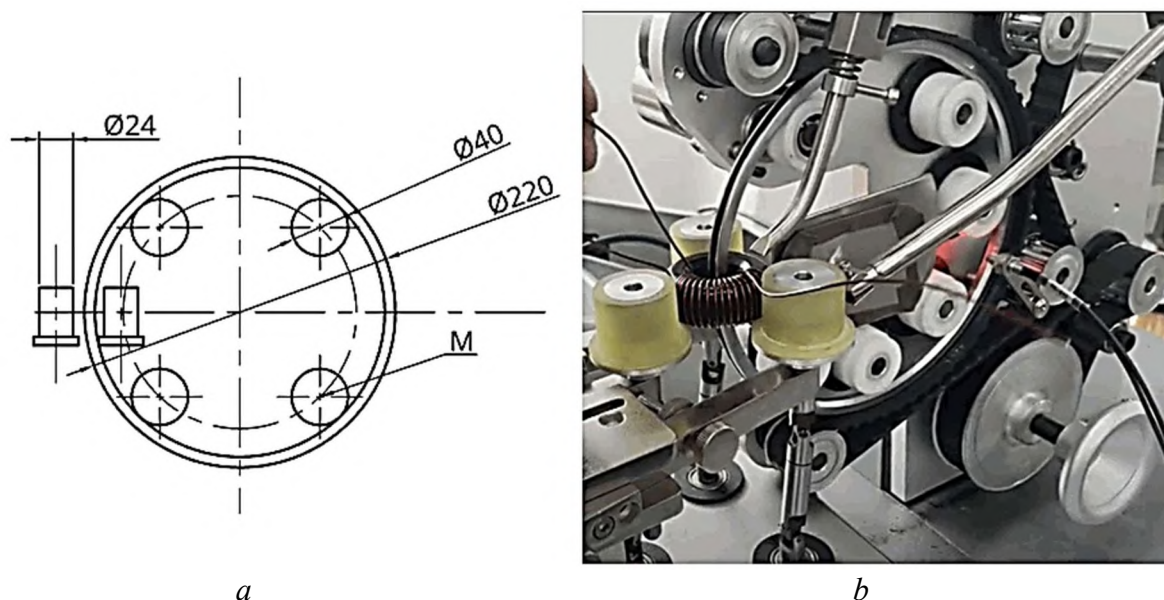


Fig. 3. TWM mechanism:

a – Simplified scheme, M – driving roller (motor); b – Vacuz industrial TWM [12]

Source: created by the authors.

However, a number of significant shortcomings were identified during the implementation process. The main problems were the use of secondary materials and insufficient precision in the manufacture of individual parts, which reduced the repeatability and accuracy of the winding process. In addition, due to limited project funding, it was difficult to ensure sufficient structural rigidity and high quality of mechanical components. This, in turn, led to uneven wire tension and increased wear of moving parts.

To improve this design, it is first necessary to preserve the general concept of the device, since its advantages, in particular compactness and economy, remain key. At the same time, the quality of execution can be significantly improved by using modern production methods, such as 3D printing, which will ensure high precision of parts and simplify their replacement. The use of more reliable materials, in particular composites and high-strength polymers, will also contribute to increasing the durability of the device.

The user interface, which in the initial version was limited only to the ability to manually adjust the speed and set the number of turns, also needs a significant update. The introduction

of a digital interface will allow the display of additional parameters, including wire tension, rotation speed and diagnostic messages. This will significantly increase the usability of the device and reduce the requirements for operator qualifications. In addition, the interface will display the estimated parameters of the transformer itself, such as: pulse power, overall power, impedance and power dissipation of the windings, transformer efficiency. Auxiliary parameters will also be calculated, such as: minimum conductor diameter, length of the conductor used – to warn the user about possible problems, or provide recommendations. To do this, the user will need to enter the following transformer parameters: K – number of windings; U_i – winding voltage, V , where $i=1, 2..K$; I_i – pulse current of windings, A , where $i=1, 2..K$; F – pulse repetition frequency, $\kappa\Gamma\text{ц}$; t_u – pulse duration, μs ; t_{per} – permissible heating temperature of windings, $^{\circ}\text{C}$; j – desired current density in the conductor, A/mm^2 ; D_{iC} – diameter of the metal conductor of the winding, mm , where $i=1, 2..K$; $D_{iC\text{ in}}$ – Diameter of the conductor with insulation, mm , where $i=1, 2..K$; α_R – temperature coefficient of the metal to the conductor, $1/^{\circ}\text{C}$; NN_i – number of parallel conductors in the winding, where $i=1, 2..K$; D_{OUT} – outer diameter of the toroid, mm ; D_{INN} – inner diameter of the toroid, mm ; H – height of the toroid, mm ; w_i – number of turns in the winding, where $i=1, 2..K$;

Using the formulas from [13], we define the expressions for determining the pulse (1) and overall (effective) (2) powers of the transformer:

$$P_u = \sum_{i=2}^k U_i I_i; \quad (1)$$

$$P_{dim} = \frac{\sum_{i=1}^K U_{ief} I_{ief}}{2}. \quad (2)$$

Taking the formulas from [13] for the transformer transformation ratio (3), for effective winding voltage (4), for effective winding current (5), for the effective current of the primary winding (6).

$$K_{i1} = \frac{U_i}{U_1}. \quad (3)$$

$$U_{ie\phi} = U_i \frac{1}{\sqrt{Q}}. \quad (4)$$

$$I_{ief} = I_i \frac{1}{\sqrt{Q}}. \quad (5)$$

$$I_{1ef} = \sum_{i=2}^k I_{ie} K_{i1}. \quad (6)$$

Substituting (3), (4), (5) into (2) we get (7).

$$P_{dim} = \frac{\frac{U_1}{\sqrt{Q}} \sum_{i=2}^K \left(\frac{I_i U_i}{\sqrt{Q} U_1} \right) + \sum_{i=2}^K \frac{U_i I_i}{\sqrt{Q} \sqrt{Q}}}{2}. \quad (7)$$

Simplifying expression (7), we get (8).

$$P_{dim} = \frac{1}{Q} \sum_{i=2}^K (U_i \cdot I_i). \quad (8)$$

Knowing that the pulse duty cycle Q is (9).

$$Q = \frac{10^3}{F t_u}. \quad (9)$$

A simplified expression for the overall power (8), provides ease of implementation in software and quick obtaining of an estimated value for the user.

To determine the minimum required conductor diameter to ensure permissible operating characteristics of the winding, we use the corresponding formula from [13] (10).

$$D_{iM} = 1.13 \sqrt{\frac{I_{ief}}{j NN_i}}. \quad (10)$$

To estimate the length of the conductor used, we first find the perimeter of the cross-section of the toroid (11).

$$l_{TOR} = D_{OUT} - D_{INN} + 2H. \quad (11)$$

where l_{TOR} – the perimeter of the cross-section of the toroid, mm.

Since the wire will be superimposed on the surface of the toroid, we will determine the average length of the wire used in one turn (12) by modifying the equation for the perimeter of the toroid (11) taking into account the outer diameter of the wire.

$$l_{cp.B} = D_{BH} - D + 2H + 4D_{iCin}. \quad (12)$$

where $l_{av.w}$ – the average length of the wire used in one turn, mm.

Accordingly, the average length of the wire used in the winding will be equal to (13).

$$l_{iH} = \frac{1_{cp.B} w_i}{1000}. \quad (13)$$

where l_{iH} – the average length of the wire used in the winding, m.

To find the winding resistance, we use the corresponding formula from [13] (14).

$$R_i = \rho \frac{4 \cdot l_{iH} \cdot 10^8}{NN_i \cdot \pi \cdot D_{iM}^2}. \quad (14)$$

Since during the operation of the pulse transformer, the voltage and current in the windings change with the frequency F , the skin effect phenomenon occurs in the conductors in the windings. It occurs due to parasitic self-induction inside the conductor, which makes the current density in the conductor uneven. As a result, the current begins to flow closer to the surface, the higher the frequency F . As a result, the cross-section of the conductor through which the current passes decreases, the resistance of the conductor increases, and therefore the heating costs also increase.

To find the depth of the skin effect, we use the formula [14], and calculate the depth of the skin effect (15).

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu_0 \mu}}. \quad (15)$$

where δ – the depth of the skin effect, mm.

Knowing the depth of the skin effect, we calculate the effective cross-sectional area of the conductor, marked in green in fig. 4, a , and find the conductor diameter $D_{iMe\phi}$ (fig. 4-2), which corresponds to this cross-sectional area.

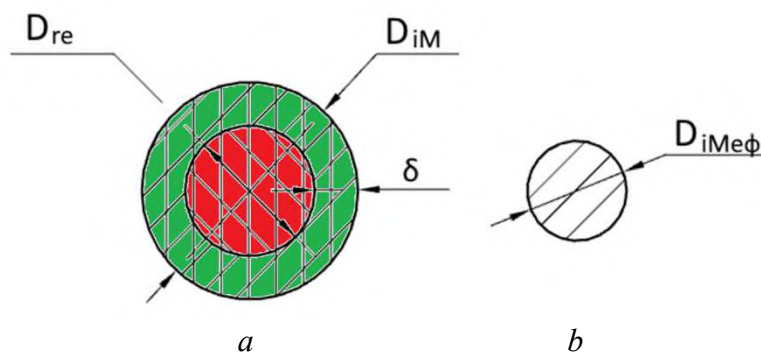


Fig. 4. The influence of the skin effect:

a – the appearance of the influence of the skin effect on the conductor;

b – the effective cross-section of the conductor taking into account the skin effect

Source: created by the authors.

First, we find the diameter of the zone that does not participate in current transfer, marked in red in Fig. 4, a (16).

$$D_{re} = D_{iM} - 2\delta. \quad (16)$$

Knowing the diameter of the inner zone, we find the area of the outer zone through which the current flows (17).

$$S_{ef} = \frac{\pi D_{iM}^2}{4} - \frac{\pi D_{re}^2}{4}. \quad (17)$$

This area can be represented by an equivalent conductor with a diameter D_{iMef} ,

$$\frac{\pi D_{iMef}^2}{4} = S_{ef}. \quad (18)$$

Substituting equation (16) into equation (17) and simplifying, we obtain (19).

$$D_{iMef}^2 = D_{iM}^2 - D_{re}^2. \quad (19)$$

Substituting the formula for D_{re} (16) into equation (18), we obtain (20).

$$D_{iMef}^2 = D_{iM}^2 - (D_{iM} - 2\delta)^2. \quad (20)$$

Opening the brackets and simplifying (20), we get (21).

$$D_{iMef}^2 = 4\delta(D_{iM} - \delta). \quad (21)$$

Knowing the new equivalent diameter of the conductor, we find the new resistance of the windings (22).

$$R_{ALLi} = \rho \frac{4 \cdot l_{iH} \cdot 10^8}{\pi \cdot D_{iMef} \cdot 4\delta(D_{iM} - \delta)}. \quad (22)$$

The resistance formula (22) takes into account the influence of the skin effect on the transformer windings, which makes it possible to more accurately estimate the heating losses of the windings.

Knowing the total resistance, we find the power dissipation of the winding (23).

$$P_{iM} = I_{ief}^2 R_{ALLi}. \quad (23)$$

Since the windings will heat up during operation, we will find the total power dissipation at the permissible winding temperature (about 100 °C ... 120 °C)[12] (24).

$$P_M = \left(1 + \alpha_R(t_{доп}^o - t_o^o)\right) \sum_{i=1}^K P_{iM}. \quad (24)$$

Knowing the total power dissipation, we find the efficiency of the transformer (25).

$$\eta_{TP} = \frac{\sum_{i=2}^K U_{ie\phi} I_{ie\phi}}{\sum_{i=2}^K U_{ie\phi} I_{ie\phi} + P_M}. \quad (25)$$

Using the calculated values, it is possible to create a number of recommendations and warnings regarding the selected transformer parameters entered by the user. It is possible to initially configure the device before starting the wire winding process, and to provide the user with future parameters of the output transformer.

In addition to mechanical improvements, an important stage of modernization is the introduction of intelligent quality control algorithms. To implement the previously considered improvements, the use of an STM32 microcontroller will be sufficient, since it provides the necessary computing power, supports various interfaces for connecting sensors and has low power consumption. However, the key problem of all existing solutions is the lack of real quality control of winding, since most mechanisms only maintain wire tension without analyzing whether it is evenly distributed.

To solve this problem, the use of artificial intelligence is promising. The use of machine learning algorithms will allow automatically assessing the uniformity of winding, detecting defects and adjusting process parameters in real time. However, the main difficulty is the process of training and testing such algorithms, since it is necessary to collect a significant amount of data on high-quality and defective windings.

One way to solve this problem is to use the machine itself for data collection and testing algorithms. This will not only improve the quality of winding, but also create a platform for further research in the field of automation and quality control of transformer windings. Given the need to process a significant amount of information, it is advisable to use a more powerful controller or one board computer, such as RaspberryPi 5, to implement intelligent algorithms, which will provide sufficient performance for working with neural networks and analytical algorithms.

Thus, the improvement of the considered winding machine is possible through the use of modern production methods, the introduction of digital quality control systems, automation of the winding process and the use of artificial intelligence to evaluate the results of work. This will not only increase the accuracy and reliability of the device, but also make it promising for commercialization, since it will be able to compete with industrial analogues due to its low cost and flexibility in use.

Conclusions. The article considered the design of a winding machine, which is characterized by compactness and availability in production. Despite the advantages, a number of shortcomings were identified that limit the effectiveness of its application. A number of improvements were proposed, including modernization of the design, the use of higher-quality materials, the introduction of a sensor system for controlling wire tension, and automation of the winding process.

A promising direction for further research is the integration of artificial intelligence for analyzing the uniformity of winding and adaptive adjustment of process parameters. This will not only improve product quality, but also minimize the influence of the human factor. The use of modern microcontrollers and digital technologies will ensure increased efficiency and expand the functionality of the device.

Thus, the improved machine has the potential for use in scientific and educational institutions, small-scale production, and laboratory conditions, ensuring high quality winding at an affordable cost.

References

1. Yoganand Velayutham. *Introduction to Toroidal Transformers*. <https://talema.com/introduction-to-toroidal-transformers/>.
2. Oofitsiinyi veb-sait NIKOM – radiomarket [Official website “NIKOM – radiomarket”]. <https://www.nikom.biz/>.
3. JG-6204 toroidal transformer winding machine. *Aliexpress*. <https://www.aliexpress.com/item/1005006596205764.html?gatewayAdapt=nl2glo>.
4. Verstat namotuvannia toroidalnykh kotushok NTK-1. StandartPrybor – ofitsiinyi veb-sait. [Toroidal coil winding machine NTK-1. Official website StandartPribor] <https://standart-pribor.com.ua/product/stanok-namotki-toroidalnyh-katushek-ntk-1/>.
5. OHASHI TOSHIJIRO [JP]; YAMAGUCHI YASUHIRO [JP]; KOHNO MICHINAGA [JP]; KAMITA NOBU [JP]. *Apparatus for winding wire around toroidal core*. USA Patent. US4424939A. 1984-01-10. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/012909961/publication/US4424939A?q=pn%3DUS4424939>.
6. LI JINGUANG; LI YANGKAN. *Automatic edge sliding type annular winding machine*. China Patent. GCN110600260A. 2019-12-20. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/068850201/publication/CN110600260A?q=pn%3DCN110600260>.
7. Alton K Frederick. *Toroidal coil winder*. USA Patent. US2850247A. 1958-09-02. <https://patents.google.com/patent/US2850247A/en?q=US2850247A>.
8. Doyle E Stoppel. *Toroidal coil winder*. USA Patent. US3506207A. 1970-04-14. <https://patents.google.com/patent/US3506207A/en?q=US3506207A>.
9. Ralph A McIntosh Joseph D Hornak Leon J Yarrish. *Toroidal coil winding machine*. USA Patent. US3400894A. 1968-09-10. <https://patents.google.com/patent/US3400894A/en?q=US3400894A>.
10. SCHLAKE, RANDALL L. HAMKINS, CLARK J. RICHESON, JAMES D. *Apparatus and Method for Fabricating a Low Voltage Winding for a Toroidal Transformer*. European Patent. EP0190929. 05.02.1986. https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=EP11650821&_cid=P12-M8UH3A-33892-1.

11. Shevchenko-Hryshko, M. A. Namotuválny stanok dlia toroidalnykh kotushok ta transformatoriv: vypuskna kvalifikatsiina robota: 171 “Elektronika”, “Elektronika robotyzovanykh system ta kompleksiv”/ M. A. Shevchenko-Hryshko; kerivnyk roboty A. S. Revko; NU “Chernihivska politehnika”, Kafedra elektroniky, avtomatyky, robototekhniky ta mekhatroniky. [Shevchenko-Gryshko, M. A. Winding machine for toroidal coils and transformers: final qualification work: 171 “Electronics”, “Electronics of robotic systems and complexes”/ M. A. Shevchenko-Gryshko; supervisor A. S. Revko; NU “Chernihiv Polytechnic”, Department of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics]. – Chernihiv, 2024. – 94 p. Institutional Repository of Chernihiv Polytechnic National University <https://ir.stu.cn.ua/handle/123456789/30390>.

12. Change Magazine Wheel VA100-MINI VA-200V Belt Type Automatic Toroidal Inductor Core Winding Machine URL: <https://youtu.be/IFnrjzNAs0U?si=y0M7TuB14Rj2uDKN>.

13. Metodychni rekomendatsii z rozrakhunku impulsnykh transformatoriv / Ukl. V. M. Riadskyi, M. Ya. Velychko [Methodological recommendations for the calculation of pulse transformers / Compiled by V. M. Ryadsky, M. Ya. Velichko]. – Chernihiv: ChTI, 1993 – 60 p.

14. Shvets Ye.Ia., Chervonyi I.F., Holovko Yu.V. (2011) *Materialy i komponenty elektroniky: navchalnyi posibnyk* [Materials and components of electronics: a textbook] / Zaporizhzhia, Ukraine: Zaporizhzhia State Engineering Academy.

Список використаних джерел

1. 1. *Introduction to toroidal transformers*. (n.d.). The Talema Group. <https://talema.com/introduction-to-toroidal-transformers/>.

2. NIKOM – radiomarket. (n.d.). *Official website*. Retrieved from <https://www.nikom.biz/>.

3. JG-6204 toroidal transformer winding machine. Aliexpres. <https://www.aliexpress.com/item/1005006596205764.html?gatewayAdapt=nld2glo>.

4. *HTK-I станок намотки тороидальных катушек. низкие цены. на складе в наличии.* (б. д.). ООО СтандартПрибор — стандарт качества на украинском рынке измерительной техники. <https://standart-pribor.com.ua/product/stanok-namotki-toroidalnyh-katushek-ntk-1/>.

5. Ohashi, T., Yamaguchi, Y., Kohno, M., & Kamita, N. (1984). *Apparatus for winding wire around toroidal core* (U.S. Patent No. US4424939A). U.S. Patent and Trademark Office. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/012909961/publication/US4424939A?q=pn%3DUS4424939>.

6. Li, J., & Li, Y. (2019). *Automatic edge sliding type annular winding machine* (China Patent No. CN110600260A). China National Intellectual Property Administration. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/068850201/publication/CN110600260A?q=pn%3DCN110600260>.

7. Frederick, A. K. (1958). *Toroidal coil winder* (U.S. Patent No. US2850247A). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US2850247A/en?q=US2850247A>.

8. Stoppel, D. E. (1970). *Toroidal coil winder* (U.S. Patent No. US3506207A). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US3506207A/en?q=US3506207A>.

9. McIntosh, R. A., Hornak, J. D., & Yarrish, L. J. (1968). *Toroidal coil winding machine* (U.S. Patent No. US3400894A). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US3400894A/en?q=US3400894A>.

10. Schlake, R. L., Hamkins, C. J., & Richerson, J. D. (1986). *Apparatus and method for fabricating a low voltage winding for a toroidal transformer* (European Patent No. EP0190929). European Patent Office. https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=EP11650821&_cid=P12-M8UH3A-33892-1.

11. Шевченко-Гришко, М. А. (2024). *Намотувальний станок для тороїдальних котушок та трансформаторів: випускна кваліфікаційна робота* (Бакалаврська робота, Національний університет «Чернігівська політехніка», Чернігів, Україна). Institutional Repository of Chernihiv Polytechnic National University. <https://ir.stu.cn.ua/handle/123456789/30390>.

12. Change Magazine Wheel. (n.d.). *VA100-MINI VA-200V belt type automatic toroidal inductor core winding machine* [Video]. YouTube. <https://youtu.be/IFnrjzNAs0U?si=y0M7TuB14Rj2uDKN>.

13. Рядський, В. М., & Величко, М. Я. (1993). *Методичні рекомендації з розрахунку імпульсних трансформаторів*. Чернігів: ЧТІ.

14. Швець, Є. Я., Червоний, І. Ф., & Головка, Ю. В. (2011). *Матеріали і компоненти електроніки: навчальний посібник*. Запоріжжя: ЗДІА.

Отримано 04.09.2025

УДК 621.311.4

**Михайло Анатолійович Шевченко-Гришко¹, Владислав Русланович Пархомець²,
Анатолій Сергійович Ревко³, Олексій Миколайович Городній⁴**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ResearcherID: H-1425-2016. Scopus Author ID: 55327980200

ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ МОДИФІКАЦІЇ НАМОТУВАЛЬНОГО ВЕРСТАТУ ДЛЯ ТОРОЇДНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

У роботі розглядається процес проектування та виготовлення намотувального верстата для тороїдальних сердечників, спрямований на зниження виробничих витрат та покращення доступності у дрібносерійному виробництві. Аналіз існуючих рішень, у тому числі і закордонних патентів, визначив ключові недоліки, до яких входять і недостатня жорсткість конструкції та нерівномірний натяг дроту під час намотування. Для вирішення цих проблем запропоновані вдосконалення, які передбачають використання передових виробничих технологій, таких як 3D-друк та лазерне різання, впровадження системи моніторингу на основі оптичних датчиків, зокрема і системи машинного зору, та повну автоматизацію процесу намотування.

Значна увага приділяється можливості потенційного застосування алгоритмів машинного навчання для підвищення якості процесу намотування. Інтеграція штучного інтелекту в систему може забезпечити виявлення дефектів у режимі реального часу, дозволить виконувати адаптивне налаштування параметрів та контролювати якість із мінімальним втручанням людини-оператора. Окрім того, в дослідженні акцентується увага на використанні сучасних мікроконтролерів та одноплатних комп'ютерів, включаючи STM32 та Raspberry Pi 5, які застосовуються для обробки та керування даними в режимі реального часу. Наведені математичні вирази, що можуть використовуватися в програмному забезпеченні намотувального верстата для розширення його функціоналу.

Запропоновані вдосконалення сприяють створенню ефективного, економічно доцільного та універсального намотувального верстата, придатного для лабораторних застосувань та дрібносерійного виробництва. Завдяки впровадженню цифрових систем керування та забезпечення якості процесу намотування на основі штучного інтелекту вдосконалена конструкція має потенціал конкурувати з рішеннями промислового класу, зберігаючи при цьому доступність широкому загалу та маючи гнучкість для подальших вдосконалень.

Ключові слова: намотувальний верстат; тороїдні осердя; трансформатор; автоматизація; машинне навчання; мікроконтролер; цифровий інтерфейс; Raspberry Pi; електропривід.

Рис.: 4. Бібл.: 14.

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-442-451](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-442-451)

УДК 711+332.5

Ольга Сергіївна Петраковська¹, Марія Юрїївна Михальова²

¹доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри землеустрою і кадастру
Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)
E-mail: petrakovska.os@knuba.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9437-9730>
Scopus Author ID: 57208029712. ResearcherID: AAC-8135-2019

²доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри землеустрою і кадастру
Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)
E-mail: mykhalova.myu@knuba.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2242-5507>
Scopus Author ID: 57245147600. ResearcherID: U-7863-2017

ТРАНСФОРМАЦІЯ ОСВІТИ В ГАЛУЗІ ГЕОДЕЗІЇ ТА ЗЕМЛЕУСТРОЮ

У статті проаналізовано етапи еволюції підготовки фахівців за спеціальністю «Геодезія та землеустрій» у вищій освіті України протягом 1991-2025 років з урахуванням загальнонаціональних освітніх реформ, технічного прогресу, цифровізації та викликів, спричинених повномасштабною війною. Виокремлено чотири етапи, які характеризуються суттєвими якісними змінами. Розкрито особливості спеціальності, що поєднує інженерні, природничі, правові та економічні компоненти, та є базовою для управління земельними ресурсами, просторового планування, ведення державного земельного кадастру та картографування.

Ключові слова: геодезія; землеустрій; підготовка фахівців; вища освіта; освітня програма.

Рис.: 3. Бібл.: 27.

Актуальність теми дослідження. Упродовж останніх десятиліть система вищої освіти України зазнала низки сутнісних трансформацій, зумовлених як внутрішніми реформами, так і зовнішніми викликами. Ці трансформаційні процеси відбувалися на тлі суттєвих соціально-економічних і техніко-технологічних змін, зокрема глобальними процесами цифровізації та технічного прогресу, євроінтеграції, національними освітніми реформами, суспільно-політичними викликами та наслідками повномасштабної війни. Наведене обумовило перегляд змісту, форм і методів підготовки фахівців. Особливо помітними ці зміни є у галузі геодезії та землеустрою, яка, з одного боку, є традиційною технічною дисципліною, а з іншого – динамічно розвивається у напрямках просторового планування, кадастру, оцінки нерухомості та геоінформаційних систем. Незважаючи на важливе значення цієї спеціальності для управління земельними ресурсами, просторового планування та функціонування державного земельного кадастру, досліджень, які б цілісно аналізували етапи еволюції підготовки кадрів у період від здобуття Україною незалежності до сьогодення, недостатньо. Це створює науково-практичний розрив між сучасними вимогами ринку праці та змістом освітніх програм.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика розвитку освіти у сфері геодезії та землеустрою розглядалась у працях вітчизняних і зарубіжних науковців, де акцентовано увагу на модернізації освітніх програм, впровадженні геоінформаційних технологій та європейських стандартів підготовки фахівців [1-12]. Дослідження останніх років висвітлюють питання цифровізації навчального процесу та інтеграції сучасних технічних засобів у підготовку студентів. Разом з тим, комплексний аналіз трансформацій у системі вищої освіти України за спеціальністю «Геодезія та землеустрій» у контексті освітніх реформ, технічного прогресу та воєнних викликів потребує додаткового аналізу.

Мета дослідження. Метою статті є аналіз етапів еволюції підготовки фахівців за спеціальністю «Геодезія та землеустрій» у вищій освіті України впродовж 1991-2025 років з урахуванням національних освітніх реформ, розвитку цифрових технологій та актуальних

викликів, спричинених воєнними діями. У дослідженні було використано низку загально-наукових та спеціалізованих методів дослідження для проведення глибокого, систематичного аналізу еволюції підготовки фахівців у галузі «Геодезія та землеустрій». У статті застосовано історичний, ретроспективний, порівняльний та систематичний підходи. Історичний та ретроспективний методи були використані для аналізу ключових етапів розвитку освіти в галузі геодезії та землеустрою, зокрема в контексті національних реформ вищої освіти, законодавчих змін та трансформацій освітніх програм. Систематичний підхід забезпечив всебічне розуміння міждисциплінарного характеру спеціальності, що охоплює інженерні, природничі, юридичні та економічні компоненти.

Виклад основного матеріалу. Спеціальність «Геодезія та землеустрій» за часи підготовки фахівців у незалежній Україні зазнала суттєвих змін. Якщо розглянути загальну динаміку розвитку вищої освіти та підготовки фахівців в Україні, то можна виокремити чотири основних етапи:

1. Становлення системи вищої освіти в незалежній Україні (1991-2000).
2. Унормування освітніх стандартів та укрупнення напрямів (2001-2014).
3. Інтеграції до європейського освітнього простору та уніфікації кваліфікаційних рамок (2015-2021).
4. Цифрової адаптації та стійкості в кризових умовах (2022-дотепер).

Розвиток спеціальності «Геодезія та землеустрій» кореспондується з наведеними етапами і є відображенням складних процесів становлення державності, земельної реформи, розвитку ринкових відносин та інтеграції у світовий освітній простір. Протягом цього періоду відбулися значні зміни у назвах напрямків та спеціальностей, що відображають трансформацію освітнього процесу.

На етапі становлення система вищої освіти успадкувала багато рис радянської системи з потужною інженерною та технічною складовою. При підготовці фахівців з геодезії та землеустрою акцент робився на технічних аспектах геодезичних вимірювань, картографічного виробництва, а також на питаннях організації землекористування в умовах перехідного періоду від планової до ринкової економіки. Ключовим рівнем повної вищої освіти був «спеціаліст» з п'ятирічним терміном підготовки. До переліку напрямів та спеціальностей, за якими здійснювалась підготовка фахівців у закладах вищої освіти (ЗВО) за відповідними освітньо-кваліфікаційними рівнями, входив напрям підготовки 0709 «Геодезія, картографія та землепорядкування». Основними спеціальностями, які були належали до цього напрямку й за якими випускались фахівці, були: «Геодезія», «Фотограмметрія», «Землепорядкування і кадастр», «Геоінформаційні системи і технології» [10].

На другому етапі відбулися принципові трансформації у вищій освіті. У 2002 році був започаткований перехід до Болонської дворівневої системи – бакалавр і магістр [11]. Після підписання Болонської декларації у 2005 році, Україна зобов'язалася впроваджувати модульно-рейтингову систему, European Credit Transfer and Accumulation System, компетентнісний підхід. Почали з'являтися навчальні плани нового зразка, що містили компоненти сучасних освітніх програм. При цьому освітньо-кваліфікаційний рівень «спеціаліст» офіційно співіснував із рівнями «бакалавр» і «магістр» до 2016 року, в якому набір на освітній рівень «спеціаліст» було припинено [12]. Отримані дипломи спеціаліста прирівняли до дипломів магістра. З цього часу підготовка фахівців здійснюється лише за ступенями «бакалавр» і «магістр». До 2016 року повною вищою освітою вважався освітньо-кваліфікаційний рівень «спеціаліст» або «магістр». Бакалавр був лише базовим рівнем, а не завершеним циклом освіти. З 2016 року, відповідно до нового законодавства, освітній ступінь бакалавра в Україні визнається повною вищою освітою, що замінює попередній рівень спеціаліста.

У 2003 році був прийнятий Закон України «Про оцінку земель», в якому були визначені правові засади проведення оцінки земель, професійної оціночної діяльності у сфері оцінки земель в Україні. У 2006 році спільним наказом Державного комітету України по земельних ресурсах, Міністерства аграрної політики України, Міністерства будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України, Української академії аграрних наук № 18/15/21/11 був затверджений Порядок нормативної грошової оцінки земель сільськогосподарського призначення та населених пунктів.

Відгуком на законодавчі нововведення стало включення до переліку спеціальностей оцінювання землі та нерухомого майна. У 2010 році до переліку спеціальностей, за якими здійснюється підготовка фахівців у вищих навчальних закладах за освітньо-кваліфікаційними рівнями спеціаліста і магістра, до галузі знань «Геодезія та землеустрій» увійшли наступні спеціальності: «Геодезія», «Картографія», «Землеустрій і кадастр», «Геоінформаційні системи і технології», «Оцінка землі та нерухомого майна», «Фотограмметрія та дистанційне зондування», «Космічний моніторинг Землі» [13].

У 2011 році була розроблена національна рамка кваліфікації відповідно до Європейської рамки кваліфікацій (ЄРК). Це було частиною виконання зобов'язань України в межах Угоди про асоціацію з ЄС [14] і стало важливим кроком на шляху інтеграції української освіти до європейського простору. Було визначено 8 рівнів кваліфікацій, що відповідають рівням ЄРК, що зробило зрозумілою «сходінку» кожної освіти і можливості переходу між рівнями. Впровадження компетентнісного підходу обумовило орієнтування освітніх програм не тільки на знання, а й на компетентності: уміння застосовувати знання на практиці, комунікація, критичне мислення тощо. Це посилило можливості мобільності студентів і викладачів, сприяло міжнародним програмам подвійних дипломів, полегшило визнання українських дипломів за кордоном.

Важливим кроком у зміні підходів до визнання рівня підготовки фахівців стала професійна сертифікація інженерів-геодезистів та інженерів-землевпорядників, яка була запроваджена у 2013 році. Це обумовило корегування навчальних планів відповідно до реальних вимог роботодавців і змісту кваліфікаційних іспитів.

Особливості цього етапу, при підготовці фахівців із геодезії та землеустрою, віддзеркалювали посилення уваги до геоінформаційних систем та технологій, їх інтеграції у кадастрові системи та процес навчання, впровадження супутникових технологій у геодезичні вимірювання та трансформація навчальних планів за рахунок включення дисциплін з оцінки землі та нерухомості, управління земельними ресурсами, моніторингу земель тощо.

У 2014 році на законодавчому рівні запроваджено поняття «освітня програма» та визначені вимоги до стандартів вищої освіти у межах певного рівня вищої освіти та спеціальностей [15]. Стандарти забезпечили єдині вимоги до якості підготовки фахівців по всій Україні, незалежно від закладу вищої освіти, і зробили їх зрозумілими для міжнародних партнерів. При цьому закладам вищої освіти була надана певна автономія.

Довгий час спеціальність «Геодезія та землеустрій» була окремою галуззю знань, у межах якої були врегульовані різні спеціальності, серед яких найбільш сталими були і є: «Геодезія», «Землеустрій і кадастр», «Геоінформаційні системи і технології», «Оцінка землі та нерухомого майна».

Період 2015-2021 років став визначальним етапом у процесі інтеграції української вищої освіти до європейського освітнього простору. Підґрунтям для цих змін стало ухвалення у 2014 році нового Закону України «Про вищу освіту», який відкрив шлях до системних реформ. Одним із головних завдань було уніфікувати кваліфікаційні рамки, що дало змогу підвищити якість освітніх послуг та забезпечити поступову інтеграцію вищої освіти у Європейський простір.

У 2015 році розпочало роботу Національне агентство із забезпечення якості вищої освіти (НАЗЯВО), а також було впроваджено нові механізми акредитації освітніх програм, орієнтовані на компетентнісний підхід, дотримання міжнародних стандартів та принципів академічної доброчесності.

У 2015 році було затверджено детальний перелік галузей знань і спеціальностей із зазначенням рівнів освіти та відповідних кодів деталізованої галузі Міжнародної стандартної класифікації освіти ISCED-F 2013. Згідно з цим документом «Геодезія та землеустрій» як спеціальність була інтегрована до галузі знань «Архітектура та будівництво» [16]. З 2016 року затверджуються стандарти вищої освіти для кожного рівня та спеціальності. Освітні програми відповідали державним стандартам, але формувались на рівні університету. Заклади вищої освіти отримали право самостійно створювати, змінювати, оновлювати освітні програми. Розширення автономії закладів вищої освіти надало їм більше повноважень у розробці структури й визначенні змісту навчальних планів і програм, що сприяло їхній гнучкості та адаптивності. У межах спеціальності «Геодезія та землеустрій» університети отримали можливість розробляти різноманітні освітні програми, що відображало тенденції і потреби ринку праці і сприяло швидкому реагуванню на потреби ринку та регіональні особливості. З 2016 року заклади вищої освіти розробляють власні освітні програми під ліцензованими спеціальностями. Для спеціальності «Геодезія та землеустрій» розроблені стандарти вищої освіти для освітніх рівнів бакалавра (2021) і магістра (2023).

У 2017 та 2021 роках удосконалювалась процедура сертифікації інженерів-геодезистів та інженерів-землевпорядників [17]. Вимоги до фахівців, які допускаються до складання кваліфікаційних іспитів, привели до появи в багатьох університетах об'єднаної освітньої програми, яка дублює назву спеціальності «Геодезія і землеустрій». Це спричинено можливістю випускника такої програми проходити професійну сертифікацію по геодезії і землеустрою без необхідності здобувати два дипломи за різними освітніми програмами.

Прийняття закону «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» (2020) та внесення змін до законодавчих актів щодо планування використання земель (2020) і вдосконалення системи управління та дерегуляції у сфері земельних відносин (2021) спричинило нові вимоги до компетентностей фахівців з геодезії і землеустрою. Зростає значення управлінських та цифрових компетентностей з урахуванням сучасних потреб просторового розвитку територіальних громад, агропромислового комплексу, охорони земель, сталого землекористування, що обумовило подальшу трансформацію змісту спеціальності «Геодезія і землеустрій». На цьому етапі активно розвивається академічна мобільність здобувачів вищої освіти і педагогічного персоналу.

Період із 2022 року по сьогодні характеризується сутнісними трансформаціями у системі вищої освіти України загалом та у галузі геодезії і землеустрою зокрема. Під впливом техніко-технологічних, економічних, соціальних чинників, а також у зв'язку з тривалими воєнними діями, цифровою трансформацією та процесами європейської інтеграції, сформувався новий етап розвитку освітнього простору. Цей етап відзначається зростанням гнучкості освітніх траєкторій, активним впровадженням цифрових технологій і посиленням орієнтації на практико-орієнтовану підготовку фахівців.

Воєнна агресія, масова релокація студентів і науково-педагогічних працівників, втрата матеріально-технічної бази в окремих регіонах України зумовили необхідність оперативної адаптації освітнього процесу до кризових умов. Це спричинило масштабну цифровізацію, перехід до онлайн-форм навчання, інтенсивне впровадження дистанційних технологій та розбудову електронних освітніх середовищ.

У професійній підготовці за освітніми програмами з геодезії та землеустрою вищезгадані виклики спричинили поглиблення змісту навчання у напрямках цифрової картографії, управління просторовими даними, геоінформаційного моделювання, автоматизованого кадастрового обліку та використання супутникових технологій. Окреме значення

набули питання підготовки фахівців до участі у процесах післявоєнної відбудови, просторового планування, відновлення інфраструктури та рекультивації територій, що зазнали руйнувань внаслідок воєнних дій.

Сучасні освітні програми дедалі частіше інтегрують навчальні модулі, що охоплюють оцінку земель і нерухомого майна, урбаністику, екологічний моніторинг та просторове планування. Така міждисциплінарна структура сприяє розширенню професійних можливостей випускників і забезпечує ефективну міжгалузеву інтеграцію знань. Зростаючий попит на ринку праці на фахівців із комплексними компетентностями зумовлює необхідність переорієнтації вищої освіти на мультидисциплінарний підхід, що розширює елементи права, інформаційних технологій, економіки, екології та управління просторовим розвитком. Університети, відповідно, адаптують зміст освітніх програм до вимог сучасного суспільства, сприяючи формуванню конкурентоспроможних і мобільних фахівців.

У 2024 році запроваджені нові зміни до переліку галузей знань і спеціальностей, і «Геодезія і землеустрій», як спеціальність, включено до галузі знань «Інженерія, виробництво та будівництво» [18]. Крім цього, у 2025 році ця спеціальність віднесена до переліку спеціальностей на рівні вищої освіти, що передбачають доступ до професій, для яких запроваджено додаткове регулювання. Міністерство освіти і науки ініціювало оновлення освітніх стандартів для спеціальностей, зокрема «Геодезія та землеустрій». Основна увага при цьому зосереджена на результатах навчання, що відображають як професійні, так і soft-компетентності.

З 2014 року простежується орієнтація державної політики на скорочення кількості закладів вищої освіти. У Стратегії розвитку вищої освіти України на 2021-2031 роки передбачено оптимізацію мережі ЗВО з урахуванням демографічних тенденцій, територіальної доступності та ефективності їхньої діяльності, а також поступове зменшення числа малоефективних закладів. Разом із тим, до цього року кількість закладів, що здійснюють підготовку та випуск фахівців, практично не зменшувалася й утримувалася на рівні 49, а тенденція до скорочення простежується лише з 2025 року (рис. 1).

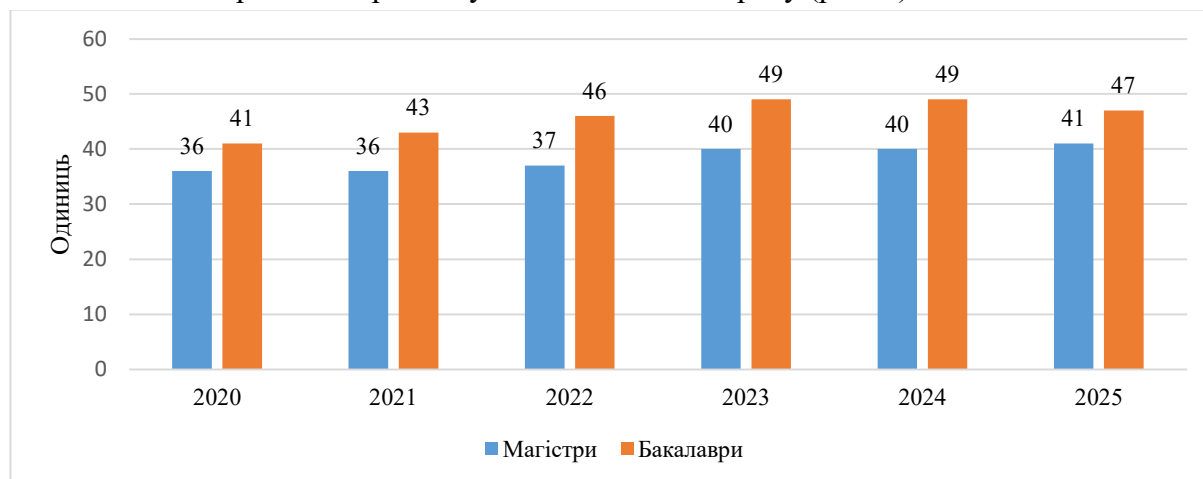


Рис. 1. Заклади вищої освіти, що пропонують освітні програми з геодезії та землеустрою

З огляду на вимоги до спеціальностей, що передбачають доступ до регульованих професій, зокрема у частині чіткого визначення освітніх програм, які можуть реалізовуватися в межах спеціальності «Геодезія та землеустрій», авторами було проведено аналіз освітніх програм [19-27], що функціонують у закладах вищої освіти України протягом 2020-2025 років (рис. 2, 3).

Найпоширенішими програмами є Геодезія та землеустрій, Землеустрій і кадастр, Оцінка землі та нерухомості, Геодезія та Геоінформаційні системи. Починаючи з 2020 року, простежується зростання кількості університетів, які здійснюють підготовку

за програмою Геодезія та землеустрій як на бакалаврському, так і на магістерському рівнях, що зумовлено причинами, окресленими вище. Також спостерігається зростання інтересу до програми Землеустрій і кадастр, особливо на рівні магістратури. Це свідчить про зростаючу потребу у висококваліфікованих фахівцях, здатних працювати з сучасними кадастровими та реєстраційними системами, що є надзвичайно важливим для розвитку ефективного ринку землі. Натомість показники за програмами: Оцінка землі та нерухомості, Геодезія та Геоінформаційні системи залишаються відносно стабільними протягом останніх п'яти років.

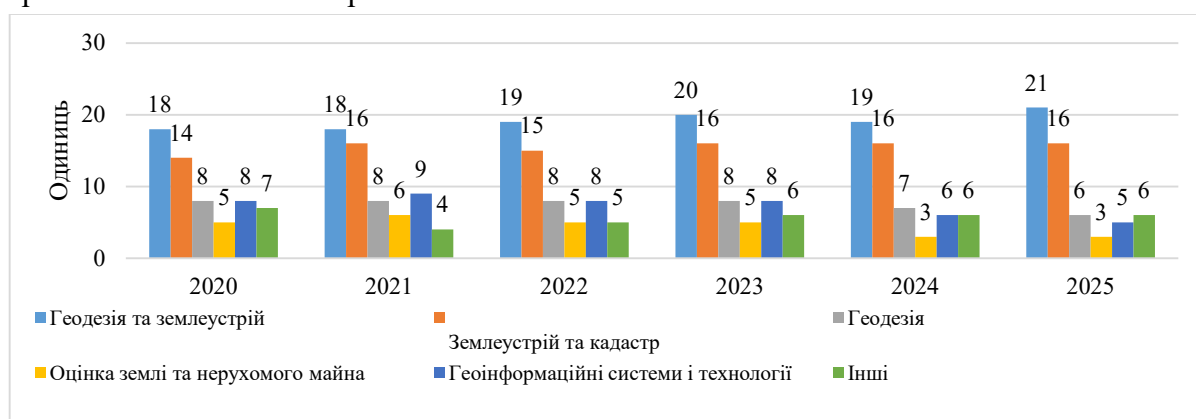


Рис. 2. Освітні програми з геодезії та землеустрою, освітній рівень магістр

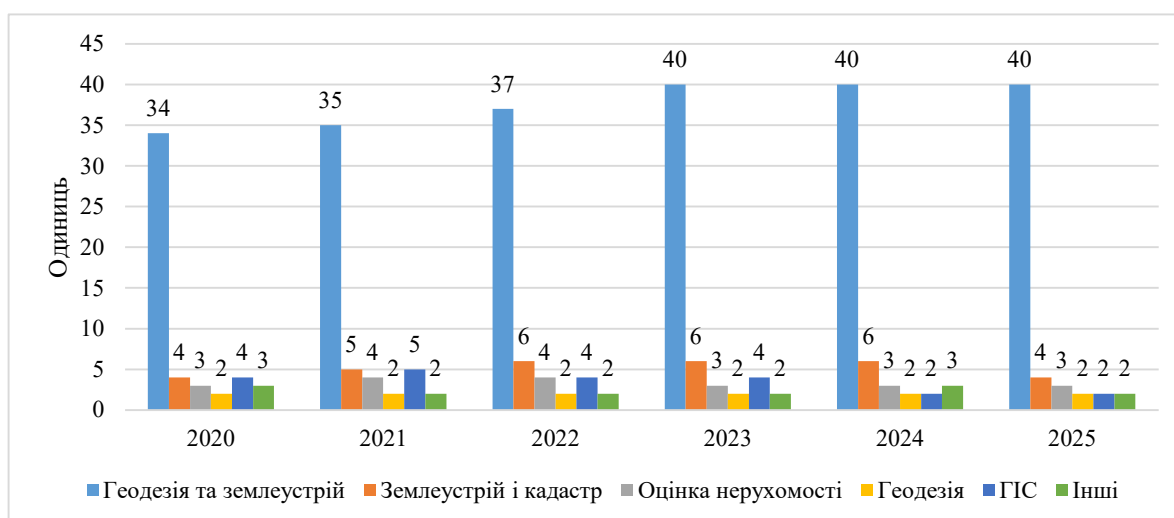


Рис. 3. Освітні програми з геодезії та землеустрою, освітній рівень бакалавр

Отримані дані свідчать про зацікавленість здобувачів у навчанні за інтегрованою спеціальністю, що відкриває ширші перспективи для подальшого працевлаштування. Водночас вони демонструють збереження попиту на висококваліфікованих фахівців у більш вузьких спеціалізованих напрямках, які залишаються невід'ємною складовою загальної галузі.

Висновки. З моменту здобуття Україною незалежності підготовка фахівців у сфері «Геодезія та землеустрій» пройшла значний шлях трансформації, адаптуючись до викликів земельної реформи, становлення ринкових відносин та законодавчих змін, і постійно відображала динаміку потреб держави та суспільства у фахівцях, здатних працювати із земельними ресурсами. Майбутній розвиток освітніх програм має бути орієнтований на подальшу інтеграцію інноваційних геопросторових технологій, посилення практичної підготовки та розвиток міждисциплінарних компетентностей. За тенденцією зростання зацікавленості у фахівцях з комплексними знаннями спостерігається тенденція збереження потреби в експертах у більш вузьких, але невід'ємних складових спеціальності.

Список використаних джерел

1. Enemark, S. (2014). From cadastre to land governance. *International Journal on Land Governance*, 23 p.
2. Enemark, S. (2010, December). *The land management paradigm for developing countries. FIG Monthly Article*. Retrieved from https://www.fig.net/resources/monthly_articles/2010/december_2010/december_2010_enemark.pdf.
3. Williamson, I., Enemark, S., Wallace, J., & Rajabifard, A. (2010). *Land administration for sustainable development*. Redlands, CA: Esri Press. <https://www.esri.com/en-us/esri-press/browse/land-administration-for-sustainable-development>.
4. Rajabifard, A., Binns, A., Masser, I., & Williamson, I. (2012). The role of spatial data infrastructures in establishing sustainable land administration systems. *Land Use Policy*, 29(2), 445-457. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.07.008>.
5. Третяк А.М., Кривов В.М., Тарнапольський А.В. та ін. (2001). Наукові проблеми розробки навчальних програм з землеустрою. *Землевпорядкування*, (3), 67-80.
6. Лозовий, О. (2009). Про стандарти і навчальні плани підготовки бакалаврів із землеустрою і земельного кадастру. *Землевпорядний вісник*, (9), 43-45.
7. Мартин, А., Дорош, Й., & Флекей, З. (2009). Зміст вищої освіти у галузі землеустрою: сучасний стан, проблеми та шляхи вирішення. *Землевпорядний вісник*, (5), 32-36.
8. Мартин, А. (2017). Вища освіта з геодезії та землеустрою: час змінювати пріоритети навчання. *Землевпорядний вісник*, (2), 30-36.
9. Беспалько, Р., Гуцул, Т., Казімір, І., Смага, І. (2022). Досвід розробки освітньої програми «Геодезія та землеустрій». *Технічні науки та технології*, 2(28), 177-188.
10. Пілічева М.О., Анопрієнко Т.В. Сучасні тенденції у сферах геодезії, землеустрою, земельного кадастру та містобудування. (2021). *Комунальне господарство міст. Серія: «Економічні науки»*, 4(164), 136-143.
11. Rusina, N. G., & Liulchyk, V. O. (2016). Model for professionals' training in the field of geodesy and land management in conditions of informatization, globalization and European integration. *Information Technologies and Learning Tools*, 54(4), 177-190.
12. Serbov, M. G., & Danilova, N. V. (2025, April 16-18). *Prospects for the development of higher education in geodesy and land management in Ukraine in the interests of climate service and post-war restoration of Ukraine*. Paper presented at *The Second International Conference on Climate Services*, Odesa, Ukraine. <https://dSPACE.onu.edu.ua/handle/123456789/41304>.
13. Про перелік напрямів та спеціальностей, за якими здійснюється підготовка фахівців у вищих навчальних закладах за відповідними освітньо-кваліфікаційними рівнями, Постанова Кабінету Міністрів України № 507 (2010) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/507-97-п#Text>.
14. Про вищу освіту, Закон України № 2984-III (2014) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2984-14#Text>.
15. Про затвердження Положення про порядок ведення Єдиного реєстру досудових розслідувань, Наказ Генеральної прокуратури України № 139 (2020) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0680-16#Text>.
16. Про затвердження переліку спеціальностей, за якими здійснюється підготовка фахівців у вищих навчальних закладах за освітньо-кваліфікаційними рівнями спеціаліста і магістра, Постанова Кабінету Міністрів України № 787 (2015) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/787-2010-п#Text>.
17. Про затвердження Національної рамки кваліфікацій, Постанова Кабінету Міністрів України № 1341 (2025) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1341-2011-п#Text>.
18. Про освіту, Закон України № 2145-VIII (2025) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19#Text>.
19. Про затвердження переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти, Постанова Кабінету Міністрів України № 266 (2025) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/266-2015-п#Text>.
20. Про затвердження Методів відбору зразків для визначення максимально допустимих рівнів діоксинів, діоксиноподібних поліхлорованих біфенілів та недіоксиноподібних поліхлорованих біфенілів у деяких харчових продуктах для цілей державного контролю, Наказ № 610-21 (2024). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1480-21#Text>.

21. Про внесення змін до переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої та фахової передвищої освіти, Постанова Кабінету Міністрів України № 1021 (2024) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1021-2024-п#Text>.

22. Єдина державна електронна база з питань освіти. (2020). *Вступна кампанія: Конкурсні пропозиції, освітній рівень бакалавра/магістра*. https://vstup2020.edbo.gov.ua/offers/?qualification=1&education_base=40&speciality=193.

23. Єдина державна електронна база з питань освіти. (2021). *Вступна кампанія: Конкурсні пропозиції, освітній рівень бакалавра/магістра*. https://vstup2021.edbo.gov.ua/offers/?qualification=1&education_base=40&speciality=193.

24. Єдина державна електронна база з питань освіти (2022). *Вступна кампанія: Конкурсні пропозиції (освітній рівень бакалавра/магістра)*. https://vstup2022.edbo.gov.ua/offers/?qualification=1&education_base=40&speciality=193.

25. Єдина державна електронна база з питань освіти. (2023). *Вступна кампанія: Конкурсні пропозиції, освітній рівень бакалавра/магістра*. https://vstup2023.edbo.gov.ua/offers/?qualification=1&education_base=40&speciality=193.

26. Єдина державна електронна база з питань освіти. (2024). *Вступна кампанія: Конкурсні пропозиції, освітній рівень бакалавра/магістра*. https://vstup2024.edbo.gov.ua/offers/?qualification=1&education_base=40&speciality=193.

27. Єдина державна електронна база з питань освіти. (2025). *Вступна кампанія: Конкурсні пропозиції, освітній рівень бакалавра/магістра, 2025*. https://vstup.edbo.gov.ua/offers/?qualification=2&education_base=620&speciality=G18.

References

1. Enemark, S. (2014). From cadastre to land governance. *International Journal on Land Governance*, 23.
2. Enemark, S. (2010). The land management paradigm for developing countries. *FIG Monthly Article*, December 2010. Retrieved from https://www.fig.net/resources/monthly_articles/2010/december_2010/december_2010_enemark.pdf.
3. Williamson, I., Enemark, S., Wallace, J., & Rajabifard, A. (2010). *Land administration for sustainable development*. Redlands, CA: Esri Press. Retrieved from <https://www.esri.com/en-us/esri-press/browse/land-administration-for-sustainable-development>.
4. Rajabifard, A., Binns, A., Masser, I., & Williamson, I. (2012). The role of spatial data infrastructures in establishing sustainable land administration systems. *Land Use Policy*, 29(2), 445-457. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.07.008>.
5. Tretiak, A. M., Kryvov, V. M., Tarnapolskyi, A. V., et al. (2001). *Naukovi problemy rozrobky navchalnykh prohram z zemleustroi* [Scientific problems of developing curricula in land management]. *Zemlevporiadkuvannia*, (3), 67-80.
6. Lozovyi, O. (2009). *Pro standarty i navchalni plany pidhotovky bakalavriv iz zemleustroi i zemelnogo kadastru* [On standards and curricula for bachelors in land management and cadastre]. *Zemlevporiadnyi Visnyk*, (9), 43-45.
7. Martyn, A., Dorosh, Y., & Flekei, Z. (2009). *Zmist vyshchoi osvity u haluzi zemleustroi: suchasnyi stan, problemy ta shliakhy vyrishennia* [Content of higher education in land management: Current state, problems and solutions]. *Zemlevporiadnyi Visnyk*, (5), 32-36.
8. Martyn, A. (2017). *Vyshcha osvita z heodezii ta zemleustroi: chas zminiuvaty priorytety navchannia* [Higher education in geodesy and land management: Time to change learning priorities]. *Zemlevporiadnyi Visnyk*, (2), 30-36.
9. Bepalko, R., Hutsul, T., Kazimir, I., & Smaha, I. (2022). *Dosvid rozrobky osvitnoi prohramy "Heodezii ta zemleustrii"* [Experience of developing the educational program "Geodesy and Land Management"]. *Tekhnichni Nauky ta Tekhnologii – Technical Sciences and Technologies*, 2(28), 177-188.
10. Pilicheva, M. O., & Anopriienko, T. V. (2021). *Suchasni tendentsii u sferakh heodezii, zemleustroi, zemelnogo kadastru ta mistobuduvannia* [Current trends in geodesy, land management, land cadastre, and urban planning]. *Komunalne Hospodarstvo Mist. Serii: Ekonomichni Nauky – Communal economy of cities. Series: Economic sciences*, 4(164), 136-143.

11. Rusina, N. G., & Liulchyk, V. O. (2016). Model for professionals' training in the field of geodesy and land management in conditions of informatization, globalization and European integration. *Information Technologies and Learning Tools*, 54(4), 177-190.
12. Serbov, M. G., & Danilova, N. V. (2025). Prospects for the development of higher education in geodesy and land management in Ukraine in the interests of climate service and post-war restoration of Ukraine. Odesa I. I. Mechnikov National University Repository.
13. Cabinet of Ministers of Ukraine. (1997). Postanova № 507 vid 24.05.1997 [Resolution No. 507 of May 24, 1997]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/507-97-%D0%BF>.
14. Verkhovna Rada of Ukraine. (2002). Zakon Ukrainy "Pro vyshchu osvitu" № 2984-III vid 17.01.2002 [Law of Ukraine "On Higher Education" No. 2984-III of January 17, 2002]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2984-14>.
15. Ministry of Education and Science of Ukraine. (2016). Nakaz № 409 vid 06.04.2016 [Order No. 409 of April 6, 2016]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0680-16>.
16. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2010). Postanova № 787 vid 27.08.2010 [Resolution No. 787 of August 27, 2010]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/787-2010-%D0%BF#Text>.
17. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2011). Postanova № 1341 vid 23.11.2011 [Resolution No. 1341 of November 23, 2011]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1341-2011-%D0%BF#Text>.
18. Verkhovna Rada of Ukraine. (2017). Zakon Ukrainy "Pro osvitu" № 2145-VIII [Law of Ukraine "On Education" No. 2145-VIII]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19>.
19. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2015). Postanova № 266 vid 29.04.2015 [Resolution No. 266 of April 29, 2015]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/266-2015-%D0%BF>.
20. Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine. (2021). Nakaz № 317 vid 27.10.2021 [Order No. 317 of October 27, 2021]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1480-21>.
21. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2024). Postanova № 1021 vid 30.08.2024 [Resolution No. 1021 of August 30, 2024]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1021-2024-%D0%BF>.
22. Unified State Electronic Database on Education (EDEBO). (2020). Vstupna kampaniia: Konkursni propozyitsii, osvittii riven bakalavra/mahistra [Admission campaign: Competitive offers, bachelor's/master's level]. Retrieved from https://vstup2020.edbo.gov.ua/offers/?qualification=1&education_base=40&speciality=193.
23. Unified State Electronic Database on Education (EDEBO). (2021). Vstupna kampaniia: Konkursni propozyitsii, osvittii riven bakalavra/mahistra [Admission campaign: Competitive offers, bachelor's/master's level]. Retrieved from https://vstup2021.edbo.gov.ua/offers/?qualification=1&education_base=40&speciality=193.
24. Unified State Electronic Database on Education (EDEBO). (2022). Vstupna kampaniia: Konkursni propozyitsii, osvittii riven bakalavra/mahistra [Admission campaign: Competitive offers, bachelor's/master's level]. Retrieved from https://vstup2022.edbo.gov.ua/offers/?qualification=1&education_base=40&speciality=193.
25. Unified State Electronic Database on Education (EDEBO). (2023). Vstupna kampaniia: Konkursni propozyitsii, osvittii riven bakalavra/mahistra [Admission campaign: Competitive offers, bachelor's/master's level]. Retrieved from https://vstup2023.edbo.gov.ua/offers/?qualification=1&education_base=40&speciality=193.
26. Unified State Electronic Database on Education (EDEBO). (2024). Vstupna kampaniia: Konkursni propozyitsii, osvittii riven bakalavra/mahistra [Admission campaign: Competitive offers, bachelor's/master's level]. Retrieved from https://vstup2024.edbo.gov.ua/offers/?qualification=1&education_base=40&speciality=193.
27. Unified State Electronic Database on Education (EDEBO). (2025). Vstupna kampaniia: Konkursni propozyitsii, osvittii riven bakalavra/mahistra [Admission campaign: Competitive offers, bachelor's/master's level]. Retrieved from https://vstup.edbo.gov.ua/offers/?qualification=2&education_base=620&speciality=G18.

Отримано 19.9.2025

Olga Petrakovska¹, Mariia Mykhalova²¹Doctor Technical Sciences, Professor

Head of the Department of Land Management and Cadastre

Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

E-mail: petrakovska.os@knuba.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9437-9730>**Scopus Author ID:** 57208029712. **ResearcherID:** AAC-8135-2019²Doctor Technical Sciences, Associate Professor

Associate Professor the Department of Land Management and Cadastre

Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

E-mail: mykhalova.myu@knuba.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2242-5507>.**Scopus Author ID:** 57245147600. **ResearcherID:** U-7863-2017

TRANSFORMATION OF EDUCATION IN THE FIELD OF GEODESY AND LAND MANAGEMENT

Over the past three decades, the higher education system of Ukraine has undergone profound transformations shaped by both internal reforms and external challenges. These processes evolved alongside broader socio-economic shifts, global digitalization, European integration, and the disruptive impact of full-scale war. Within this dynamic context, geodesy and land management stand out as a field that simultaneously preserves its traditional technical foundations while expanding towards spatial planning, land cadastre, property valuation, and geoinformation systems. Despite its crucial role for sustainable land resource management and state land cadastre operations, there remains a noticeable lack of comprehensive studies addressing the evolution of professional training in this specialty since Ukraine's independence. This gap reflects a broader misalignment between labour market demands and higher education curricula. The article aims to systematically analyse the evolution of professional training in "Geodesy and Land Management" within Ukrainian higher education from 1991 to 2025. Historical, retrospective, comparative, and systematic approaches were applied to trace key stages of curricular reforms, legislative changes, and the integration of innovative technologies. The analysis emphasizes the interdisciplinary nature of the specialty, which combines engineering, natural sciences, law, and economics. The findings highlight a growing interest among students in integrated educational programs offering wider career opportunities, while at the same time confirming the steady demand for narrow-profile specialists in core technical domains. The study concludes that professional training in this field has consistently reflected the socio-political and economic transformations of Ukrainian society. Moving forward, higher education programs should strengthen the integration of geospatial technologies, emphasize practice-oriented learning, and foster interdisciplinary competencies.

Keywords: zoning; functional area; territorial zone; land plot purpose; spatial planning.

Fig.: 3. References: 27.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-452-461](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-452-461)

УДК 332.3:504.062:711.14+349.44+528.9

Ольга Сергіївна Петраковська¹, Маргарита Вячеславівна Дубницька²¹доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри землеустрою і кадастру
Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)E-mail: petrakovskaolga@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9437-9730>

ResearcherID: AAC-8135-2019. SCOPUS Author ID: 57208029712

²доктор філософії за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій», доцент кафедри геодезії та картографії

Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: dubnytskamv@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1907-1496>

ResearcherID: AAD-7411-2019. SCOPUS Author ID: 57200093477

ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ФОРМАЛІЗАЦІЇ ПОНЯТТЯ «СТАЛЕ ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ»

У статті обґрунтовано необхідність формалізації поняття «стале землекористування» як базового принципу управління земельними ресурсами. Розкрито суперечності чинного законодавчого визначення, запропоновано технічне тлумачення поняття та механізми його впровадження на місцевому рівні. Особливу увагу приділено ролі комплексних планів просторового розвитку громад, а також модернізації системи моніторингу земель із використанням ІТ-технологій. Зроблено висновок про необхідність міждисциплінарного підходу до сталого управління земельними ресурсами.

Ключові слова: стале землекористування; сталий розвиток; просторове планування; територіальна громада; моніторинг земель

Рис.: 1. Бібл.: 21.

Актуальність теми дослідження. Сьогодні Україна гідно протистоїть найбільшому виклику за історію своєї незалежності. Не зважаючи на всі складнощі війни, питання ефективного землекористування залишатиметься актуальним для нашої держави й навіть загострюється. Україна є одним з гарантів продовольчої безпеки у світі, і попри величезні втрати, спричинені повномасштабним вторгненням російської федерації, продовжує залишатися ключовим постачальником на світових ринках зерна та соняшникової олії [21]. Однією з ключових особливостей функціонування українського ринку сільськогосподарських земель у воєнний період є те, що їхня вартість формується не лише на основі якісних характеристик ґрунтів чи продуктивності, а і значною мірою залежить від безпекових умов, рівня ризиків воєнних дій, доступності до ринкової інфраструктури та можливостей подальшого використання [1]. Продовжує зростати попит на землю у відносно віддалених від лінії фронту населених пунктах. Проте використання земель, незалежно від їхнього цільового призначення, має бути раціональним, а якщо ми прагнемо розвитку держави в довгостроковій перспективі – то ще і сталим.

Постановка проблеми. Серед принципів земельного законодавства [13] забезпечення раціонального використання та охорони земель посідає вагоме місце. Зрештою, усі заходи у сфері землеустрою, містобудування та управління територіями мають задовольняти вимоги раціонального використання земель та забезпечувати їх охорону [5]. Із законодавчого визначення терміну «землеустрій», що трактується як сукупність соціально-економічних та екологічних заходів, випливає, що він є ключовим інструментом для досягнення раціонального землекористування [13].

Не зважаючи на те, що «раціональне використання земель» є наріжним каменем земельного законодавства, у нормативно-правових актах немає визначення цього терміна. Отже, відсутні нормативи і стандарти раціонального землекористування, що унеможливорює його ідентифікацію та якісну оцінку.

Поняття сталого землекористування безпосередньо впливає з принципів раціонального використання земель і є складовою ширшої парадигми сталого розвитку. У статті 1 Закону України «Про землеустрій» визначено, що *стале землекористування* – це таке використання земель, яке визначається тривалим користуванням земельною ділянкою без зміни її цільового призначення, погіршення її якісних характеристик та забезпечує

оптимальні параметри екологічних і соціально-економічних функцій територій [12]. Однак, в цьому визначенні одразу закладена суперечність, оскільки існуюче використання земельної ділянки далеко не завжди дійсно відповідає вимогам «оптимальності» і може потребувати зміни. Невизначеним залишається також, які саме параметри екологічних і соціально-економічних функцій територій треба оцінювати. Іншими словами, хоча поняття «стале землекористування» і визначене на законодавчому рівні, воно досі залишається на рівні абстрактної ідеї та не має жодних технічних характеристик чи параметрів, за якими його можна оцінити.

Аналіз законодавства засвідчує, що відсутність законодавчого закріплення критеріїв раціонального землекористування та сталого використання земель створює суттєві бар'єри для забезпечення належного контролю за дотриманням земельних і природоохоронних норм усіма суб'єктами земельних відносин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій та виділення недосліджених частин загальної проблеми. Теоретичні та практичні засади раціонального використання земель, переважно сільськогосподарського призначення, досліджували українські вчені В. Андрийчук, А. Андрущенко, П. Гайдуцький, Д. Добряк, Й. Дорош, А. Кучер, А. Москаленко, В. Трегобчук, О. Тараріко, А. Третяк, О. Ходаківська та інші. Однак у цих дослідженнях земля розглядається саме як засіб виробництва в сільському господарстві. Натомість недостатньо дослідженими залишаються питання раціонального використання земель у населених пунктах, де земля виконує роль просторового базису як для забезпечення потреб життєдіяльності населення, так і для розміщення суспільного виробництва.

З містобудівного погляду, питання сталого використання земель досліджували В. Горлачук, М. Дьомін, Н. Каблак, А. Мартин, М. Михальова, І. Новаковська, О. Петраковська, Л. Перович, А. Плешкановська, О. Сингаївська, М. Трегуб, А. Третяк, А. Уль, Г. Фільваров. Незважаючи на значний внесок кожного з них у дослідження цього питання, проблема розроблення конкретних моделей та механізмів формування сталого землекористування в населених пунктах залишається не вирішеною.

Метою статті є обґрунтування потреби у формалізації поняття «стале землекористування» як визначального чинника сталого розвитку територій України. Це передбачає вдосконалення просторового планування на рівні громад, розвиток законодавчої бази та системи моніторингу земель. Актуальність проблеми зростає в умовах воєнних руйнувань і особливо у контексті повоєнного відновлення. Авторки прагнуть перевести це поняття з теоретичної площини у сферу практичних технічних вимог, що дозволить забезпечити збалансоване управління земельними ресурсами з урахуванням економічних, екологічних і соціальних викликів сьогодення.

Виклад основного матеріалу. На нашу думку, формалізація понять «стале землекористування» та «планування сталого землекористування» та переведення їх з розряду теоретичних концепцій в групу технічних вимог до використання земель є на часі з ряду причин.

По-перше, стратегічним завданням наступних десятиліть для нашої держави стане подолання масштабних і багатовимірних наслідків сьогоденної війни як у соціальній, економічній, так і в екологічній площинах. Особливо актуальним це питання постає у сфері землекористування, де вплив збройного конфлікту проявляється у руйнуванні інфраструктури, деградації урбаністичних і агроландшафтів, забрудненні ґрунтів та зміні підходів до планування використання територій [2; 3; 4]. Важливо підкреслити, що наслідки бойових дій істотно відрізняються залежно від типу земель – забудовані території та аграрні ландшафти зазнають різного рівня і характеру втрат. Земля, як відомо, має триєдину сутність – вона одночасно виступає територіальним базисом для просторового розвитку, природним ресурсом, що потребує захисту, і основним засобом виробництва у

сільському та лісовому господарстві [13]. Кожна з цих функцій зазнала суттєвих викликів унаслідок військових дій, і тому потребує окремого аналізу. Такі наслідки повинні бути не лише зафіксовані, але й параметризовані, кількісно та якісно оцінені за допомогою науково обґрунтованих підходів і цифрових інструментів.

Однак, сам по собі аналіз ситуації не здатен забезпечити відновлення землекористування. Для того щоб ефективно реалізовувати заходи з реабілітації постраждалих територій, потрібне чітке формулювання цільових орієнтирів. У цьому контексті постає нагальна потреба у формалізації понять «стале землекористування» та «планування сталого землекористування». Ці поняття мають стати основою для розробки нормативно-правових, стратегічних і просторових рішень, які забезпечуватимуть баланс між економічними, екологічними та соціальними потребами, особливо у повоєнний період. На нашу думку, на відміну від законодавчо закріпленого визначення, під *сталим землекористуванням* доцільно розуміти таку модель організації використання земельних ресурсів, яка не лише гарантує їх збереження для майбутніх поколінь, але й передбачає відновлення порушених екосистем, забезпечення продовольчої безпеки, економічної ефективності, просторової збалансованості та соціальної справедливості. Водночас вона має спиратися на гнучкі правові й інституційні механізми управління, враховувати безпекові виклики, культурні цінності та забезпечувати адаптивність до кліматичних, економічних і соціальних змін. Відповідно, планування сталого землекористування має проводитись на усіх рівнях державного управління (національному, регіональному й локальному) та охоплювати широкий спектр практичних інструментів.

Таким чином, лише після комплексного дослідження наслідків військової агресії та розробки відповідних стратегій, які базуються на принципах сталого розвитку, можна говорити про ефективне і тривале відновлення землекористування. Цей процес має бути не просто відбудовчим, а трансформаційним – таким, що дозволить переосмислити ставлення до землі як до обмеженого і вразливого ресурсу та сформувати передумови для його відповідального і стійкого використання в майбутньому.

По-друге, з 1 січня 2028 року для всіх територіальних громад України запроваджена обов'язкова вимога щодо розроблення та затвердження комплексного плану просторового розвитку території громади [10]. Цей документ має ключове значення для формування майбутнього кожної громади, адже його основною метою визначено забезпечення її сталого розвитку [11]. У контексті просторового планування та управління земельними ресурсами, саме комплексний план покликаний стати основним стратегічним документом, який узгоджує економічні інтереси, екологічні обмеження та соціальні потреби громади. Таким чином, він повинен відігравати центральну роль у впровадженні принципів сталого землекористування на місцевому рівні.

Законодавчо комплексний план просторового розвитку вже позиціонується як офіційний інструмент планування сталого землекористування [11]. Проте на практиці ефективність цього інструменту суттєво знижується через низку проблем. Насамперед спостерігається відсутність належного фінансування робіт з його розроблення [7], що особливо критично для менш економічно розвинених громад, які мають обмежені ресурси. Водночас відсутнє належне картографічне забезпечення для розробки комплексних планів, що ускладняється застарілими та неповними даними. Воєнні дії поглиблюють проблему через втрату матеріалів, обмеженість доступу до геоінформації. Крім того, існує дефіцит кваліфікованих фахівців, здатних розробляти документи просторового планування з урахуванням комплексності завдань сталого розвитку. Відчувається також недостатня зацікавленість з боку органів місцевого самоврядування, що часто сприймають цей документ як формальність, а не як дієвий інструмент управління розвитком території.

Особливої уваги заслуговують нормативно-правові акти, які регулюють процедуру створення та структуру комплексного плану просторового розвитку [18; 8; 15]. Хоча в них передбачено включення таких важливих розділів, як «Загрози та конфлікти природокористування» та «Цілі та заходи з охорони довкілля та сталого природокористування» [18], однак ці вимоги сформульовані надто загально [6]. Відсутність конкретних методичних рекомендацій і чітко визначених критеріїв щодо змісту зазначених розділів призводить до того, що вони заповнюються декларативними тезами без аналітичної глибини та практичної орієнтації. Як наслідок, комплексний план просторового розвитку втрачає свою здатність бути реальним механізмом сталого розвитку, зокрема в частині сталого землекористування.

Якщо ці структурні та методичні недоліки не будуть усунуті на етапі, коли робота над комплексними планами в Україні тільки починається, то існує значний ризик, що комплексні плани просторового розвитку так і залишаться формальними документами. У такому разі втрачається можливість інтеграції сталого землекористування в систему управління розвитком громад, що суперечить самій меті їх впровадження. Тому наразі необхідним є не лише дотримання законодавчих вимог щодо створення комплексних планів, а й перегляд нормативної бази з акцентом на конкретизацію вимог до їх змісту, підвищення фахового рівня виконавців та забезпечення реальної зацікавленості громад у результатах просторового планування.

Загалом, на наше переконання, вирішення питань формування сталого використання земель населених пунктів має відбуватися саме на рівні територіальних громад. Хоча територіальні громади не є об'єктом адміністративно-територіального устрою України згідно з Конституцією [14], вони визначені адміністративно-територіальними одиницями базового рівня Концепцією реформування місцевого самоврядування та територіальної організації влади в Україні [19]. Орган місцевого самоврядування, що представляє інтереси мешканців територіальної громади, також виконує функцію розпорядника земель комунальної власності цієї громади, її бюджетних коштів, уповноважений виступати замовником комплексного плану просторового розвитку територіальної громади.

Оскільки територіальна громада самостійно здійснює управління своєю територією, саме вона є суб'єктом, відповідальним за формування сталого землекористування на місцевому рівні. Органи місцевого самоврядування мають найширший перелік повноважень у сфері охорони земель та контролю за їх використанням, тому вони можуть розробити та імплементувати документи з планування сталого землекористування (зокрема, програми використання та охорони земель громади).

По-третє, сучасна система моніторингу земель в Україні потребує суттєвих змін та удосконалень для забезпечення ефективного управління земельними ресурсами, особливо у контексті територій, що постраждали від військових дій. З огляду на це, протягом 2022-2024 років було прийнято важливі нормативно-правові акти, які передбачають здійснення моніторингу довкілля з використанням взаємопов'язаних галузевих автоматизованих інформаційних систем [20; 9; 16; 17]. Важливо, що більшість цих актів набирають чинності через шість місяців з дня скасування чи припинення воєнного стану, тобто зараз фактично триває підготовка до створення цих інформаційних систем, відбувається формування концепції.

19 січня 2022 року Розпорядженням Кабінету Міністрів України № 70-р було схвалено Концепцію Загальнодержавної цільової програми використання та охорони земель, яка, серед іншого, передбачає розроблення і впровадження цифрових процесів під час здійснення землеустрою та моніторингу земель, автоматизованих інформаційно-аналітичних систем і засобів дистанційного зондування Землі, а також критеріїв і технологій для

здійснення моніторингу земель і земельних відносин, зокрема з використанням алгоритмів штучного інтелекту [20]. У цьому контексті особливої актуальності набуває дослідження світової практики залучення інструментів штучного інтелекту до процесів моніторингу земельних ресурсів і прогнозування наслідків для навколишнього середовища, адже такі підходи сприяють автоматизації та здешевленню моніторингових процедур.

З метою забезпечення отримання достовірної інформації про стан земельних ресурсів, а також ефективного контролю за їх використанням і охороною, Концепцією передбачено створення автоматизованої системи моніторингу земель із застосуванням даних дистанційного зондування Землі. У розвиток цих підходів 20 березня 2023 року був ухвалений Закон України № 2973-IX «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо державної системи моніторингу довкілля, інформації про стан довкілля (екологічної інформації) та інформаційного забезпечення управління у сфері довкілля» [9]. Закон, який набуде чинності через шість місяців після скасування чи припинення воєнного стану, передбачає впровадження моніторингу довкілля на основі взаємопов'язаних галузевих автоматизованих інформаційних систем. Для реалізації його положень урядом уже розроблено й затверджено відповідні підзаконні нормативно-правові акти, які наберуть чинності одночасно з основним Законом.

Логічним продовженням реформ у сфері моніторингу стало затвердження 13 червня 2024 року Постановою Кабінету Міністрів України № 684 «Порядку функціонування державної системи моніторингу довкілля та її підсистем» [16]. Відповідно до цього документа, державна система моніторингу довкілля визначається як система спостережень, збирання, оброблення, аналізу, зберігання інформації та обміну інформацією про стан довкілля, вплив на нього, прогнозування його змін та розроблення науково обґрунтованих рекомендацій для прийняття ефективних управлінських рішень в Україні з метою забезпечення досягнення Цілей сталого розвитку. Система моніторингу включає цілий ряд підсистем, і серед інших – підсистему моніторинг земель і ґрунтів. Моніторинг за підсистемами проводиться згідно з відповідними порядками, затвердженими Кабінетом Міністрів України.

З огляду на це, 23 липня 2024 р. Постановою Кабінету Міністрів України № 848 був затверджений новий «Порядок проведення моніторингу земель і ґрунтів» [17], який замінив застаріле Положення про моніторинг земель від 1993 року. Документ визначає механізм здійснення моніторингу з метою своєчасного виявлення змін у стані земель, забруднення та змін властивостей ґрунтів, а також для оцінки ефективності заходів із охорони земель, збереження та відновлення ґрунтової родючості, запобігання негативним процесам і ліквідації їхніх наслідків. Важливим нововведенням стало впровадження поняття «автоматизована інформаційна система моніторингу земель і ґрунтів» як інформаційно-комунікаційної системи, що забезпечує автоматизацію процесів моніторингу та відкритий доступ користувачів до його результатів, сприяючи прозорості, обміну інформацією щодо стану земель, землекористування та задоволенню інформаційних потреб у сфері охорони земель. Передбачається, що за допомогою автоматизованої інформаційної системи моніторингу земель і ґрунтів проводиться збір, обробка, передавання, збереження та аналіз інформації, отриманої шляхом систематичних спостережень за станом земель і ґрунтів, після чого формуються результати проведення їх моніторингу. Тому зараз необхідно сформулювати критерії моніторингу, які дозволятимуть фіксувати ступінь відповідності стану земель і ґрунтів вимогам сталого землекористування.

Блок-схема обґрунтування необхідності формалізації поняття «стале землекористування» наведена на рис. 1.

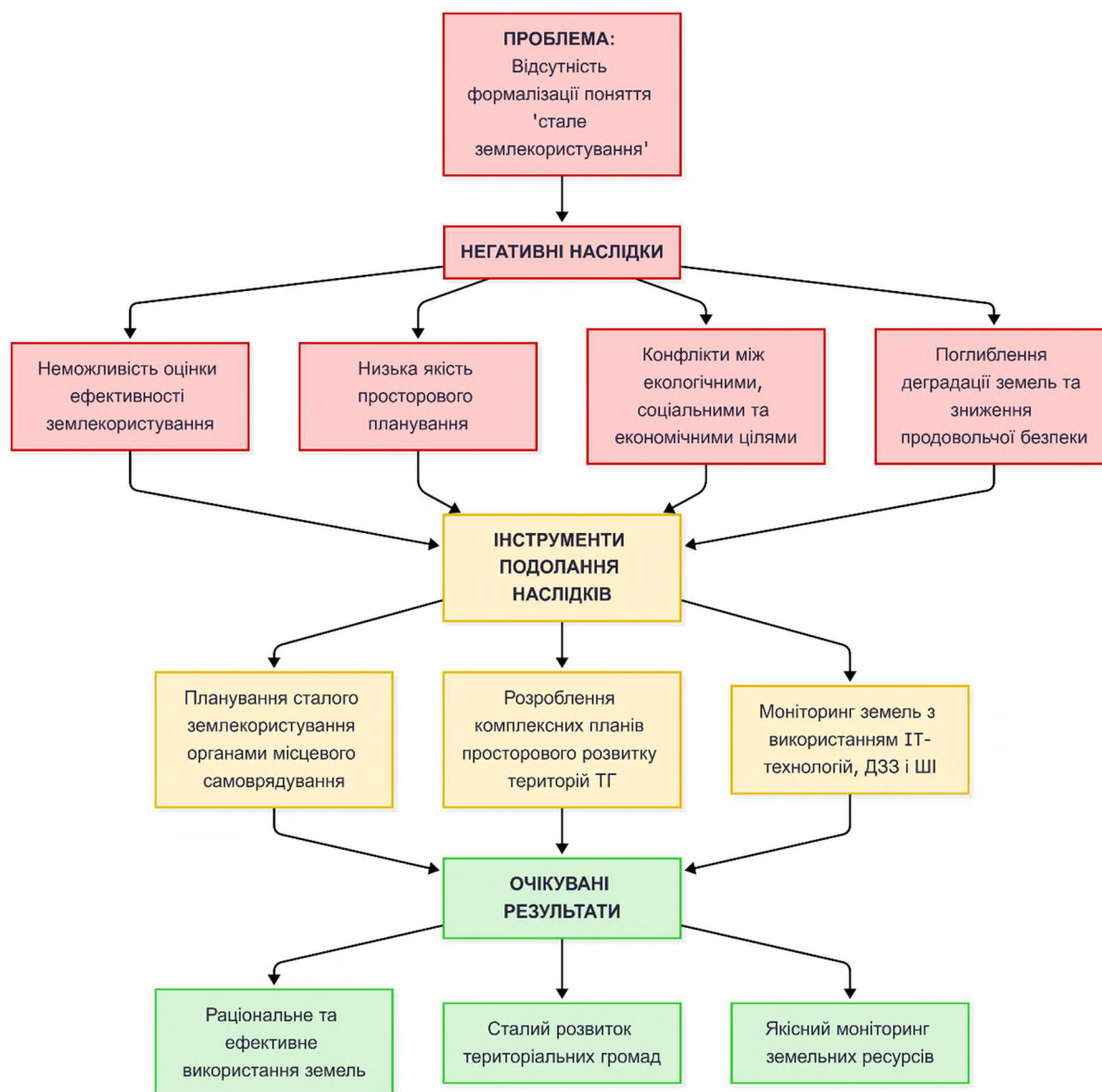


Рис. 1. Блок-схема обґрунтування необхідності формалізації поняття «стале землекористування»

Висновки. В умовах необхідності відновлення України особливої актуальності набуває потреба у формалізації поняття «стале землекористування» як базового принципу управління земельними ресурсами. Законодавче визначення цього терміна є декларативним і не містить чітких критеріїв для його оцінки, що ускладнює реалізацію ефективної земельної політики та просторового планування. Комплексні плани просторового розвитку територіальних громад, що набули обов’язковості з 2028 року, визначені основним інструментом впровадження принципів сталого землекористування. Проте наразі потенційна ефективність таких документів обмежується методичними, кадровими та фінансовими проблемами, а також відсутністю чітких нормативних орієнтирів у сфері сталого використання земель. Особливу роль у формуванні сталого землекористування мають відігравати органи місцевого самоврядування, які відповідають за управління територією громади, планування її розвитку та охорону земель. Водночас для забезпечення належного контролю за станом земель і прийняття обґрунтованих управлінських рішень необхідним є запровадження сучасної автоматизованої системи моніторингу земель і

ґрунтів, заснованої на даних дистанційного зондування та алгоритмах штучного інтелекту. Таким чином, формалізація поняття «стале землекористування» має спиратися на міждисциплінарний підхід, який враховує взаємодію екологічних, економічних і соціальних чинників на усіх рівнях управління.

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

Під час написання цього матеріалу автори використовували Mermaid Chart – для візуалізації блок-схеми на Рис. 1; ChatGPT – для оформлення списку використаних джерел у стилі APA та класифікації статті за УДК. Після використання цих інструментів автори переглянули та відредагували результат і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. AgroPolit.com (2023). Два роки ринку землі в Україні – досягнення та провали і як його змінили війна. <https://agropolit.com/spetsproekty/1018-dva-roki-rinku-zemli-v-ukrayini--dosyagnennya-ta-provali-i-yak-yogo-zminili-viyna>.
2. Datsenko, L., Titova, S., & Dubnytska, M. (2024). Advantages of comprehensive renovation of territorial communities in Ukraine in the context of spatial planning. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 24(1), 15–30. <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/200728>.
3. Datsenko, L., Titova, S., & Dubnytska, M. (2024). Conceptual approaches to the complex of restoration of the affected territories as a result of military actions in Ukraine. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 23(3), 3–13. <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/190126>.
4. Datsenko, L., Titova, S., Dubnytska, M., & Kustovska, O. (2024). The issue of sustainable land use in Ukraine taking into account the consequences of the war. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 23(2), 25–38. <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/185974>.
5. Petrakovska, O., Mykhalova, M., & Lizunova, A. (2024). Interrelation of state information systems for land management. *Journal of Water and Land Development*, 1 (IV–VI), 159–165. <https://doi.org/10.24425/jwld.2024.150269>.
6. USAID, Chemonics International. (2022). *Як розробити комплексний план громади: посібник для професіоналів*. Київ.
7. Верховна Рада України. (2025, 29 січня). Заява Комітету з питань гуманітарної та інформаційної політики щодо призупинення фінансування в Україні проєктів та програм Агентством США з міжнародного розвитку (USAID). <https://kompkd.rada.gov.ua/news/Top-novyna/76569.html>.
8. ДБН Б.1.1-14:2021. (2021). Склад та зміст містобудівної документації на місцевому рівні. Накази Міністерства розвитку громад та територій України від 30.12.2021 № 367, від 31.01.2022 № 22, від 08.04.2022 № 62, від 16.05.2022 № 72. https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/2022-06-14/72e8c9b4-4204-40c1-ab41-7d4081ae55bf.pdf.
9. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо державної системи моніторингу довкілля, інформації про стан довкілля (екологічної інформації) та інформаційного забезпечення управління у сфері довкілля, Закон України № 2973-IX (2023) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2973-20#Text>.
10. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо планування використання земель, Закон України № 711-IX (2025) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/711-20#Text>.
11. Про регулювання містобудівної діяльності, Закон України № 3038-VI (2025) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text>.
12. Про землеустрій, Закон України № 858-IV (2025) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15#Text>.
13. Земельний кодекс України, Кодекс України № 2768-III (2025) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text>.
14. Конституція України, № 254к/96-ВР (1996) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254k/96-vr#Text>.

15. Мінрегіон України & ТОВ “УКРНПЦІВІЛЬБУД”. (2021). *Методичні рекомендації щодо розроблення комплексних планів просторового розвитку території територіальної громади та інших видів містобудівної документації на місцевому рівні (перша редакція)*. <http://kyiv-heritage.com/sites/default/files/%D0%9C%D1%96%D0%BD%D1%80%D0%B5%D0%B3%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82%20-%20%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D1%81%D0%BD%20%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%BD%20%D0%9F%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%20%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%B2%20%D1%82%D0%B5%D1%80%202021%20%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%20%D1%80%D0%B5%D0%BA%2023%D1%81.pdf>.
16. Деякі питання функціонування державної системи моніторингу довкілля та її підсистем, Постанова Кабінету Міністрів України № 684 (2025) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/684-2024-п#Text>.
17. Про затвердження Порядку проведення моніторингу земель і ґрунтів, Постанова Кабінету Міністрів України № 848 (2024) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/848-2024-п#Text>.
18. Про затвердження Порядку розроблення, оновлення, внесення змін та затвердження містобудівної документації, Постанова Кабінету Міністрів України № 926 (2025) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/926-2021-п#Text>.
19. Кабінет Міністрів України. (2014, квітень 1). *Розпорядження № 333-р про схвалення Концепції реформування місцевого самоврядування та територіальної організації влади в Україні*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/333-2014-%D1%80#Text>.
20. Кабінет Міністрів України. (2022, січень 19). *Розпорядження Кабінету Міністрів України № 70-р від 19.01.2022 р. «Про схвалення Концепції Загальнодержавної цільової програми використання та охорони земель»*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/70-2022-%D1%80#Text>.
21. Русан, В. М., Жураковська, Л. А. (2024). *Аграрний сектор України у 2023 році: складові стійкості, проблеми та перспективні завдання*. http://niss.gov.ua/sites/default/files/2024-02/az_agrosector_15022024.pdf.

References

1. AgroPolit.com (2023). *Dva roky rynku zemli v Ukraini – dosiahnennia ta provaly i yak yoho zminyly viina [Two years of the land market in Ukraine – achievements and failures and how the war changed it]*. <https://agropolit.com/spetsproekty/1018-dva-roky-rinku-zemli-v-ukrayini--dosyagnennya-ta-provaly-i-yak-yogo-zminili-viina>.
2. Datsenko, L., Titova, S., & Dubnytska, M. (2024). Advantages of comprehensive renovation of territorial communities in Ukraine in the context of spatial planning. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 24(1), 15–30. <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/200728>.
3. Datsenko, L., Titova, S., & Dubnytska, M. (2024). Conceptual approaches to the complex of restoration of the affected territories as a result of military actions in Ukraine. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 23(3), 3–13. <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/190126>.
4. Datsenko, L., Titova, S., Dubnytska, M., & Kustovska, O. (2024). The issue of sustainable land use in Ukraine taking into account the consequences of the war. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 23(2), 25–38. <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/185974>.
5. Petrakovska, O., Mykhalova, M., & Lizunova, A. (2024). Interrelation of state information systems for land management. *Journal of Water and Land Development*, 1 (IV–VI), 159–165. <https://doi.org/10.24425/jwld.2024.150269>.
6. USAID, Chemonics International. (2022). *Yak rozrobyty kompleksnyi plan hromady: posibnyk dlia profesionaliv [How to develop a comprehensive community plan: a guide for professionals]*. Kyiv.
7. Verkhovna Rada Ukrainy. (2025, 29 sichnia). Zaiava Komitetu z pytan humanitarnoi ta informatsiinoi polityky shchodo przyzupynennia finansuvannia v Ukraini proiektiv ta prohram Ahentstvom SSHa z mizhnarodnoho rozvytku (USAID). [Statement of the Committee on Humanitarian and Information Policy regarding the suspension of funding in Ukraine for projects and programs by the United States Agency for International Development (USAID)]. [kompkd.rada.gov.ua](https://kompkd.rada.gov.ua/news/Top-novyna/76569.html). <https://kompkd.rada.gov.ua/news/Top-novyna/76569.html>.

8. DBN B.1.1-14:2021. Sklad ta zmist mistobudivnoi dokumentatsii na mistsevomu rivni. Nakazy Ministerstva rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy vid 30.12.2021 № 367, vid 31.01.2022 № 22, vid 08.04.2022 № 62, vid 16.05.2022 № 72. [Composition and content of urban planning documentation at the local level], Orders of the Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine from 30.12.2021 No. 367, from 31.01.2022 No. 22, from 08.04.2022 No. 62, from 16.05.2022 No. 72]. *e-construction.gov.ua*. https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/2022-06-14/72e8c9b4-4204-40c1-ab41-7d4081ae55bf.pdf.

9. Pro vnesennia zmin do deiakykh zakonodavchykh aktiv Ukrainy shchodo derzhavnoi systemy monitorynhu dovkillia, informatsii pro stan dovkillia (ekolohichnoi informatsii) ta informatsiinoho zabezpechennia upravlinnia u sferi dovkillia [On amendments to certain legislative acts of Ukraine regarding the state environmental monitoring system, environmental status information (ecological information) and information support for environmental management], Law of Ukraine No. 2973-IX. (2023). *zakon.rada.gov.ua*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2973-20#Text>.

10. Pro vnesennia zmin do deiakykh zakonodavchykh aktiv Ukrainy shchodo planuvannia vykorystannia zemel [On amendments to certain legislative acts of Ukraine regarding the planning of land use], Law of Ukraine No. 711-IX (2025). *zakon.rada.gov.ua*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/711-20#Text>.

11. Pro rehuliuвання mistobudivnoi diialnosti [On the regulation of urban planning activities], Law of Ukraine No. 3038-VI. (2025). *zakon.rada.gov.ua*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text>.

12. Pro zemleustrii [On land management], Law of Ukraine No. 858-IV. (2025). *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15#Text>.

13. Zemelnyi kodeks Ukrainy [Land Code of Ukraine], Code of Ukraine No. 2768-III. (2025). *zakon.rada.gov.ua*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text>.

14. Konstytutsiia Ukrainy [Constitution of Ukraine, No. 254k/96-VR]. (1996). *zakon.rada.gov.ua*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254k/96-bp#Text>.

15. Minrehion Ukrainy & TOV "UKRNPITsyVILBUD". (2021). *Metodychni rekomendatsii shchodo rozroblennia kompleksnykh planiv prostorovoho rozvytku terytorii terytorialnoi hromady ta inshykh vydiv mistobudivnoi dokumentatsii na mistsevomu rivni (persha redaktsiia) [Methodological recommendations for the development of comprehensive spatial development plans for the territory of the territorial community and other types of urban planning documentation at the local level (first edition)]*. <http://kyiv-heritage.com/sites/default/files/%D0%9C%D1%96%D0%BD%D1%80%D0%B5%D0%B3%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82%20-%20%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D1%81%D0%BD%20%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%BD%20%D0%9F%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%20%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%B2%20%D1%82%D0%B5%D1%80%202021%20%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%20%D1%80%D0%B5%D0%BA%2023%D1%81.pdf>.

16. Deiaki pytannia funktsionuvannia derzhavnoi systemy monitorynhu dovkillia ta yii pidsystem [Some issues of the functioning of the state environmental monitoring system and its subsystems], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 684. (2025). *zakon.rada.gov.ua*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/684-2024-п#Text>.

17. Pro zatverdzhennia Poriadku provedennia monitorynhu zemel i hruntiv [On approval of the Procedure for monitoring lands and soils], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 848. (2024). *zakon.rada.gov.ua*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/848-2024-п#Text>.

18. Pro zatverdzhennia Poriadku rozroblennia, onovlennia, vnesennia zmin ta zatverdzhennia mistobudivnoi dokumentatsii [On approval of the Procedure for the development, updating, amendment, and approval of urban planning documentation], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 926]. (2025). *zakon.rada.gov.ua*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/926-2021-п#Text>.

19. Pro skhvalennia Kontseptsii reformuvannia mistsevoho samovriaduvannia ta terytorialnoi orhanizatsii vlady v Ukraini» [On the approval of the Concept of reforming local self-government and territorial organization of power in Ukraine]. Order No. 333-r. (2014). *zakon.rada.gov.ua*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/333-2014-%D1%80#Text>.

20. Pro skhvalennia Kontseptsii Zahalnodержavnoi tsilovoi prohramy vykorystannia ta okhorony zemel [On the approval of the Concept of the National Targeted Program for Land Use and Protection], Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 70-r (2022). *zakon.rada.gov.ua*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/70-2022-%D1%80#Text>.

21. Rusan, V. M., Zhurakovska, L. A. (2024). *Ahrarnyi sektor Ukrainy u 2023 rotsi: skladovi stiikosti, problemy ta perspektyvni zavdannia [Agrarian sector of Ukraine in 2023: components of resilience, problems, and prospective tasks]*. http://niss.gov.ua/sites/default/files/2024-02/az_agro-sektor_15022024.pdf.

Отримано 05.10.2025

UDC 332.3:504.062:711.14+349.44+528.9

Olha Petrakovska¹, Margarita Dubnytska²

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Land Management and Cadastre
Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture (Kyiv, Ukraine)

E-mail: petrakovskaolga@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9437-9730>

ResearcherID: AAC-8135-2019. SCOPUS Author ID: 57208029712

²Doctor of Philosophy in the specialty 193 "Geodesy and Land Management",

Associate Professor of the Department of Geodesy and Cartography

Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)

E-mail: dubnytskamv@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1907-1496>

ResearcherID: AAD-7411-2019. SCOPUS Author ID: 57200093477

SUBSTANTIATION OF THE NECESSITY TO FORMALIZE THE CONCEPT OF “SUSTAINABLE LAND USE”

The article highlights the conceptual, legal, and organizational aspects of forming sustainable land use in Ukraine under the current conditions of wartime challenges and the future reconstruction of the state. It emphasizes that the current legislative definition of “sustainable land use” is declarative and lacks clear technical parameters for evaluation, which complicates the implementation of a rational land management policy. The paper reveals contradictions in the normative interpretation of the term, proposes its technical clarification, and identifies directions for its formalization through the development of assessment criteria, regulatory indicators, and the implementation of modern land monitoring tools.

Considerable attention is paid to analyzing the role of comprehensive spatial development plans for territorial communities, which, starting in 2028, will become mandatory and are intended to ensure the sustainable development of territories. It is stated that the effectiveness of this instrument is hindered by insufficient funding, a shortage of qualified specialists, and the absence of methodological guidelines, which often turn such plans into formal documents without real influence on the spatial policy of communities. The article emphasizes the need to strengthen the institutional capacity of local self-government bodies as key actors in promoting sustainable land use.

Particular attention is paid to the reform of the state land and soil monitoring system. The paper analyzes new legislative acts adopted in 2022-2024 that provide for the establishment of an automated information system for monitoring based on remote sensing of the Earth and artificial intelligence algorithms. These approaches are expected to enhance transparency, scientific validity, and timeliness of management decisions in the field of land protection.

The study concludes that the formalization of the concept of “sustainable land use” should be based on an interdisciplinary approach combining legal, environmental, economic, and technological dimensions. This will transform the theoretical idea of sustainability into a practical management tool essential for the effective restoration, reconstruction, and further development of Ukraine’s territories.

Keywords: sustainable land use; sustainable development; spatial planning; territorial community; land monitoring

Fig.: 1. References: 21.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-462-471](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-462-471)

UDC 004.8:528.94:910.2

**Kostiantyn Oleksandrovych Meteshkin¹, Maksym Anatoliiovych Kukhar²,
Viktoriia Oleksandrivna Shevchenko³, Liubov Oleksiivna Masliy⁴**

¹Doctor in Technical Sciences, Professor of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: meteshkin@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1170-2062>

ResearcherID: [AAG-7092-2021](https://orcid.org/0000-0002-1170-2062). SCOPUS AuthorID: [57214221308](https://orcid.org/0000-0002-1170-2062)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: ppoosshhtaa@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8305-6269>. ResearcherID: [ISR-8853-2023](https://orcid.org/0000-0001-8305-6269)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor

of the Department of Computer Science and Information Systems

Kharkiv National Automobile and Highway University (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: vicashev@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0620-6811>

⁴PhD Student of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: gnomimir@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3844-462X>

EXPERIMENTAL VALIDATION OF THE CREATION OF CONDITIONAL NOOSPHERIC INTELLIGENCE USING GEOINFORMATION MODELING

The aim of this study is to test a model for the formation of conditional noospheric intelligence (CNI) based on data from academic staff of higher education institutions in Ukraine, using methods of mathematical and geoinformation modeling. CNI is considered a complex structure that includes administrative intelligence, integrated intelligence, and the qualification potential of natural intelligence carriers.

The study demonstrates that the qualification potential of academic staff is the foundation for the formation of CNI. The proposed methods and analytical schemes contribute to improving the rating evaluation system of academic staff in universities and to the creation of a prospective cadastral system of intellectual resources.

Keywords: knowledge model; intelligent system; modeling; GIS; noospheric intelligence; experimental method.

Fig.: 1. Table: 2. References: 12.

Urgency of the research. The current stage of scientific and technological progress is characterized by the active development of research in the fields of artificial intelligence (AI) and information technologies that utilize knowledge models. The rapid growth of information volumes and their accelerating increase create conditions that some researchers describe as approaching informational singularity. This necessitates the development of new approaches for the collection, processing, and analysis of large datasets, as well as the integration of knowledge from diverse sources. In response to these challenges, Grid and Smart technologies are evolving, including “smart” devices, buildings, cities, and other complex systems capable of adapting to changing conditions and ensuring efficient resource management. Therefore, this study proposes to examine the potential of an intellectual system representing the scientific capacity of Ukraine.

Target setting. The representation of information evolves as technical capabilities for its collection, processing, and storage improve. With the emergence of artificial intelligence technologies, perceptions of information have also changed. When considering information and data generated by both AI and humans, there remain certain differences and characteristics – human-generated information tends to be more accurate and of higher quality. This gives rise to the problem of transforming and integrating high-quality human-generated information into a unified complex. To address this, it is necessary to develop a coherent structure and classification of such information with reference to its creators.

Actual scientific researches and issues analysis. To form an understanding of the current state of research on the application and development of intelligent systems in education, works [1-5] were analyzed. The features of modeling for studying collective intelligence were examined in works [6-8]. For the analysis of GIS applications in modeling elements of intelligent systems, works [9-10] were reviewed. Relevant source data were obtained from materials [11-12].

Uninvestigated parts of general matters defining. Analysis of previous studies has shown that research on intelligent systems in various human activities has already been conducted. This includes the field of education, which conceptually remains a source of scientific potential for any country. In general, various concepts and models for developing different types of intelligent systems have been proposed. However, a key limitation is that these systems address scientific potential only to solve specific, isolated tasks, without focusing on the source of scientific ideas and solutions for the respective tasks. Moreover, quantitative indicators of the scientific component applied to the formation and functioning of intelligent systems are largely absent.

The research objective. The purpose of this study is to test a model for forming a conditional noospheric intelligence based on data from academic staff of higher education institutions in Ukraine, using methods of mathematical and geoinformation modeling.

The statement of basic materials. This study introduces the term conditional noospheric intelligence (CNI), based on V. I. Vernadsky's concept of the noosphere. CNI is understood as the system's ability to form groups of experts from among academic staff – the intellectual elite of higher education institutions – to solve current scientific, educational, and practical tasks. This process considers their qualifications, experience, competencies, and capacity for collaborative work, allowing for effective knowledge integration and ensuring high-quality decision-making across various fields.

The authors developed a model of conditionally noospheric intelligence, the core of which is implemented in analytical form:

$$M(I^{UN}) = \langle P(Y), I^A, I^B, \overbrace{Q_j^{A*}, Q_h^{BV}}^{\text{сигнатура}}, \subset, T \rangle. \quad (1)$$

where $P(Y)$ – denotes the qualification potential of natural intelligence bearers, determined by the set of multiple intelligence vectors $Y = \{p_i\}$, $i=1,9$;

I^A – represents administrative intelligence, i.e., collective intellectual activity within organizational structures (department, meeting, council, etc.);

I^B – is the integrated (hybrid) intelligence, combining collective intelligence with knowledge models and artificial intelligence to solve weakly structured problems;

Q_j^{A*} – describes the relationships of “being useful for solving tasks within a group of selected academic staff in the core Ω ”;

Q_h^{BV} – denotes the set of relations forming morphism cones within the core Ω for solving complex problems across different subject areas;

$\subset$ – is the inclusion relation, reflecting the formation of the CNI core as a subset of the academic staff universe;

Q_h^{BV} – represents the time axis, illustrating the process of knowledge accumulation, competence formation, and professional growth of academic staff.

Based on the previously obtained research results, the task arises to assess the quality of expert groups forming the core of CNI. Currently, there exist methods for achieving consensus in decision-making, including the Delphi method, decision matrices, and the judgment method, among others. The assessment of these methods' quality is based on the calculation of the Concordance Coefficient, which characterizes the degree of agreement among experts' opinions (expressed as ranks) across a set of criteria.

Unfortunately, this method cannot be fully applied when evaluating collective intelligence, particularly integrated intelligence and, even more so, CNI.

The authors of this study decided to verify specific provisions of I^A formation using their own example – a quantitative assessment of the collective intelligence of the co-authors (Prof. K. O. Meteshkin, Associate Professors M. A. Kukhar and V. O. Shevchenko, and Senior Lecturer L. O. Masliy).

The input data included values of qualification indicators and rules proposed at Kharkiv National University of Municipal Economy named after O. M. Beketov, which reflect all possible outcomes of academic staff member (ASM) intellectual activity and their evaluations.

In the case of the qualification indicators of Professor Kostiantyn Oleksandrovych Meteshkin's intellectual activity, they are tabulated and partially presented in Table 1 in bold font.

Table 1 – Qualification potentials of ASM and their quantitative characteristics

№	Rating Indicator	Quantitative Score (points)	Note
1	2	3	4
K1	Teaching experience	$t_1^r=1; t_2^r=2; t_3^r=3; t_4^r=4.$	Temporary horizons purposefulness professional NPR activities
K2	Academician / Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine	60/40	60 – with training load; 40 – without training load
K3	Laureate of the State awards	50/40	50 with training load; 40 – without training load
K4	Award Winner Cabinet of Ministers of Ukraine	30/20	30 with training load; 20 – without training load
K5	Academician / Corresponding Member (International, non-governmental academy)	20/10	20 with training load; 10 – without training load
K6	Doctor of Science/ Candidate of Science	20/10	20 – doctor; 10 – candidate
K7	Honorable title « Honored» scientist and engineer	20	
K8	of Honor of the President of Ukraine, Cabinet of Ministers of Ukraine	20	
K9	Publication in the reporting period period textbook or manual with the stamp of the Ministries of Education and Science of Ukraine	20/15	20 – textbook; 15 – manual
K9.1	- individual textbook	$20 \times k$ $20 \times 1 = 20$	k – number publications
K9.2	- two authors textbook	$20/2 \times k$	k – number publications
K9.3	- three or more authors	$20/n \times k$	n – number co-authors; k – number publications
K9.4	- individual manual	$15 \times k$	k – number publications
K9.5	- two authors manual	$15/2 \times k$ $7.5 \times 4 = 30$	k – number publications
K9.6	- three or more authors	$15/n \times k$ $15/3 \times 1 = 5$	n – number co-authors; k – number publications
K10	Edition monographs in the reporting period period	20	For each edition
K10.1	- alone	$20 \times k$ $20 \times 4 = 80$	k – number publications
K10.2	- two authors	$10/2 \times k$	k – number publications
K10.3	- three or more authors	$20/n \times k$ $20/4 \times 3 = 15$	n – number co-authors; k – number publications
K11	Scholarship holder (grantee) of the President of Ukraine, Cabinet of Ministers of Ukraine	15	
K12	Awards of the Ministries of Education and Science of Ukraine and others ministries (excellent badge) education, etc.)	10	

End of table 1

1	2	3	4
K13	of Honor from the Ministry of of Education and Science of Ukraine	10	
K14	Member of the State certification commission, expert council of Ministries and of Education and Science of Ukraine	10	
K15	Chairman/ Scientist secretary / member of the special council from protection dissertations	10/7/5×k 5×2=10	10 – Head; 7 – scientist secretary; 5 – member of the special council; k – number special council
K16	Member of the Scientific and Methodological Committee commissions Ukraine	5	
K17	Member of editorial boards		
K17.1	- international magazines	10×k	k – number magazines
K17.2	- national professional journal according to the list of the Higher attestation commission Ukraine	5×k	k – number magazines
K18		10×k 10×4=40	k – number guides / consultations
K19	Leadership earlier protected candidate dissertations, scientific consultancy doctoral dissertations	5/3	5 – patents; 3 - other
K20	Patents / copyrights certificates (other security documents) received in the reporting period period		For each
K20.1	- Articles published in the reporting year period	6	
K20.2	- in journals with an impact factor	4	
K20.3	- in foreign magazines	144	
K20.4	- in journals according to the lists of the Higher attestation commission Ukraine	8	

Source: developed by the authors.

The professional activity of the professor was carried out at three higher education institutions, namely: Kharkiv Military University (KMU), the International Slavic University (ISU), and Kharkiv National University of Urban Economy named after O. M. Beketov. The duration of the professor's intellectual activity exceeds 30 years. He has published over 200 scientific and scientific-methodological works and possesses extensive experience in supervising candidates for academic degrees as well as providing consultation for doctoral students.

Formally, the set of ASM according to the staff schedule of the higher education institution and its organizational structure can be represented as:

$$P_{\text{By3}} = \{P_5^A, P_4^A, P_3, P_2, P_1\}, \quad ((P_1, P_2, P_3) \subset P_4^A) \subset P_5^A, \quad (2)$$

where P_1 – ASMs at the beginning of their careers, holding positions of assistant and lecturer, whose knowledge and intelligence are still in the developmental stage;

P_2 – senior lecturers and associate professors, whose knowledge and intelligence allow them to perform educational-methodical tasks as well as solve research problems with good quality;

P_3 – department professors, whose knowledge and intelligence are highly organized and enable them to solve educational-methodical and scientific problems with high quality;

P_4^A, P_5^A – heads of departments, deans of faculties, doctors and professors, whose knowledge and intelligence allow them to make correct and effective decisions. The superscript «A» denotes that these categories belong to the administration of the higher education institution.

It should be noted that the requirements of the Ministry of Education of Ukraine regarding academic titles and degrees of higher education institution academic staff initially establish certain preferences among teaching positions. Formally, this can be represented as a system of preferences or a career progression system for ASMs.

$$P_5^A > P_4^A > P_3 > P_2 > P_1, \quad (3)$$

where the symbol “>” denotes the preference relation of ASMs for a particular position.

The question arises as to which indicators can be used to evaluate the effectiveness of a professor's intellectual activity over different time horizons of their professional career. In our view, one such indicator may be the qualification potential of an ASM, which takes into account the history of their intellectual activity.

The input data for constructing its utility function and determining the qualification potential realized by the professor at Kharkiv National University of Urban Economy named after O. M. Beketov may include a list of published scientific and methodological works, as well as information from the human resources department regarding the professor's personal achievements.

Thus, the analysis of this data showed that the utility function of the professor's intellectual activity over the entire professional career, i.e., over the interval $[0, t_4^r]$ takes the form:

$$Q[0, t_4^r] \rightarrow (K_1 > K_6 > K_9 > K_{10} > K_{15} > K_{18} > K_{20}), \quad (3)$$

Let us decompose the preference system (2) according to the highlighted intervals and determine the qualification potential for each of them:

$$Q[0, t_1^r] \rightarrow (K_1^1(2) > K_9^2(2) > K_{20.4}^3(1)). \quad (4)$$

At the beginning of their professional career, during the interval $[0, t_1^r]$ years, the ASM co-authored two educational manuals and published three articles in scientific professional journals.

Then it can be written as $\sum_i^j \check{K}(n) = 7$, where $\check{K}$ denotes the total qualification potential realized during the initial interval of professional activity, i – is the indicator number in Table 1, j – is the total number of indicators, and nnn is the score for a single indicator. The total score characterizing the qualification of the ASM over the time interval $[0, t_1^r]$ is equal to 7.

Similarly, utility functions will be constructed for the intervals $[t_1^r, t_2^r)$ and $[t_2^r, t_3^r)$. They will take the following form:

$$Q[t_1^r, t_2^r) \rightarrow (K_1^1(2) > K_{9.6}^1(2) > (K_{20.4}^7(1))); \sum_i^j \check{K}(n) = 11, \quad (5)$$

$$Q[t_2^r, t_3^r) \rightarrow (K_1^1(3) > (K_{10.1}^{20}(1) + K_{10.3}^5(1)) > ((K_{20.4}^1(6) + K_{20.3}^2(28))), \sum_i^j \check{K}(n) = 90. \quad (6)$$

In formulas (5) and (6), $\check{K}$ and $\check{K}$ denote the total qualification potentials realized by the ASM over the intervals $[t_1^r, t_2^r)$ and $[t_2^r, t_3^r)$ respectively.

The utility function for the fourth interval will take the following form:

$$\begin{aligned} Q[t_3^r, t_4^r] \rightarrow \\ \rightarrow K_1^1(4) > K_6^1(20) \\ \left(\begin{aligned} &> (K_{9.1}^1(20) + K_{9.5}^5(5) + K_{9.6}^2(2)) > (K_{10.1}^{20}(3) + K_{10.2}^1(10) + K_{10.3}^4(5)) > \\ &> K_{15}^2(5) > K_{18}^4(10) > ((K_{20.3}^{72}(2) + K_{20.4}^8(1) \end{aligned} \right), \quad (7) \end{aligned}$$

the total score characterizing the qualification potential of the ASM over the interval $[t_3^r, t_4^r]$ will be equal to $\sum_i^j \check{K}(n) = 365$.

By analogy, we calculate the total qualification potential of Associate Professor M. A. Kukhar.

The professional activity of Associate Professor Maksym Anatoliyovych Kukhar began at Kharkiv National University of Urban Economy named after O. M. Beketov. The duration of his intellectual activity is 5 years. He has published over 49 scientific and scientific-methodological works.

The utility function of the intellectual activity of the associate professor over his entire professional career, i.e., for M. A. Kukhar, over the interval $[0, t_2^r]$ according to the data in Table 1, takes the following form:

$$Q[0, t_2^r] \rightarrow (K_1 > K_6 > K_{10} > K_{20}), \quad (8)$$

$$Q[0, t_1^r] \rightarrow (K_1^1(1) > K_6^1(10) > K_{10.3}^1(6) > K_{20.3}^{10}(1)), \quad (9)$$

$$Q[t_1^r, t_2^r] \rightarrow (K_1^1(2) > K_6^1(10) > K_{10.3}^1(5) > (K_{20.1}^3(1) + K_{20.3}^{12}(1) + K_{20.4}^1(1))). \quad (10)$$

The total score characterizing the qualification of the ASM over the time interval $[t_1^r, t_2^r]$ is $\sum_i^j \check{K}(n) = 33$.

The total score characterizing the qualification potential of the ASM over the entire period $[t_1^r, t_2^r]$ is $\sum_i^j \hat{K}(n) = 60$.

The professional activity of Associate Professor Viktoriya Oleksandrivna Shevchenko began at Kharkiv National Automobile and Highway University. The duration of her intellectual activity is 26 years. During this time, V. O. Shevchenko has published over 78 scientific and scientific-methodological works.

The utility function of the intellectual activity of Associate Professor V. O. Shevchenko over her entire professional career, i.e., over the interval $[0, t_4^r]$, according to the data in Table 1, takes the following form:

$$Q[0, t_4^r] \rightarrow (K_1 > K_6 > K_9 > K_{10} > K_{19} > K_{20}), \quad (11)$$

$$Q[0, t_1^r] \rightarrow (K_1^1(1) > K_{20.4}^1(1)), \quad (12)$$

$$Q[t_1^r, t_2^r] \rightarrow (K_1^1(2) > (K_{20.3}^1(1) + K_{20.4}^1(1))), \quad (13)$$

$$Q[t_2^r, t_3^r] \rightarrow \left(K_1^1(3) > K_6^1(10) > K_{9.3}^1(3) > K_{10.3}^1(4) > (K_{20.2}^1(1) + K_{20.3}^{22}(1) + K_{20.4}^{30}(1)) \right), \quad (14)$$

$$Q[t_3^r, t_4^r] \rightarrow \left(K_1^1(4) > K_{10.3}^1(4) > K_{19}^3(5) > (K_{20.1}^2(1) + K_{20.3}^2(1) + K_{20.4}^{17}(1)) \right). \quad (15)$$

The total score characterizing the qualification of the ASM over the time interval $[t_3^r, t_4^r]$ is $\sum_i^j \check{K}(n) = 44$.

The total score characterizing the qualification potential of the ASM over the entire period $[t_1^r, t_4^r]$ is $\sum_i^j \hat{K}(n) = 123$.

The professional activity of Senior Lecturer Liubov Oleksiivna Masliy began at Kharkiv National University of Urban Economy named after O. M. Beketov on April 1, 2014, in the position of laboratory assistant in the Department of Land Administration and GIS, where in the same year, in the autumn, she was additionally appointed as an assistant on a part-time basis. The duration of her intellectual activity exceeds 10 years. She has published over 35 scientific and scientific-methodological works.

The utility function of the intellectual activity of the senior lecturer over her entire professional career, i.e., over the interval $[0, t_3^r]$, according to the data in Table 1, takes the following form:

$$Q[0, t_2^r] \rightarrow (K_1 > K_9 > K_{10} > K_{20}), \quad (16)$$

$$Q[0, t_1^r] \rightarrow (K_1^1(1) > K_{10.3}^1(1) > K_{20.4}^1(1)), \quad (17)$$

$$Q[t_1^r, t_2^r] \rightarrow (K_1^1(2) > K_{9.6}^1(5) > K_{10.3}^3(1) > (K_{20.1}^2(3) + K_{20.3}^8(2))), \quad (18)$$

$$Q[t_2^r, t_3^r] \rightarrow (K_1^1(3) > K_{20.3}^4(2)). \quad (19)$$

The total score characterizing the qualification of the ASM over the time interval $[t_2^r, t_3^r]$ is $\sum_i^j \check{K}(n) = 11$.

The total score characterizing the qualification potential of the ASM over the entire period $[t_1^r, t_2^r, t_3^r]$ is $\sum_i^j \hat{K}(n) = 46$.

The obtained results are summarized in Table 2.

Table 2 – Quantitative assessments of the total qualification potentials of collective intelligence (TQPCI)

Full Name (F. M. L.)	$\sum_i^j \bar{K}(n)$	$\sum_i^j \bar{R}(n)$	$\mathbf{Y}$
Meteshkin K. O.	90	365	$\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_3, \vec{\rho}_4, \vec{\rho}_5, \vec{\rho}_6, \vec{\rho}_7, \vec{\rho}_9$
Kukhar M. A.	33	60	$\vec{\rho}_3, \vec{\rho}_4, \vec{\rho}_6$
Shevchenko V. O.	44	123	$\vec{\rho}_3, \vec{\rho}_4, \vec{\rho}_5, \vec{\rho}_6, \vec{\rho}_8$
Masliy L. O.	11	46	$\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_3, \vec{\rho}_9$
$\mathbf{I}^A$	178	594	$\forall \vec{\rho}_1, \neg \vec{\rho}_2,$

Source: developed by the authors.

Table 2 presents data characterizing the collective intelligence $\mathbf{I}^A$ of the group, in this case, the co-authors of this article. It shows the total coefficients that represent the qualification potential of the group (the collective of co-authors). This composition cannot be considered an expert group, as it includes only one expert.

Analyzing the collective intelligence of this group, we find that the set $\mathbf{Y}$ is incomplete, and the group of co-authors lacks a bearer of natural intelligence with the properties $\vec{\rho}_2$. However, the scientific and educational focus on the study of cadastral systems does not require musical abilities from the authors, and this can be neglected. This fact is indicated in Table 2 by the relation $\forall \vec{\rho}_1, \neg \vec{\rho}_2$.

For a clearer understanding of this approach, it is possible to visualize the TQPCI (Total Qualification Potential of Collective Intelligence) across Ukraine. Conditionally, we assume the average TQPCI of a Doctor of Sciences is 365, of a Candidate of Sciences $(60 + 123) / 2 = 91$ and for those without an academic degree, 46. As of early 2024, in the Unified State Electronic Database, there was presented 82091 academic staff members, 86,2 % of whom hold academic degrees: 20,4 % are Doctors of Sciences, 65,8 % are Philosophiae Doctor Candidates of Sciences, and 13,8 % have no academic degree. According to the registry of educational institutions in Ukraine, there are currently 519 higher education institutions (HEIs).

The conditional number of academic staff per HEI is $82091 / 519 \approx 158$, including 32 Doctors of Sciences, 104 Candidates of Sciences, and 22 without an academic degree. Accordingly, the TQPCI per HEI is calculated as: $32365 + 10491 + 2246 = 22156$.

Based on these data, a QGIS model of the TQPCI distribution across Ukrainian HEIs was created (Fig. 1).

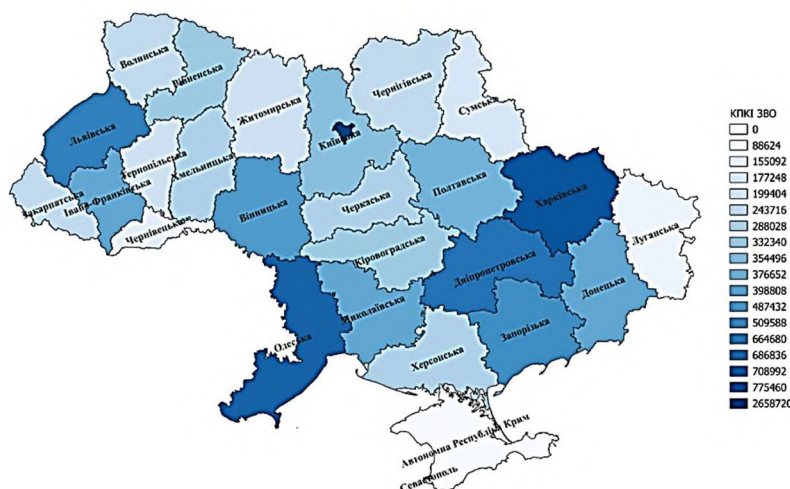


Fig. 1. Model of TQPCI Distribution by Number of HEIs and ASM in Ukraine
Source: developed by the authors.

These data are relevant and approximate to reality according to the experiment and open sources of the Ministry of Education. They reflect variations in scientific outcomes across HEIs depending on the composition of academic staff. However, these studies require a larger dataset to represent a complete and reliable model, taking into account not the average experimental indicator, but relevant data from various academic staff members.

Conclusions. In this study, the qualification potential of academic staff is presented for the first time as an element of conditional noospheric intelligence in a quantitative form. A model has been developed that integrates mathematical and geoinformation modeling methods, enabling the visualization and evaluation of the collective intellectual potential of higher education institutions across Ukraine. The model was tested, and quantitative indicators of the authors' qualification potential were established. Based on these indicators, a GIS-based model of the qualification potentials of the collective intelligence of Ukraine's regions was constructed.

References

1. Meteshkin, K. O., & Kukhar, M. A. (2022). Stvorennia uzahalnenoї modeli navchalno-metodychnoho zabezpechennia v systemi "Rozumnyi zaklad vyshchoї osvity" na prykladi spetsialnosti 193 "Heodeziia ta zemleustrii" [Creation of generalized model of educational and methodological support in the system "Smart institution of higher education" on the example of specialty 193 "Geodesy and land management"]. *Komunalne hospodarstvo mist – Communal economy of cities*, 3(170), 234-238. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-3-170-234-238>.
2. Meteshkin, K. O., & Kukhar, M. A. (2022). Formalizatsiia protsesiv i yavyshev v systemi "Rozumnyi zaklad vyshchoї osvity" na prykladi spetsialnosti 193 "Heodeziia ta zemleustrii" [Formalization of processes and phenomena in the system "Smart institution of higher education" on the example of specialty 193 "Geodesy and land management"]. *Komunalne hospodarstvo mist Communal economy of cities*, 3(170), 239-246. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-3-170-239-246>.
3. Zhang, K., & Aslan, A. B. (2021). AI technologies for education: Recent research & future directions. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 2, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2021.100025>.
4. Lin, C.-C., Huang, A. Y. Q., & Lu, O. H. T. (2023). Artificial intelligence in intelligent tutoring systems toward sustainable education: A systematic review. *Smart Learning Environments*, 10(41), 1-22. <https://doi.org/10.1186/s40561-023-00260-y>.
5. Zawacki-Richter, O., Marín, V. I., Bond, M., & Gouverneur, F. (2019). Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – Where are the educators? *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 16(39), 1-27. <https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0>.
6. Mamonov, K., Kukhar, M., Shterndok, E., & Kamchatna, S. (2023). Standardization of geodetic data for determination of boundaries of natural reserve areas. *E3S Web of Conferences*, 452, 1-13. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345203001>.
7. Valeeva, R., Biktagirova, G., Lesev, V., Mikhailenko, O., Skudareva, G., & Valentovinis, A. (2023). Exploring the impact of modeling in science education: A systematic review. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 19(6), 1-22. <https://doi.org/10.29333/ejmste/13268>.
8. Zhang, W., & Mei, H. (2020). A constructive model for collective intelligence. *National Science Review*, 7(8), 1273-1277. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa092>.
9. Vinueza-Martinez, J., Correa-Peralta, M., Ramirez-Anormaliza, R., Franco Arias, O., & Vera Paredes, D. (2024). Geographic information systems (GISs) based on WebGIS architecture: Bibliometric analysis of the current status and research trends. *Sustainability*, 16(15), 1-37. <https://doi.org/10.3390/su16156439>.
10. Kukhar, M. A., & Horoshanskyi, T. S. (2025). Suchasnyi pidkhid do vyrishennia zadach zboru ta analizu prostorovoi informatsii [Modern approach to solving problems of spatial information collection and analysis]. *Komunalne hospodarstvo mist – Communal economy of cities*, 3(191), 401-407. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-401-407>.

11. Register of educational activity entities: Higher education institutions. (n.d.). Yedyna derzhavna elektron-na baza z pytan osvity [Unified State Electronic Database on Education]. https://registry.edbo.gov.ua/?utm_source.

12. Report on the quality of higher education in Ukraine, its compliance with the tasks of sustainable innovative development of society in 2023. (2023). Natsionalne ahentstvo iz zabezpechennia yakosti vyshchoi osvity [National Agency for Higher Education Quality Assurance]. https://naqa.gov.ua/wp-content/uploads/2024/05/Доповідь-2023-року.pdf?utm_source.

Список використаних джерел

1. Метешкін, К. О., Кухар, М. А. (2022). Створення узагальненої моделі навчально-методичного забезпечення в системі «Розумний заклад вищої освіти» на прикладі спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій». *Комунальне господарство міст*, 3(170), 234-238. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-3-170-234-238>.
2. Метешкін, К. О., Кухар, М. А. (2022). Формалізація процесів і явищ в системі «розумний заклад вищої освіти» на прикладі спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій». *Комунальне господарство міст*, 3(170), 239-246. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-3-170-239-246>.
3. Zhang, K., Aslan, A. B. (2021). AI technologies for education: Recent research & future directions. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 2, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2021.100025>.
4. Lin, C.-C., Huang, A. Y. Q., Lu, O. H. T. (2023). Artificial intelligence in intelligent tutoring systems toward sustainable education: a systematic review. *Smart Learning Environments*, 10(41), 1-22. <https://doi.org/10.1186/s40561-023-00260-y>.
5. Zawacki-Richter, O., Marín, V. I., Bond, M., Gouverneur, F. (2019). Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – where are the educators? *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 16(39), 1-27. <https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0>.
6. Mamonov, K., Kukhar, M., Shterndok, E., Kamchatna, S. (2023). Standardization of geodetic data for determination of boundaries of natural reserve areas. *E3S Web of Conferences*, 452, 1-13. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345203001>.
7. Valeeva, R., Biktagirova, G., Lesev, V., Mikhailenko, O., Skudareva, G., Valentovinis, A. (2023). Exploring the impact of modeling in science education: A systematic review. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 19(6), 1-22. <https://doi.org/10.29333/ejmste/13268>.
8. Zhang, W., Mei, H. (2020). A constructive model for collective intelligence. *National Science Review*, 7(8), 1273-1277. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa092>.
9. Vinueza-Martinez J., Correa-Peralta M., Ramirez-Anormaliza R., Franco Arias O., Vera Paredes D. (2024) Geographic Information Systems (GISs) Based on WebGIS Architecture: Bibliometric Analysis of the Current Status and Research Trends. *Sustainability*, 16(15), 1-37. <https://doi.org/10.3390/su16156439>.
10. Кухар, М. А., Горошанський, Т. С. (2025). Сучасний підхід до вирішення задач збору та аналізу просторової інформації *Комунальне господарство міст*, 3(191), 401-407. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-401-407>.
11. Реєстр суб'єктів освітньої діяльності: заклади вищої освіти. Єдина державна електронна база з питань освіти. https://registry.edbo.gov.ua/?utm_source.
12. Доповідь про якість вищої освіти в Україні, її відповідність завданням сталого інноваційного розвитку суспільства у 2023 році. Національне агентство із забезпечення якості вищої освіти. https://naqa.gov.ua/wp-content/uploads/2024/05/Доповідь-2023-року.pdf?utm_source.

Отримано 20.09.2025

**Костянтин Олександрович Метешкін¹, Максим Анатолійович Кухар²,
Вікторія Олександрівна Шевченко³, Любов Олексіївна Маслій⁴**

¹доктор технічних наук, професор, професор кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)

E-mail: meteshkin@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1170-2062>. **ResearcherID:** AAG-7092-2021

²кандидат технічних наук, доцент кафедри Земельного адміністрування та геоінформаційних систем,
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)

E-mail: ppoosshhtaa@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8305-6269>

ResearcherID: ISR-8853-2023. **SCOPUS AuthorID:** 57214221308

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук і інформаційних систем
Харківський національний автомобільно-дорожній університет (Харків, Україна)

E-mail: vicashev@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0620-6811>

⁴аспірант кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)

E-mail: gnomomir@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3844-462X>

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО СТВОРЕННЯ
УМОВНОГО НООСФЕРНОГО ІНТЕЛЕКТУ
ЗА ДОПОМОГОЮ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

Метою цього дослідження є апробація та верифікація моделі формування умовно-ноосферного інтелекту на основі даних науково-педагогічних працівників закладів вищої освіти України із застосуванням методів математичного та геоінформаційного моделювання. Методологічна основа дослідження передбачає комплексний науковий підхід, який інтегрує методи моделювання, аналізу, синтезу, логічного узагальнення та емпіричні методи, що забезпечує всебічне вивчення динаміки та потенціалу колективних інтелектуальних ресурсів. Джерелами дослідження виступають результати наукової діяльності авторів та відкриті дані Міністерства освіти України.

У цій роботі вводиться термін «умовно-ноосферний інтелект» (УНІ), який базується на концепції ноосфери В. І. Вернадського. Під УНІ розуміється здатність системи формувати групи експертів із числа науково-педагогічних працівників (НПП) – інтелектуальної еліти ВНЗ – для вирішення актуальних наукових, освітніх та практичних завдань сучасності. Базуючись на цьому, авторами була розроблена модель формування умовно-ноосферного інтелекту.

Для верифікації моделі проведено кількісну оцінку колективного інтелекту співавторів дослідження з урахуванням їхніх кваліфікаційних показників, професійного досвіду та наукових здобутків. Використано функції корисності інтелектуальної діяльності на різних часових інтервалах, що дозволило визначити сумарний кваліфікаційний потенціал групи та оцінити ефективність колективного інтелекту. Аналіз показав, що не всі властивості природного інтелекту були повністю представлені в групі, проте специфіка досліджень у галузі кадастрових систем дозволяє вважати це обмеження несуттєвим для цілей роботи.

На основі отриманих даних створено геоінформаційну модель розподілу кваліфікаційного потенціалу колективного інтелекту по закладах вищої освіти України. Модель демонструє вплив складу науково-педагогічних працівників на наукові результати закладів, дозволяє оцінити потенціал колективного інтелекту на рівні установи та забезпечує основу для прийняття управлінських рішень щодо розвитку інтелектуальних ресурсів.

Дослідження показує, що кваліфікаційний потенціал науково-педагогічних працівників є фундаментом формування умовно-ноосферного інтелекту. Запропоновані методи та аналітичні схеми сприяють удосконаленню системи рейтингової оцінки науково-педагогічних працівників, створенню перспективної кадастрової системи інтелектуальних ресурсів, а також можуть бути адаптовані для використання в інших сферах науково-педагогічної та організаційної діяльності. Це підкреслює практичну значущість дослідження для підвищення ефективності управління знаннями та оптимізації використання людського капіталу у вищій освіті та суміжних сферах.

Ключові слова: модель знань; інтелектуальна система; ноосферний інтелект; геоінформаційне моделювання; ГІС.

Табл.: 2. Рис.: 1. Бібл.: 12.

Олексій Сергійович Васильєв¹, Володимир Павлович Кулай²

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, Україна)

E-mail: a.s.vasiliev.76@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9914-5482>

²аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, Україна)

E-mail: lykym339@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-4990-5336>

АНАЛІЗ НЕОБХІДНОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ПРИВЕДЕННЯ В РУХ ЛОПАТЕЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ НІЗДРЮВАТИХ БЕТОНІВ

В умовах інтенсивного розвитку будівельних технологій і зростання вимог до енергоефективності та якості виробництва будівельних матеріалів, зокрема пінобетону, актуальним постає завдання вдосконалення конструкцій змішувального обладнання. У статті представлено теоретичне дослідження процесу роботи змішувача та визначення потужності, необхідної для приведення в рух робочого органу мобільної бетонозмішувальної установки примусової дії. Проведено аналіз конструктивних параметрів змішувача та геометрії лопатей. Визначено основні складові загальної потужності: енерговитрати на формування і підтримання вихрового руху суміші, а також потужність, необхідна для подолання опору середовища при русі лопатей. Отримані результати дозволяють оцінити вплив конструкції та кінематичних параметрів на енергоспоживання. Обґрунтовано підходи до вибору приводу та підвищення ефективності роботи мобільних бетонозмішувальних установок. Особливу увагу приділено характеристикам пускового режиму, оскільки саме в цей момент спостерігається максимальне навантаження на привід. Аналітичні залежності можуть бути використані на етапі проектування для оптимізації геометрії робочих органів і вибору енергоощадного режиму роботи.

Ключові слова: потужність приводу; лопать; змішування; бетонозмішувач примусової дії; енергія руху; енергоефективність.

Рис.: 3. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. В умовах сучасного розвитку будівельних технологій та зростання вимог до якості й енергоефективності виробництва будівельних матеріалів, зокрема ніздрюватих бетонів, актуалізується необхідність удосконалення змішувального обладнання [1]. Таке обладнання має забезпечувати однорідність та стабільність рецептур навіть при змішуванні складних за структурою та текучістю сумішей. Особливої уваги потребують мобільні змішувачі примусової дії, які повинні відповідати критеріям компактності, технологічної гнучкості та енергоефективності. Значна частина енергоспоживання такого обладнання припадає на потужність, необхідну для приводу робочого органу – лопатей. З огляду на те, що геометрія лопатей, їх кількість, кут нахилу, а також кінематичні параметри безпосередньо впливають на ефективність перемішування та опір змішувального середовища, визначення раціональної потужності приводу є одним із ключових етапів проектування [2]. Недостатня або надлишкова потужність може призвести до неефективного перемішування або перевитрати енергії, що є критично важливим в умовах мобільного використання установки.

Постановка проблеми. У межах цього дослідження розглядається мобільний бетонозмішувач примусової дії. Процес проектування змішувальних пристроїв такого типу передбачає не лише дотримання умов, необхідних для забезпечення високої інтенсивності перемішування компонентів, але й створення конструкції, здатної ефективно функціонувати з розчинними сумішами різної консистенції та широкого діапазону гранулометричного складу. Одним із важливих завдань під час проектування таких пристроїв є визначення потужності, необхідної для приведення в рух лопатей змішувача. Витрата енергії безпосередньо залежить від фізико-технологічних властивостей оброблюваного середовища, геометричних параметрів змішувача, а також режиму його роботи. Надмірна потужність приводу призводить до перевитрати енергії та збільшення вартості обладнання, тоді як її недостатність спричиняє зниження ефективності

перемішування й неоднорідність структури суміші. У зв'язку з цим постає науково-практичне завдання: розробити підхід до теоретичного визначення потужності, необхідної для приводу робочого органу мобільного бетонозмішувача з урахуванням впливу фізико-механічних властивостей суміші, кінематики руху лопатей і конструктивних особливостей змішувача.

Аналіз останніх джерел досліджень. На сучасному етапі розвитку технологій у галузі виробництва сухих будівельних сумішей одним із найбільш актуальних завдань є створення високоефективних змішувачів удосконаленої конструкції [3; 4]. Основними вимогами до таких установок є зниження енерговитрат при одночасному розширенні номенклатури одержуваної продукції та забезпеченні високої якості змішування.

Процес перемішування сипких матеріалів являє собою складне механіко-технологічне явище, ефективність якого значною мірою визначається конструктивними особливостями змішувального обладнання [5; 6]. При аналізі типів змішувачів з позицій кінематики робочих органів та гідродинаміки потоку перспективними є установки примусової дії, які створюють інтенсивний вплив на змішувану масу. Особливий інтерес становлять змішувачі з вертикальним розташуванням валу, в яких забезпечується інтенсивна взаємодія робочих органів із матеріалом завдяки створенню зон зниженого опору переміщенню частинок. У таких зонах виникає ефект псевдозрідження порошкоподібної маси, що сприяє активізації перемішувального процесу. За рахунок цього досягається підвищена однорідність багатокомпонентних сумішей, зокрема таких, що мають складну рецептуру або низьку текучість [7; 8].

Аналіз науково-технічної літератури, патентної документації [9, 10] та результатів експериментальних досліджень показує, що змішувачі з вертикально орієнтованим валом демонструють підвищену ефективність при виготовленні сухих будівельних сумішей, включаючи модифіковані композиції із заданими фізико-механічними властивостями [11].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Витрата потужності на етапі запуску бетонозмішувачів є важливим техніко-економічним показником, що безпосередньо впливає на енергоефективність роботи обладнання та його експлуатаційну надійність. Встановлення закономірностей між геометрією робочих органів, властивостями змішуваного середовища та енергетичними витратами при пуску дозволяє розширити знання про конструкцію пристрою з метою зменшення пускових навантажень і підвищення його ефективності.

Мета статті – теоретичне дослідження силової взаємодії робочого органу розробленого мобільного бетонозмішувача примусової дії з розчинною сумішшю. У межах дослідження виконано аналіз кінематичних характеристик змішувача та визначено потужність, необхідну для приведення в рух його лопатей з урахуванням фізико-механічних властивостей оброблюваного середовища та геометричних параметрів робочих елементів.

Виклад основного матеріалу. Для проведення комплексного аналізу дії мобільного бетонозмішувача примусової дії, зображеного на рис. 1, призначеного для приготування компонентів під час виробництва пінобетону необхідно враховувати конструктивні особливості робочого органу та умови його взаємодії з матеріалом, що змішується. Принцип роботи такого змішувача ґрунтується на обертанні лопатей, закріплених на вертикальному приводному валу в нижній частині змішувальної камери. Під час обертання лопаті здійснюють інтенсивний механічний вплив на суміш, забезпечуючи рівномірний розподіл компонентів у всьому об'ємі робочої зони.

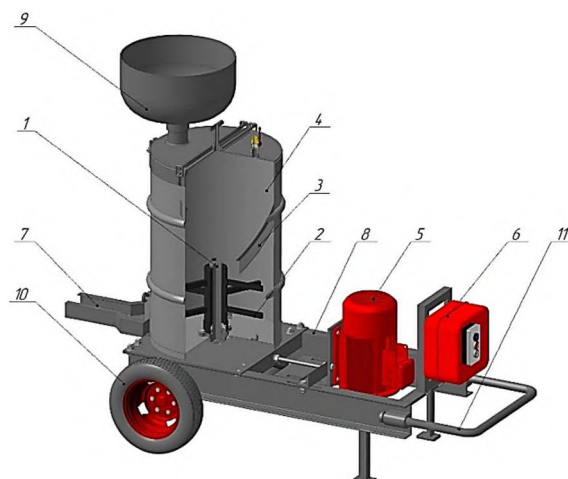


Рис. 1. Мобільний бетонозмішувача примусової дії:

1 – вертикальний вал; 2 – рухомі лопатки; 3 – зовнішня стрічка; 4 – змішувальний контейнер; 5 – електродвигун; 6 – пульт керування; 7 – вивантажувальний жолоб; 8 – рама; 9 – засипний отвір; 10 – колеса; 11 – ручка

З метою забезпечення раціонального вибору конструктивних і кінематичних параметрів бетонозмішувача, а також зниження енерговитрат у процесі приготування будівельних сумішей, виникає необхідність у визначенні потужності, що витрачається на перемішування частинок у робочому об'ємі змішувача для приготування ніздрюватих бетонів.

Загальна потужність P мобільного бетонозмішувача примусової дії, яка необхідна для змішування частинок матеріалу, складається з потужності, що витрачається на підтримку швидкісного режиму суміші в зоні вихрового руху $P_{ш.р.}$, та потужності, що витрачається на подолання сил опору руху лопаті $P_{о.р.л.}$.

Загальна потужність P мобільного бетонозмішувача визначається:

$$P = P_{ш.р.} + P_{о.р.л.}, \quad (1)$$

де $P_{ш.р.}$ – потужність, що витрачається на підтримку швидкісного режиму суміші;

$P_{о.р.л.}$ – потужність, що витрачається на подолання сил опору руху лопаті.

Для обчислення спожитої потужності на підтримку швидкісного режиму суміші в зоні вихрового руху $P_{ш.р.}$ створюємо розрахункову схему, яку зображено на рис. 2, та визначимо енергію вихрового E руху в зоні вирви:

$$E = 2 \cdot \pi \cdot c \cdot a_0^2 \cdot (h_{max} - h_{min}) \int_{\pi}^{R_{max}} \left(\frac{d\delta}{dr} \right)^2 r dr, \quad (2)$$

де h_{max} – максимальна висота підйому матеріалу в бункері;

h_{min} – глибина утвореної воронки;

a_0 – положення вектора швидкості;

δ – кут нахилу вектора швидкості;

c – коефіцієнт, який приймаємо відповідно до теоретичних досліджень, прийняти рівним:

$$c = \frac{m}{R_0}, \quad (3)$$

де m – маса матеріалу який бере участь у вихровому русі;

R_0 – радіус утворений у верхній частині воронки.

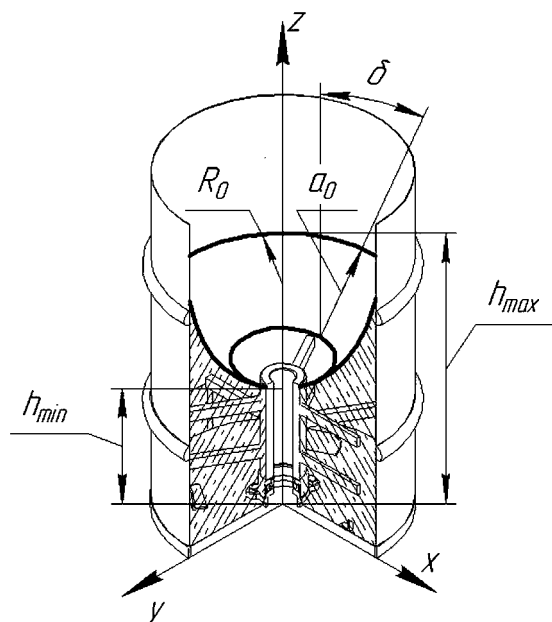


Рис. 2. Схема розрахунку воронки

Після перетворень та розв'язку рівнянь отримуємо рівняння у вигляді:

$$E = 2\pi \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot V_{вих}}{k} \cdot \frac{(h_{max} - h_{min})}{R_0} \cdot a_0^2. \quad (4)$$

Обсяг матеріалу, що бере участь у вихровому русі матеріалу $V_{вих}$, визначається таким співвідношенням:

$$V_{вих} = \pi \cdot R_k^2 \cdot (h_{max} - h_{min}) - V_v. \quad (5)$$

Підставивши (5) приводимо рівняння (4) до співвідношення:

$$E = 2\pi \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot V_{вих}}{k} \cdot \frac{(h_{max} - h_{min})}{R_0} \cdot \left[\omega^2 \cdot L^2 \cdot \left(1 + \frac{I}{4 \cdot \mu^2} \right) - 2 \cdot g \cdot h_{min} \right]. \quad (6)$$

Використовуючи співвідношення (6), знаходимо вираз для величини потужності $P_{ш.р.}$, необхідної для підтримки вихрового руху частинок суміші при високошвидкісному змішуванні:

$$P_{ш.р.} = 2\pi \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot V_{вих}}{k} \cdot \frac{(h_{max} - h_{min})}{R_0} \cdot \omega \cdot \left[\omega^2 \cdot L^2 \cdot \left(1 + \frac{I}{4 \cdot \mu^2} \right) - 2 \cdot g \cdot h_{min} \right]. \quad (7)$$

Таким чином, отримане співвідношення (6) визначає значення потужності, яку необхідно витратити на підтримку вихрового руху частинок суміші.

Потужність $P_{о.р.л.}$, необхідна для подолання сил опору руху лопаті змішувача, буде складатися з потужності $P_{т.м.}$, яка витрачається на подолання сили опору тиску матеріалу суміші на поверхню лопаті, $P_{т.н.}$, що витрачається на подолання сили опору тертя по внутрішній бічній поверхні циліндричного корпусу внаслідок відцентрової сили $F_{від}$, $P_{з.с.}$ витрачається на подолання опору зсуву суміші матеріалу щодо суміші, розташованої над лопатою, $P_{т.к.}$.

потужності на подолання опору тертя по основі циліндричного корпусу при переміщенні лопатою матеріалу:

$$P_{o.p.l.} = P_{m.m.} + P_{m.n.} + P_{з.с.} + P_{m.к.} . \quad (8)$$

Обчислимо масу матеріалу суміші m_m , що переміщується лопатою в циліндричному контейнері:

$$m_m = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0}{k} \cdot h \cdot \cos \alpha \cdot L^2 , \quad (9)$$

де h – висота лопаті;

ε_0 – початкове значення щільності матеріалу;

k – коефіцієнт розпушеності суміші;

α – кут відхилення лопаті від вертикалі.

Для обчислення потужності $P_{m.m.}$ звернемося до розрахункової схеми, представленої на рис. 3. З урахуванням представленої схеми знаходимо:

$$T \cdot \sin \alpha = m_m \cdot g , \quad (10)$$

де T – величина сили тиску, що надається на лопату матеріалом, що переміщується.

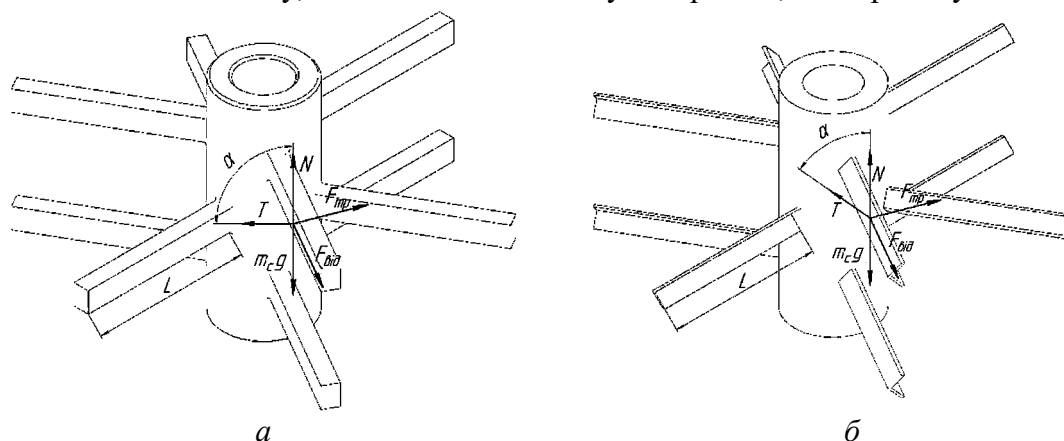


Рис. 3. Розрахункова схема до визначення сил, що діють на лопату:

а – робочий орган мобільної установки у вигляді лопаті прямокутного перерізу;

б – робочий орган мобільної установки у вигляді лопаті трикутного перерізу

Значення потужності $P_{m.m.}$ визначатиметься таким співвідношенням:

$$P_{m.m.} = \mu \cdot T \cdot v_{с.м} = \frac{\mu \cdot m_m \cdot g}{\sin \alpha} \cdot v_{с.м.} \quad (11)$$

де μ – коефіцієнт тертя частинок матеріалу по лопаті;

$v_{с.м}$ – величина швидкості сходження матеріалу з лопаті змішувача в радіальному напрямку:

$$v_{с.м} = \frac{\omega_0 \cdot L}{2 \cdot \mu} , \quad (12)$$

де ω_0 – частота обертання матеріалу суміші;

L – довжина лопаті.

Після перетворень отримуємо:

$$P_{m.m} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0}{2 \cdot k} \cdot h \cdot L^3 \cdot \omega_0 \cdot g \cdot \operatorname{ctg} \alpha. \quad (13)$$

Величина потужності $P_{m.n.}$ буде визначатись таким співвідношенням:

$$P_{m.n} = \mu_0 \cdot F_{\text{від}} \cdot \omega_0 \cdot L. \quad (14)$$

Відцентрова сила $F_{\text{від}}$ буде визначатись:

$$F_{\text{від}} = \frac{m_m \cdot \omega_0^2 \cdot L^2}{L} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0}{k} \cdot h \cdot L^3 \cdot \omega_0^2 \cdot \cos \alpha. \quad (15)$$

З урахуванням (15) формула (14) приймає такий вигляд:

$$P_{m.n.} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \mu}{k} \cdot h \cdot L^3 \cdot \omega_0^3 \cdot \cos \alpha. \quad (16)$$

Величину дотичних напружень $\tau(r)$, що виникають у сипучому матеріалі на відстані від осі обертання знаходимо за формулою:

$$\tau(r) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot g}{k} \cdot r. \quad (17)$$

Тоді величина сили опору зсуву F_τ матеріалу лопаттю дорівнюватиме:

$$F_\tau = h \cdot L \cdot \cos \alpha \cdot \tau(r) = \frac{L \cdot h \cdot \varepsilon_0 \cdot g}{2k} \cos \alpha \cdot r. \quad (18)$$

Величина роботи $A_{3.c.}$, яка потрібна на подолання опору сили (17), визначатиметься співвідношенням:

$$A_{3.c.} = \int_0^L F_\tau dr = \frac{L \cdot h \cdot \varepsilon_0 \cdot g}{4 \cdot k} \cdot L^2 \cdot \cos \alpha. \quad (19)$$

На підставі (19) знаходимо вираз, що визначає значення потужності $P_{3.c.}$:

$$P_{3.c.} = A_{3.c.} \cdot \omega_0 = \frac{L \cdot h \cdot \varepsilon_0 \cdot g \cdot \omega_0}{4 \cdot k} \cdot L^2 \cdot \cos \alpha. \quad (20)$$

Величину потужності $P_{m.k.}$ знайдемо відповідно до співвідношення:

$$P_{m.k.} = \mu \cdot m_m \cdot g \cdot \bar{v}_{\text{сеп}}, \quad (21)$$

де $\bar{v}_{\text{сеп}}$ – середнє значення окружної швидкості лопаті, яке визначається згідно з виразом:

$$\bar{v}_{\text{сеп}} = \frac{\omega_0}{2} \cdot L. \quad (22)$$

Підставивши формулу (22) в (20) з урахуванням (9) приводимо до такого результату:

$$P_{m.k.} = \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot \frac{\pi \cdot h \cdot \varepsilon_0 \cdot g \cdot \omega_0}{k} \cdot L^3. \quad (23)$$

Якщо на валу знаходиться лопатей n , тоді повну потужність P , що витрачається на приведення в рух у високошвидкісному лопатовому змішувачі матеріалу, визначатиме наступний вираз:

$$P = P_{\text{ш.р.}} + \chi_n \cdot n \cdot (P_{m.m.} + P_{m.n.} + P_{3.c.}) + P_{m.k.}, \quad (24)$$

де χ_n – коефіцієнт, що враховує взаємний вплив лопаті один на одного при їх русі.

Отримане шукане рівняння (24) дозволяє визначити сумарну потужність мобільного бетонозмішувача залежно від його конструктивних характеристик і режиму роботи.

Висновки. У межах проведеного теоретичного дослідження проаналізовано конструкцію мобільного бетонозмішувача примусової дії та визначено основні фактори, що впливають на енергоспоживання під час перемішування будівельних сумішей різного складу. Отримано аналітичну залежність для визначення загальної потужності, необхідної для приведення в рух лопатей змішувача, яке враховує геометричні параметри робочого органу та кінематичні характеристики обертання.

Список використаних джерел

1. Назаренко, І. І. (1999). *Машини для виробництва будівельних матеріалів*. Київ: КНУБА.
2. Rudyk, R., & Salnikov, R. (2024). Analysis of the mixer geometry and rheology impact on concrete mixture mixing efficiency. *Техніка будівництва*, (41), 77-84. <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0409>.
3. Ємельянова, І. А., & Аніщенко, А. І. (2012). Визначення основних показників роботи технологічного комплексу обладнання, що складається з бетонозмішувача гравітаційно-примусової дії та стрічково-скребкового живильника. *Збірник наукових праць: Галузеве машинобудування, будівництво*, (1), 28-34.
4. Назаренко, І. І. (2017). Визначення раціональних параметрів гравітаційних бетонозмішувачів. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*, (90), 67-72.
5. Онищенко, О. Г., & Ващенко, К. М. (2006). Розрахунок потужності та визначення опорів, що виникають при роботі стрічкового шнекового розчинозмішувача. *Вісник КДПУ*, 1(36), 58-63.
6. Свиридчук, Д. Я. (2011). Аналіз та оцінка конструктивно-технологічних параметрів бетонозмішувачів. *Теорія і практика будівництва*, (8), 11-14.
7. Ручинський, М. М., & Свиридчук, Д. Я. (2013). Дослідження коливань вібраційного бетонозмішувача з урахуванням впливу перемішувача матеріалу. *Техніка будівництва*, (31), 35-42.
8. Коробко, Б. О., Васильєв, О. С., & Рогозін, І. А. (2015). Аналіз кінематики суміші в корпусі змішувача з вертикальним шнеком зі змінною твірною. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 3/7(75), 48-52.
9. Коробко, Б. О., Васильєв, О. С., & Рогозін, І. А. (2015). *Вертикальний змішувач із шнековою стрічкою зі змінною твірною* (Патент України № 99566).
10. Коробко, Б. О., Васильєв, О. С., & Рогозін, І. А. (2013). *Установка розчинозмішувальна з вертикальним шнеком* (Патент України № 81413).
11. Вірченко, В. В. (2006). Приготування будівельних розчинових сумішей за допомогою ефективних змішувачів. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 1(66)(1), 71-74.

References

1. Nazarenko, I. I. (1999). *Mashyny dlia vyrobnytstva budivelnnykh materialiv* [Machines for the production of building materials]. *KNUBA*.
2. Rudyk, R., & Salnikov, R. (2024). Analysis of the mixer geometry and rheology impact on concrete mixture mixing efficiency. *Tekhnika budivnytstva – Technology of construction*, 41, 77-84. <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0409>.
3. Yemelianova, I. A., & Anishchenko, A. I. (2012). Vyznachennia osnovnykh pokaznykiv roboty tekhnolohichnoho komplektu obladnannia, shcho skladaietsia z betonomishuvacha hgravitatsiino-prymusovoho dii ta strichkovo-skrebkovoho zhyvylnyka. [Determination of the main performance indicators of a technological set of equipment consisting of a gravity-forced concrete mixer and a belt-scraper feeder]. *Zbirnyk naukovykh prats: Hалуzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo – Collection of scientific papers: Industry-specific mechanical engineering, construction*, 1, 28-34.
4. Nazarenko, I. I. (2017). Vyznachennia ratsionalnykh parametriv hgravitatsiinykh betonomishuvachiv [Determination of rational parameters of gravity concrete mixers]. *Girnichy, budivelnny, dorozhnyi ta meliorativnyi mashyny – Mining, construction, road and land reclamation machinery*, 90, 67-72.
5. Onyshchenko, O., & Vashchenko, K. (2006) Rozrakhunok potuzhnosti ta vyznachennia oporiv, shcho vynykaiut pry roboti strichkovoho shnekovoho rozchynozmishuvacha. [Calculation of power and determination of resistances arising during the operation of a ribbon screw mortar mixer.] *Visnyk KDPU – KDPU Journal*, 1(36), 58-63.

6. Svyrydiuk, D. Ya. (2011). Analiz ta otsinka konstruktyvno – tekhnolohichnykh parametriv betonozmishuvachiv. [Analysis and evaluation of structural and technological parameters of concrete mixers]. *Teoriia i praktyka budivnytstva – Theory and practice of construction*, (8), 11-14.

7. Ruchynskiy M. M., Svyrydiuk D. Ya. (2013) Doslidzhennia kolyvan vibratsiinoho betonozmishuvacha z urakhuvanniam vplyvu peremishuvanoho materialu. [Research of vibrations of a vibrating concrete mixer taking into account the influence of the mixed material]. *Tekhnika budivnytstva – Construction technology*, 31, 35-42.

8. Korobko, B. O., Vasyliiev O. S., & Rohozin I. A. (2015) Analiz kinematyky sumishi v korpusi zmishuvacha z vertykalnym shnekom zi zminnoiu tvirnoiu. [Analysis of the kinematics of the mixture in the housing of a mixer with a vertical screw with a variable generator]. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii – Eastern European Journal of Advanced Technologies*, 3/7(75), 48-52.

9. Korobko, B. O., Vasyliiev, O. S., & Rohozin, I. A. (2015). Vertykalnyi zmishuvach iz shnekovoiu strichkoiu zi zminnoiu tvirnoiu [Vertical auger ribbon mixer with variable feed] (Patent Ukrainy – Patent of Ukraine No. 99566).

10. Korobko, B. O., Vasyliiev, O. S., & Rohozin, I. A. (2013). Ustanovka rozchynozmishuvalna z vertykalnym shnekom [Mortar mixing plant with vertical screw] (Patent Ukrainy - Patent of Ukraine No. 81413).

11. Virchenko, V. V. (2006). Pryhotuvannia budivelnnykh rozchynovykh sumishei za dopomohoiu efektyvnykh zmishuvachiv [Preparation of mortar mixtures using efficient mixers]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Bulletin of the Kremenchuk National University named after Mikhail Ostrogradsky*, 1(66)(1), 71-74.

Отримано 07.08.2025

UDC 693.542.524

Oleksii Vasyliiev¹, Volodymyr Kulai²

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of branch machinery and mechatronics

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» (Poltava, Ukraine)

E-mail: a.s.vasiliiev.76@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9914-5482>

²PhD Student, Department of branch machinery and mechatronics

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» (Poltava, Ukraine)

E-mail: lykym339@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4990-5336>

ANALYSIS OF THE POWER REQUIRED TO DRIVE THE BLADES OF A PLANT FOR PREPARING EXPLOSIVE CONCRETE

In the conditions of intensive development of construction technologies and increasing requirements for energy efficiency and quality of production of building materials, in particular foam concrete, the task of improving the designs of mixing equipment is urgent. A significant part of the energy consumption of such equipment is the power required to drive the working body of – blades. Insufficient or excessive power can lead, respectively, to inefficient mixing or energy overspending, which is critical in the conditions of mobile use of the installation. In this connection, a scientific and practical task arises: to develop an approach to the theoretical determination of the power required to drive the working body of a mobile concrete mixer, taking into account the influence of the physical and mechanical properties of the mixture, the kinematics of the movement of the blades and the design features of the mixer. The article presents a theoretical study of the operation process of the mixer and the determination of the power required to set the working body of the mobile concrete mixing plant in motion. An analysis of the design parameters of the mixer and the geometry of the blades was carried out. The main components of the total power are determined: energy costs for forming and maintaining the vortex movement of the mixture, as well as the power necessary to overcome the resistance of the medium during the movement of the blades. The obtained results make it possible to assess the influence of design and kinematic parameters on energy consumption. Approaches to choosing a drive and increasing the efficiency of mobile concrete mixing plants are substantiated. Special attention is paid to the characteristics of the starting mode, since it is at this moment that the maximum load on the drive is observed. Analytical dependencies can be used at the design stage to optimize the geometry of working bodies and choose an energy-saving mode of operation.

Keywords: drive power; blade; mixing; forced-action concrete mixer; motion energy; energy efficiency.

Fig.: 3. References: 11.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-480-486](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-480-486)

УДК 624.042.7/8:624.131.53

**Денис Михайлович Зезюков¹, Микола Миколайович Махінко²
Дар'я Сергіївна Нечепуренко³**

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій

Український державний університет науки і технологій,

ННІ Придніпровська державна академія будівництва та архітектури (Дніпро, Україна)

E-mail: zdmcomua@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7451-992X>. ResearcherID: [ACR-2491-2022](https://orcid.org/0000-0001-7451-992X)

²кандидат технічних наук, доцент кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій

Український державний університет науки і технологій,

ННІ Придніпровська державна академія будівництва та архітектури (Дніпро, Україна)

E-mail: kolia2785@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5541-8672>. ResearcherID: [ABD-7168-2021](https://orcid.org/0000-0001-5541-8672)

³кандидат технічних наук, доцент кафедри організації і управління будівництвом

Український державний університет науки і технологій,

ННІ Придніпровська державна академія будівництва та архітектури (Дніпро, Україна)

E-mail: Nechepurenko.daria@pdaba.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9292-4790>. ResearcherID: [ABS-9162-2022](https://orcid.org/0000-0002-9292-4790)

ПРОБЛЕМИ ОЦІНКИ КАТЕГОРІЙ ПОШКОДЖЕННЯ КРУПНОПАНЕЛЬНИХ ЧАСТКОВО ЗРУЙНОВАНИХ БУДИНКІВ ПІСЛЯ ДИНАМІЧНИХ І ВИБУХОВИХ ВПЛИВІВ

У статті представлено аналіз раціональності та економічної ефективності посилення та капітального ремонту частково зруйнованих великопанельних будівель відповідно до визначеної категорії пошкоджень внаслідок динамічних та ударних впливів, отриманих у результаті бойових дій. Виходячи з практичної та економічної доцільності, проаналізовано можливі методи та способи підсилення великопанельних будівель та запропоновано показник інтегрального зносу для віднесення до граничної категорії пошкоджень.

Ключові слова: великопанельні будівлі; категорії руйнування; методи підсилення; капітальний ремонт.

Рис.: 2. Табл.: 2. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. Великопанельні будівлі становлять значну частину житлового фонду пострадянських країн, включаючи Україну, де їхня частка сягає понад 40 % багатопверхової забудови. Спочатку ці конструкції проектувалися для швидкого індустріального складання та експлуатації в умовах невисоких динамічних впливів, проте сучасні чинники впливу суттєво змінили умови їхньої експлуатації. Основним параметром на 2025 рік є воєнні дії, що продовжуються на території країни та призводять до часткових і повних пошкоджень житлових масивів: вибухові та ударні хвилі мають динамічний характер, аналогічні сейсмічним впливам, викликаючи як повні руйнування конструктивних систем, так і локальні обвалення, у тому числі пошкодження стиків між панелями.

Постановка проблеми. Проблема раціональності та економічної ефективності посилення та капітального ремонту великопанельних будівель стає одним із ключових інженерних завдань, що має не лише наукове, а й велике соціальне значення, враховуючи обмеженість застосування окремих положень та наказів щодо такого завдання [1]. Ця проблема пов'язана з питаннями безпеки населення, продовження терміну служби будівель та економічної доцільності вжитих заходів.

Аналіз досліджень і публікацій. Вивчення статистики результатів досліджень щодо пошкодження та посилення панельних будівель під динамічними та сейсмічними навантаженнями ведуться з 1970-х років. У класичних роботах наголошувалося на слабких місцях великопанельних будівель, якими є стикові з'єднання між панелями [3]. Руйнування при Спітакському землетрусі (1988, Вірменія) підтвердили, що саме ушкоджені зварні вузли призводять до прогресуючих (лавиноподібних) обвалів [5].

У міжнародній літературі багато уваги приділено вразливості збірних конструкцій (precast large panel buildings) при динамічних і ударних впливах. У дослідженнях FEMA (США) та Eurocode (ЄС) зазначено, що без спеціальних заходів панелі мають низьку пластичність і обмежену енергоємність [6].

Практичні спостереження за будинками в Грузії, Вірменії, Казахстані та Румунії показали, що великопанельні системи особливо вразливі до комбінованих динамічних впливів:

- 1) руйнування зварних закладних деталей у стиках між панелями та випадання панелей;
- 2) усунення або випирання панелей через крихке руйнування стиків;
- 3) поява прогресуючих тріщин у зонах сполучення панелей [7].

У сучасних публікаціях зустрічається аналіз нових методів посилення: застосування FRP (Fiber Reinforced Polymers) – композитів (матеріали на основі полімерів, армованих волокнами (скляними, вуглецевими або арамідними)); UHPC (Ultra High Performance Concrete Jackets) – обойм з ультрависокоміцного цементного матеріалу з міцністю на стиск 150-250 МПа), влаштування монолітних поясів та діафрагм жорсткості [8, 9]. Їхня ефективність підтверджена експериментальними випробуваннями та розрахунками, проте питання масового впровадження у відновлення житлового фонду залишаються відкритими.

Мета статті полягає в аналізі раціональності технічних та економічних аспектів планування посилення та капітального ремонту великопанельних будівель відповідно до визначеної категорії пошкоджень з частковими руйнуваннями внаслідок динамічних та ударних впливів, отриманих у результаті бойових дій.

Основними завданнями статті є:

- 1) аналіз характерних пошкоджень панельних будівель при динамічних та ударних впливах;
- 2) аналіз існуючих способів посилення та капітального ремонту;
- 3) оцінка доцільності підсилень у контексті частково пошкодженого житлового фонду масової забудови;
- 4) запропонування рекомендації щодо вибору стратегії: посилення, капітальний ремонт чи відсутність економічної раціональності їх реалізації;
- 5) питання економічної ефективності при прийнятті рішень щодо повного демонтажу та нового будівництва.

Виклад основного матеріалу. Характерні ушкодження великопанельних будівель можна класифікувати за такими типами:

1. Стикові руйнування: розриви зварних з'єднань, ослаблення замонолічених вузлів, випадання окремих елементів.
2. Тріщиноутворення: розвиток діагональних та вертикальних тріщин у місцях сполучення, розкриття тріщин на торцях панелей.
3. Локальна втрата несучої здатності: відколи бетону, оголення арматури та корозія закладних деталей.
4. Глобальні деформації: перекоси поверхів, втрата просторової жорсткості.
5. Ушкодження основ та фундаментів: осадка основ, нерівномірні деформації.

Місця стиків та контактні поверхні панелей часто мають нещільний контакт із бетоном/герметиком, туди проникає волога, хлориди та CO_2 , що викликає прискорену електрохімічну корозію закладних деталей. Корозія закладних деталей та зварних швів, видавлювання/відшарування захисного шару бетону внаслідок утворення продуктів корозії веде до зменшення жорсткості та міцності стиків з'єднання між панелями. Якщо закладна деталь у стикі не захищена або має повітряні прошарки між бетоном замонолічування, при періодичному чи постійному зволоженні та наявності агресивних середовищ (хлориди, CO_2 , реагенти) вона може втрачати до 0,1-0,2 мм/рік, та за 10-15 років зменшити перетин на 1-2 мм [4]. Отже, приймаючи середній період експлуатації великопанельних будівель масової забудови, що дорівнює на сьогодні 50 років, а також власний досвід технічного обстеження великопанельних будівель різних серій, корозія закладних деталей у стиках може досягати 3-5 мм, часто при впливі тільки періодичного зволоження.

Описані дефекти посилюються впливом динамічних та ударних навантажень військового характеру (ударні хвилі, артобстріли), що робить проблему особливо актуальною для України, при цьому типовими ушкодженнями панельного будинку при динамічних та ударних навантаженнях є: прогресуючі тріщини в стиках; руйнування зварних закладних деталей; перекид та випадання панелей та деформації перекриттів.

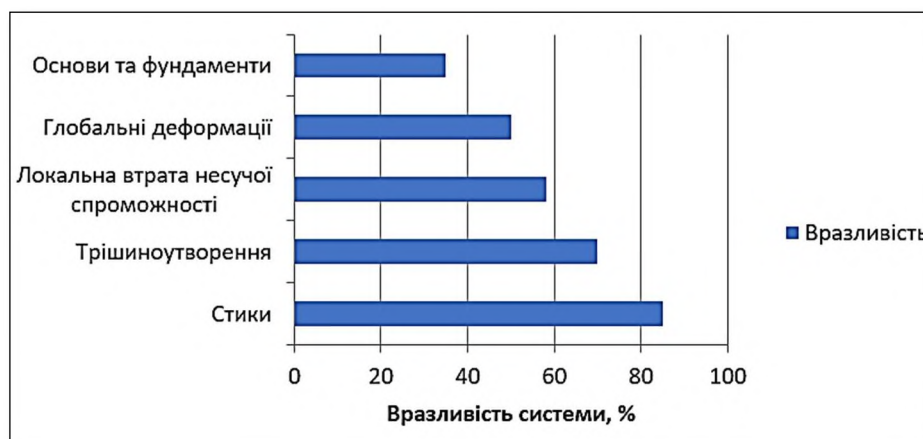


Рис. 1. Типові критерії пошкодження панельних будівель

Джерело: розроблено авторами.

До локальних заходів підсилення можна віднести ін'єктування тріщин та швів цементними та полімерними складами, посилення стиків сталевими анкерами та болтовими з'єднаннями, а також FRP-армування вуглецевими або склокомполімерними стрічками.

Такі методи застосовуються в короткі терміни при незначних ушкодженнях I категорії (згідно з методикою [1]), без переселення мешканців, але дають обмежений приріст жорсткості.

До системних заходів можна віднести влаштування поясів та затяжок по периметру будівель для об'єднання панелей, влаштування вертикальних діафрагм жорсткості, що влаштовуються в сходових клітинах та по торцях будівель, облаштування каркасними рамами із сталі або залізобетону із включенням у спільну роботу та посилення основ та фундаментів.

Ці заходи трудомісткі і вимагають порівняно великих витрат, але значно підвищують загальну жорсткість та стійкість.

Інноваційним методом можна вважати УНРС-обойми – тонкі оболонки з надвисокотривалого бетону. Ці технології рідкісні в масовому застосуванні і сьогодні не розвинені в Україні, але показують високу ефективність в експериментах.

Основною проблемою посилення великопанельних будівель стають стики між панелями, що є найбільш уразливими елементами, і саме від їхньої міцності та пластичності залежить просторова робота будівлі.

До ключових проблем належать такі:

- 1) стики (вузли з'єднання) між панелями будівель проєктувалися для статичних навантажень і не мають достатньої пластичності;
- 2) зварні з'єднання деградують при динамічних та ударних навантаженнях; метал починає кришитися, а наявність корозії прискорює руйнування;
- 3) замоноличені шви часто виконані розчином низької марки, схильним до розтріскування і втрати зчеплення;
- 4) доступ до стиків складний через оздоблення та інженерні комунікації;
- 5) різні серії будинків мають різні конструктивні рішення вузлів, що унеможлиблює єдиний універсальний метод посилення.

До основних методів посилення стиків при капітальному ремонті можна віднести такі:

- 1) влаштування болтових та анкерних зв'язків, а також дублюючих зварних швів.
- 2) ін'єктування швів високоміцними складами з покращеною адгезією.
- 3) введення зовнішніх обойм зі сталі або FRP-композитів для охоплення вузлів та підвищення несучої здатності.

- 4) включення стиків у монолітні залізобетонні пояси та каркаси, що перерозподіляють зусилля.

Приклади з практики капітального ремонту з посиленням:

Україна (Запоріжжя, 2023 р.): у будинках серії 464 було проведено посилення стиків із застосуванням ін'єкційних складів на основі поліуретану. Метод показав високу ефективність при відновленні герметичності та міцності вузлів після пошкоджень від ударної хвилі. Незначні ушкодження I категорії (згідно з методикою [1]).

Вірменія (після Спітакського землетрусу, 1988 р.): масово застосовувалося влаштування монолітних поясів лише на рівні перекриттів із захопленням стиків. Це значно підвищило просторову жорсткість будинків.

Казахстан (Алмати, сейсмонебезпечна зона): практикується зовнішнє армування стиків з використанням FRP-стрічок, що обклеюються по периметру вузлів. Такий метод не вимагає розкриття стін і підходить для будівель, що експлуатуються.

Таким чином, саме стики залишаються «слабкою ланкою» у сейсмостійкості та довговічності панельних будівель. Ефективне їхнє посилення визначає загальну стійкість конструктивної системи.

Економічна ефективність та доцільність, як правило, визначається співвідношенням витрат на посилення та очікуваного продовження терміну служби:

- 1) Локальні заходи (становлять 5-15 % вартості нового будівництва) та продовжують термін служби на 10-15 років.

- 2) Комплексне посилення (становить до 60-70 % вартості нового будівництва) забезпечує до 30-40 років експлуатації.

- 3) Повний демонтаж та нове будівництво економічно доцільно при руйнуванні понад 60 % несучих елементів з огляду на стан стикових з'єднань неповністю зруйнованих частин будівлі у складі єдиного блоку, залишкова міцність яких становить у середньому від 15 до 30 %

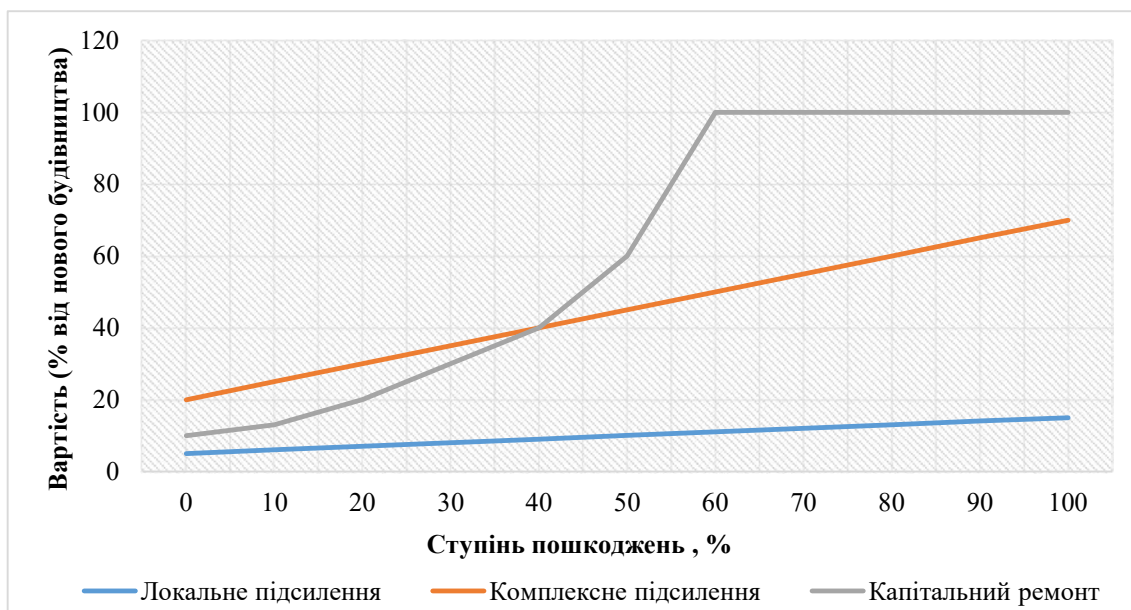


Рис. 2. Графік економічної доцільності відновлення пошкоджених великопанельних будівель
Джерело: розроблено авторами.

Враховуючи соціальні та експлуатаційні фактори, раціональними є методи, що дозволяють виконувати роботи при збереженні житла (без відселення) при незначних руйнуваннях. При цьому застосування FRP-композитів, анкерних сполук та ін'єктування може бути найбільш практичною технологією. При руйнуваннях понад 60 % економічно доцільно планувати демонтаж та нове будівництво сучасних енергоефективних будівель.

Таблиця 1 – Порівняння способів підсилення

Спосіб підсилення	Відносна вартість	Ефективність	Час робіт	Будівля, що експлуатується
Ін'єктування	низька	локальна	короткий	так
Влаштування FRP	низька – середня	середня	короткий	так
Влаштування монолітних поясів	середня	висока	середній	частково
Влаштування діафрагм	висока	висока	тривалий	ні
Вбудова каркасу	дуже висока	максимальна	тривалий	ні
Влаштування UHPC-обойм	середня	висока	середній	частково

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 2 – Економічна ефективність

Ступінь пошкоджень	Рекомендована міра	Термін експлуатації	Доля вартості нового будівництва, %
Легкі	локальне підсилення	+ 10-15 років	5-15
Середні	комплексне підсилення	+ 25-30 років	40-60
Важкі	демонтаж	новий термін	100

Джерело: розроблено авторами.

З прикладів досвіду посилення можна навести такі випадки: масове посилення панельних будинків монолітними рамами після землетрусів у Румунії 1977 року; використання залізобетонних діафрагм та сталевих обойм після Спитака у Вірменії; впровадження FRP та металевих зв'язків при ремонті будинків у Казахстані. Ці приклади показують, що комплексний підхід можливий, але потребує довгострокової державної програми.

З основних рекомендацій щодо відновлення частково зруйнованих великопанельних будівель найбільш доцільними можуть бути наступні:

- 1) Розробка типових проєктів посилення для найпоширеніших серій панельних будинків.
- 2) Використання багаторівневих заходів: локальне посилення масового застосування, комплексне – для стратегічно важливих об'єктів (школи, лікарні).
- 3) Підтримка державних програм модернізації житла з урахуванням наслідків воєнних руйнувань.
- 4) Включення економічної оцінки до процесу прийняття рішень, враховуючи соціальний ефект.

Висновки. Великопанельні будівлі мають підвищену вразливість до динамічних і ударних впливів через ослаблені стикові з'єднання та їх знижену жорсткість. Найбільш характерні пошкодження великопанельних будівель найчастіше пов'язані з руйнуванням саме закладних деталей у стиках між панелями та тріщиноутворенням на панелях через наявність нерегулярного, а часом повної відсутності робочого армування. У цілому економічна доцільність діючих заходів значно залежить від масштабу ушкоджень: при часткових руйнуваннях у діючій методиці [1] рекомендується виконання капітального ремонту з локальним посиленням і лише за значних ушкоджень (від 81 %) повний демонтаж

будівлі. При виконанні оцінки для присвоєння категорії ушкоджень не враховується головна проблема, а саме: стан стикових з'єднань неповністю зруйнованих частин будівлі у складі єдиного блоку, залишкова міцність яких становить у середньому від 15 до 30 % і це без урахування зниження жорсткості після динамічного/ударного впливу. Рациональною технічною межею для ухвалення рішення про повний демонтаж будівлі рекомендовано значення 60 %, якщо воно отримане на підставі інтегрального зносу.

У післявоєнний час пріоритетним буде розробка технологій, що дозволяють проводити посилення без повного відселення мешканців. Науковий супровід та розробка типових рішень посилення для масових серій великопанельних будівель мають стати пріоритетом державної політики.

Список використаних джерел

1. Про затвердження Методики проведення обстеження та оформлення його результатів, Наказ Міністерства розвитку громад та територій No. 144 (2022) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0898-22#Text>.
2. Kovalenko, O. (2022). Dynamic effects of blast loads on precast buildings. *Journal of Civil Engineering*, 2(4), 21-28.
3. Гвоздєв, А. А. (1985). *Стики панелей и их работа в условиях динамических нагрузок*. Стройиздат.
4. Дудышкина Л. А. & Жуковская В. И. (1988). *Ремонт полносборных жилых зданий*. Издательство Стройиздат.
5. Wyllie, L. A., & Filson, J. R. (1988). *Reconnaissance report: Armenia earthquake reconnaissance report. Earthquake Spectra, Special Supplement No. 89/01*. Earthquake Engineering Research Institute (EERI).
6. Applied Technology Council (ATC). (1998). *FEMA 306: Evaluation of earthquake-damaged concrete and masonry wall buildings: Basic procedures manual*. Prepared for the Federal Emergency Management Agency (FEMA). Redwood City, CA, and Washington, DC: FEMA / ATC.
7. Lungu, D., & Demeter, A. (2004). *Seismic vulnerability of large panel buildings in Romania*.
8. Triantafillou, T. C. (2001). Seismic retrofitting of structures with fibre-reinforced polymers. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 3(1), 57-65. <https://doi.org/10.1002/pse.61>.
9. JRC (Joint Research Centre, European Commission) (2017). *Design guidelines for connections of precast structures under seismic actions*. Publications Office of the European Union.

References

1. Pro zatverdzhennia Metodyky provedennia obstezhennia ta oformlennia yoho rezultativ [On approval of the Methodology for conducting surveys and recording their results], Order of the Ministry of Community and Territorial Development No. 144 (2022) (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0898-22#Text>.
2. Kovalenko, O. (2022). Dynamic effects of blast loads on precast buildings. *Journal of Civil Engineering*, (2(4)), 21-28.
3. Gvozdev, A. A. (1985). *Styki panelej i ih rabota v usloviyah dinamicheskikh nagruzok [Panel joints and their performance under dynamic loads]*. Vidavniectvo Strojizdat.
4. Dudyshkina, L. A., & Zhukovskaya, V. I. (1988). *Remont polnosbornykh zhilykh zdaniy [Renovation of prefabricated residential buildings]*. Vidavniectvo Strojizdat.
5. Wyllie, L. A., & Filson, J. R. (1988). «Reconnaissance report». Armenia earthquake reconnaissance report, Earthquake Spectra, Special Supplement No. 89/01, EERI.
6. Applied Technology Council (ATC) (1998). FEMA 306: «Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings». Basic Procedures Manual. Prepared for FEMA. Redwood City (CA) / Washington, D.C. : FEMA / ATC.
7. Lungu, D., & Demeter, A. (2004). *Seismic vulnerability of large panel buildings in Romania*.
8. Triantafillou, T. C. (2001). Seismic retrofitting of structures with fibre-reinforced polymers. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 3(1), 57-65. <https://doi.org/10.1002/pse.61>.
9. JRC (Joint Research Centre, European Commission) (2017). «Design guidelines for connections of precast structures under seismic actions». Publications Office of the European Union.

Отримано 17.09.2025

Denis Zeziukov¹, Mykola Mahinko², Darya Nечepurenko³

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of reinforced concrete structures
Ukrainian State University of Science and Technologies

Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture (Dnipro, Ukraine)

E-mail: zdmcomua@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7451-992X>. **ResearcherID:** [ACR-2491-2022](https://orcid.org/0000-0001-7451-992X)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of reinforced concrete structures
Ukrainian State University of Science and Technologies

Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture (Dnipro, Ukraine)

E-mail: kolia2785@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5541-8672>. **ResearcherID:** [ABD-7168-2021](https://orcid.org/0000-0001-5541-8672)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Organization and Management
Ukrainian State University of Science and Technologies

Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture (Dnipro, Ukraine)

E-mail: Nechepurenko.daria@pdaba.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9292-4790>. **ResearcherID:** [ABS-9162-2022](https://orcid.org/0000-0002-9292-4790)

PROBLEMS OF ASSESSING DAMAGE CATEGORIES OF LARGE-PANEL PARTIALLY COLLAPSED BUILDINGS AFTER DYNAMIC AND EXPLOSIVE IMPACTS

The article presents the analysis of the rationality and economic efficiency of strengthening and major repairs of partially destroyed large-panel buildings in accordance with a certain category of damage due to dynamic and impact effects received as a result of hostilities, which is becoming one of the key engineering tasks, which has not only scientific but also great social significance, given the limited application of certain provisions and orders on recognizing large-panel buildings as destroyed in the appropriate category. This problem is related to the issues of public safety, extension of the service life of buildings and economic feasibility of the measures taken. Based on practical and economic feasibility, possible methods and ways of strengthening large-panel buildings for characteristic damage during dynamic and impact effects are analyzed; assessment of the feasibility of reinforcements in the context of partially damaged housing stock of mass housing; economic efficiency when making decisions on complete dismantling and new construction. The economic feasibility of strengthening measures depends significantly on the damage scale. In case of partial destruction, the current standards recommend performing major repairs with local reinforcement and only in case of significant damage, complete dismantling of the building. When performing the assessment for assigning the damage category, the condition of the butt joints of the building panels as part of a single block is not taken into account, therefore, the article proposes an appropriate indicator of integral wear to assign the building to the limit damage category.

Keywords: large-panel buildings; destruction categories; reinforcement methods; major repairs.

Fig.: 2. **Tabl.:** 2. **References:** 9.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-487-493](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-487-493)

УДК 528

**Наталія Петрівна Ярема¹, Володимир Ігорович Нікулішин²,
Світлана Василівна Деміхова³, Андрій Романович Согор⁴**

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри картографії та геопросторового моделювання

Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: nataliia.p.yarema@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5796-2038>. Scopus Author ID: [57218923725](https://orcid.org/0000-0002-5796-2038)

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](https://orcid.org/0000-0003-0027-3511)

³викладач кафедри гуманітарних наук

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного (Львів, Україна)

E-mail: svitlanademikhova@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6088-6195>.

⁴кандидат технічних наук, доцент кафедри картографії та геопросторового моделювання

Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: andrii.r.sohor@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0084-9552>. Scopus Author ID: [57224950613](https://orcid.org/0000-0002-0084-9552)

СТВОРЕННЯ СЕРІЇ ВЕБКАРТ, ПРИСВЯЧЕНИХ ПАМ'ЯТІ ГЕРОЯ УКРАЇНИ, ВІДОМОГО ОПЕРНОГО СПІВАКА ВАСИЛЯ СЛІПАКА

У статті описано процес створення серії вебкарт, присвячених пам'яті Героя України, видатного оперного співака Василя Сліпака. Розглянуто джерела та методи збору даних, що використовуються для наповнення картографічного матеріалу. Особлива увага приділяється етапам розробки вебкарт за допомогою платформи ArcGIS Online. Також успішно було використано ArcGIS StoryMaps – онлайн-інструмент для створення та обміну історіями за допомогою інтерактивних карт. Цей інструмент було використано для представлення геопросторових даних та окремих сюжетних ліній з біографії Василя Сліпака. Результатом проекту стали тематичні карти, що поєднують текстову інформацію, фотографії та просторові дані в єдиному візуальному середовищі. Такий підхід не лише зберігає пам'ять про видатну постать, але й служить прикладом використання ГІС у сфері збереження культурної спадщини.

Ключові слова: вебкартографія; ArcGIS; ArcGIS Online; картографічний вебдодаток; серія карт.

Рис.: 6. Бібл.: 6.

Актуальність теми дослідження. Сучасне вебкартографування активно використовується в найрізноманітніших сферах – від науки та освіти до туризму, містобудування та культурної спадщини. Цей інноваційний інструмент дозволяє не лише візуалізувати просторові дані, а й створювати змістовні цифрові історії [1; 3].

Саме тому ми вирішили впровадити серію інтерактивних карт, присвячених Герою України Василю Сліпаку, видатному оперному співаку та воїну, який віддав своє життя за свободу своєї країни. Використовуючи геоінформаційні технології, ми прагнемо показати ключові віхи його життя, праці та боротьби, щоб вшанувати пам'ять цієї унікальної особистості.

Постановка проблеми. Основні задачі, які були поставлені перед написанням статті:

1. Створити та структурувати набір вхідних даних, які були отримані з різних джерел: біографічних публікацій, медіаресурсів, архівних записів та інформаційних платформ.
2. Використовуючи картографічну платформу ArcGis Online, створити серію інтерактивних вебкарт.

3. Використовуючи ArcGIS StoryMaps, створити історію у вебкартах про Василя Сліпака.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [6] описано використання веб-ГІС для збору, систематизації та публікації інформації про воєнні злочини та жертви війни на території України, а також створення інтерактивних карт для доступу громадськості. У статтях [4, 5] розглядаються теоретичні та методологічні основи створення вебкарт для поствійськових об'єктів, включаючи принципи історизму, системності, достовірності, інформативності та доступності, що забезпечують ефективну візуалізацію та презентацію даних.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри наявність численних публікацій і матеріалів про Василя Сліпака, його життя та творчість переважно досліджувалися у біографічному або мистецтвознавчому контексті. Недостатньо вивчено використання сучасних геоінформаційних технологій для візуалізації біографічних даних, а також інтеграції просторової інформації з історико-культурним та військово-патріотичним контекстом. Мало уваги приділялось систематизації та структуризації біографічної та творчої інформації у форматі, доступному для широкої аудиторії та освітніх проєктів.

Мета статті – дослідити та узагальнити життєвий і творчий шлях Василя Сліпака, а також увічнити пам'ять про нього засобами сучасних геоінформаційних технологій. Для досягнення цієї мети створено серію інтерактивних карт пам'яті у середовищі ArcGIS Online та ArcGIS StoryMaps, які відображають ключові події біографії митця, географію його життя та діяльності, а також місця, пов'язані з його громадянською позицією та участю у російсько-українській війні. Використання технологій вебкартографії дозволяє поєднати текстові, візуальні та просторові дані в єдиний інтерактивний ресурс, що сприяє популяризації постаті Василя Сліпака, збереженню національної пам'яті та демонструє потенціал цифрових картографічних інструментів у гуманітарних дослідженнях.

Виклад основного матеріалу. Для створення інтерактивних вебкарт було проведено ретельний етап збору та систематизації даних. Інформаційна база формувалася на основі матеріалів, отриманих з відкритих інтернет-джерел, зокрема біографічних публікацій, медіаресурсів, архівних записів та інформаційних платформ. Значний внесок у формування джерельної бази проєкту зробив Орест Сліпак, брат Василя Сліпака, який надав унікальну інформацію, уточнення та матеріали, що значно поглибили зміст вебкартографічного ресурсу. Усі зібрані дані були організовані в атрибутивну таблицю з подальшим тематичним поділом. Основні розділи, за якими структурувалася інформація, включали такі підрозділи:

1. Концертна діяльність Василя Сліпака.
2. Участь у бойових діях на Сході України.

Такий підхід забезпечив можливість точного просторового представлення подій та фактів, що стосуються як творчого шляху, так і військової біографії Василя Сліпака.

Процес створення карти включав кілька етапів:

1. Збір і обробка даних – перевірка джерел, систематизація фактів та підготовка таблиці для імпорту в ArcGIS Online.
2. Створення інтерактивних шарів – додавання локалізованих значків і мультимедійних елементів (фото).
3. Оформлення ArcGIS StoryMaps – поєднання картографічних шарів із текстовими блоками та мультимедіа для покрокового оповідання історії життя Василя Сліпака.
4. Редагування та тестування – перевірка коректності відображення інформації, адаптація для різних пристроїв та забезпечення зручності користування.

Таблиця атрибутів містила такі атрибути: широта, довгота, дата концерту, місто, країна, концертний зал, інформація про концерт, інформація про місто, інформація про країну, інформація про концертний зал. Друга таблиця атрибутів містила такі атрибути: широта, довгота, місто, країна, інформація про місто, інформація про бойові дії.

Опрацьовані та систематизовані дані були імпортовані в середовище ArcGIS Online, хмарну геопросторову платформу, яка дозволяє створювати, зберігати, обробляти та публікувати просторові дані у вебформаті. ArcGIS Online надає широкі можливості для побудови інтерактивних карт, аналізу геоданих, інтеграції мультимедійного контенту та організації доступу до результатів досліджень для різних категорій користувачів [2]. У рамках проєкту на основі введених атрибутів були створені тематичні вебкарти, які дозволяють просторово відобразити ключові етапи життя та діяльності Василя Сліпака.

Тематична структура створених вебкарт охоплює кілька основних напрямків:

1. «Становлення як оперного співака» – карта, що ілюструє етапи музичної освіти Василя Сліпака, перші виступи та участь у конкурсах і фестивалях. Треба відмітити, що Василь Сліпак народився та виріс у Львові. Співав у Львівській хоровій капелі «Дударик». Його перші виступи відбулись у Львівському національному театрі опери та балету імені Соломії Крушельницької та у Львівській обласній філармонії. На рис. 1 показана вебкарта «Становлення як оперного співака».

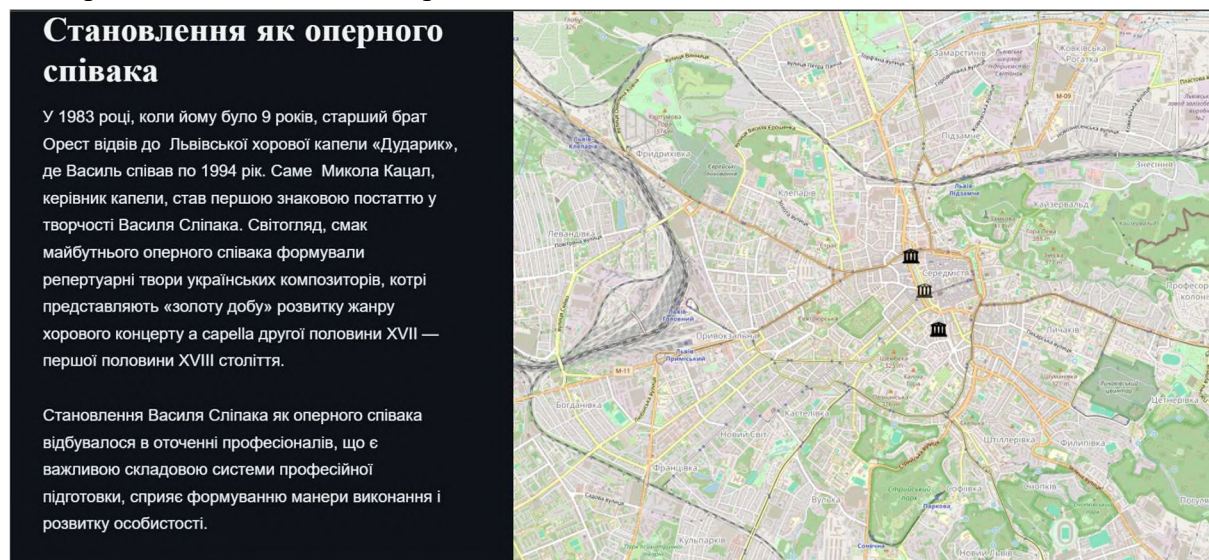


Рис. 1. Становлення як оперного співака

Джерело: <https://storymaps.arcgis.com/stories/c0147a87287f4761a07c586bf98d8e13>.

2. «Концертна діяльність» – короткий зміст виступів артиста на різних сценах світу. Усе в житті було пов'язано зі співом. 182 концерти у 23 країнах світу. На рис. 2 представлена вебкарта, яка показує усю концертну діяльність Василя Сліпака.

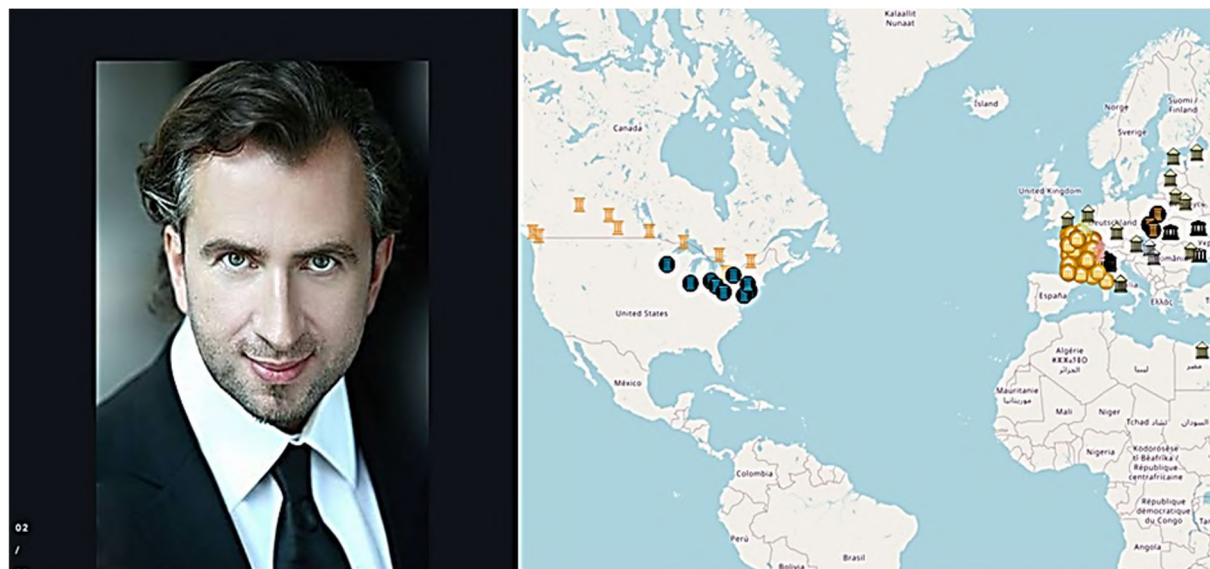


Рис. 2. Концертна діяльність

Джерело: <https://storymaps.arcgis.com/stories/c0147a87287f4761a07c586bf98d8e13>.

3. «Концерти в США та Канаді» – це просторове відображення закордонних гастролей Василя Сліпака у Північній Америці. Адже у 1990 р. співак відвідав 20 міст США та Канади.



Рис. 3. Концерти в США та Канаді

Джерело: <https://storymaps.arcgis.com/stories/c0147a87287f4761a07c586bf98d8e13>.

4. «Франція та Європа» – карта, присвячена творчому періоду Василя Сліпака у Франції та європейських країнах, де він працював солістом Паризької опери. Ще дуже молодий Василь Сліпак у 1997 році успішно пройшов конкурсне випробування на вступ до складу Паризької національної опери. Його голос дав змогу йому почати сольну кар'єру у Франції та Європі.

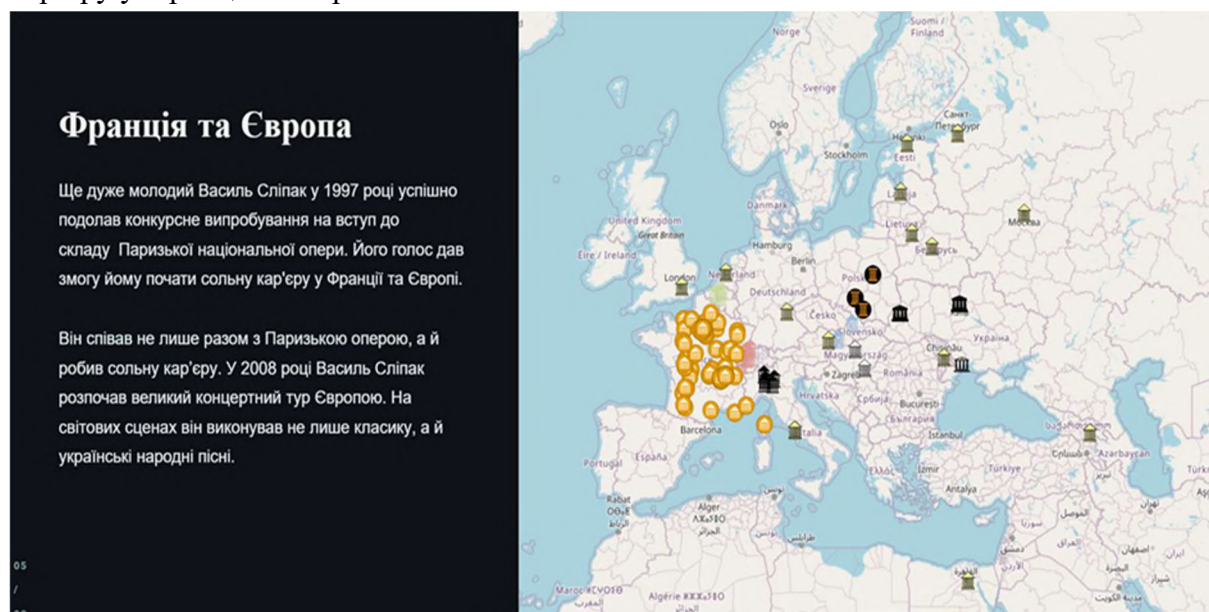


Рис. 4. Франція та Європа

Джерело: <https://storymaps.arcgis.com/stories/c0147a87287f4761a07c586bf98d8e13>.

5. «Концерти в Україні» – відображення виступів артиста на батьківщині.

Концерти в Україні

В Україні відбулося 17 концертів у Львові, Києві та Одесі.

«Василь мав унікальний голос. Так, голос кожного є унікальним. Але Василь мав Україну у своєму голосі. Він мистів сяйво вашого блакитного неба і золоту ваших полів. Голос вміщував усе це. І це завжди прекрасно, коли хтось передає цей світ іншій людині. І це велика втрата для України, і для світу, бо його голос більше ніколи не створить на сцені того контакту з глядачами — згадає Гоша Ковалінська, солістка Паризької опери (меццо-сопрано).

Найулюбленішою була партія Мефістофеля в опері Ш.Гуно «Фауст». Звідси з'явився позивний «Міф», з яким Василь Сліпак воював на передовій.

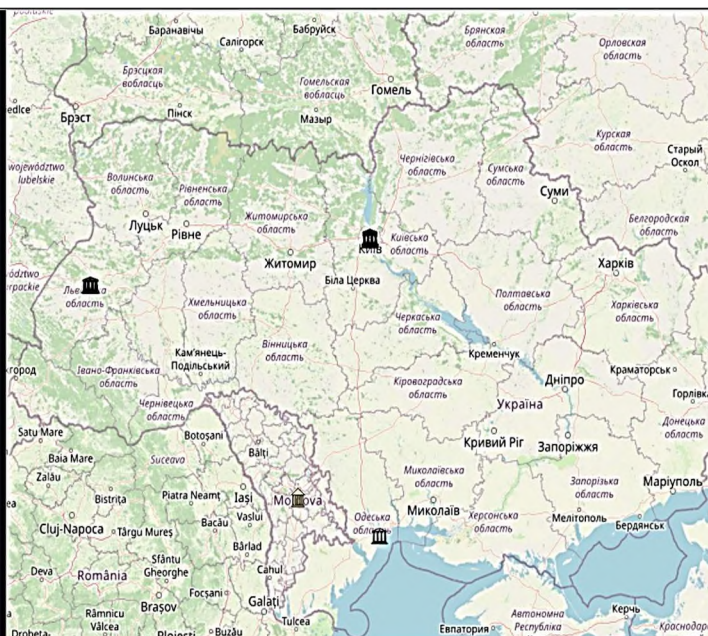


Рис. 5. Концерти в Україні

Джерело: <https://storymaps.arcgis.com/stories/c0147a87287f4761a07c586bf98d8e13>.

б) «Участь у війні на Сході України» – карта, що документує основні етапи участі Василя Сліпака у бойових діях, включаючи місця дислокації, бойових завдань та загибелі. На карті позначені бої у Авдіївці, Водяному. 29 червня 2016 р., виконуючи бойове завдання як кулеметник у складі 1-ї штурмової роти Добровольчого українського корпусу «Правий сектор» (ДУК ПС), загинув у бою. Воїн ціною власного життя врятував побратимів. Захисники відбили атаку російських збройних формувань на смт Луганське (Бахмутський район, Донецька область) з боку м. Дебальцеве та перейшли у контрнаступ, посунувши противника з двох укріплених позицій на висотах поблизу с. Логвинове. Місце смерті Василя Сліпака – смт Луганське, Бахмутський район, Донецька область).

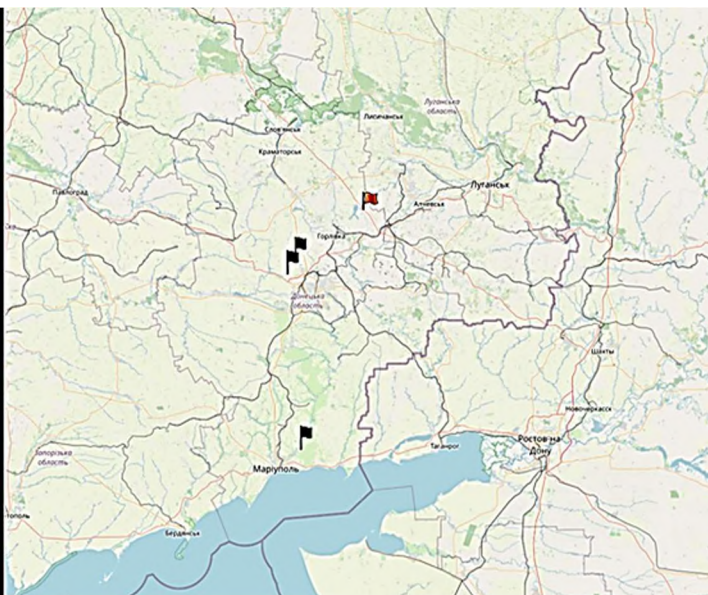


Рис. 6. Участь у війні на Сході України

Джерело: <https://storymaps.arcgis.com/stories/c0147a87287f4761a07c586bf98d8e13>.

Висновки. Створений картографічний ресурс може бути використаний як у наукових, так і в освітніх цілях. Зокрема, він може слугувати додатковим інструментом для вивчення новітньої історії України, медіаграмотності, культурної спадщини, а також для поширення інформації про героїв нашого часу серед молоді та широкого загалу. Цей унікальний картографічний проєкт є не лише даниною пам'яті видатній особистості, а й важливим внеском у збереження культурної та історичної спадщини України. Завдяки йому пам'ять про Василя Сліпака житиме в серцях людей і залишатиметься джерелом натхнення для майбутніх поколінь.

Окрім того, цей проєкт відкриває нові можливості для інтеграції сучасних геоінформаційних технологій у гуманітарні науки, сприяючи глибшому розумінню історичних подій через просторовий контекст. У майбутньому ресурс може бути розширений та доповнений новими даними, що зробить його ще ціннішим для дослідників, викладачів та широкої аудиторії.

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

Під час написання цього матеріалу автори використовували ШІ (ChatGPT) для покращення читабельності та виправлення стилістичних і граматичних помилок у цій статті.

Після використання цього інструменту автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Bandrova, T., Konecny, M., & Zlatanova, S. (Ред.). (2014). *Thematic cartography for the society*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08180-9>.
2. Cartwright, W., & Peterson, M. P. (2007). Multimedia cartography. In W. Cartwright, M. P. Peterson, & G. Gartner (Eds.), *Multimedia cartography* (pp. 1-10). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-36651-5_1.
3. Muehlenhaus, I. (2013). *Web cartography*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16229>.
4. Repekhovych, S., & Sossa, R. (2021, October). Approaches to web mapping of post-military facilities in Lviv region. In *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2021"* (Vol. 2021, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K3003>.
5. Repekhovych, S., & Sossa, R. (2022, October). Principles of web mapping of post-military facilities. In *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2022"* (Vol. 2022, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022590020>.
6. Yarema, N., Kowalsky, P., Marchenko, D. A., Holubinka, Y., & Yurkiv, M. (2023). Using the web GIS environment to collect and publish data of war crimes and war victims in Ukraine. In *Współczesne technologie geoinformacyjne w modelowaniu przestrzeni: I Kongres geoinformacyjny (X Ogólnopolskie sympozjum geoinformacyjne)*, Kraków, 25-27 października 2023: streszczenia referatów (p. 98). <https://doi.org/10.23939/istcgcap2024.100.025>.

References

1. Bandrova, T., Konecny, M., & Zlatanova, S. (Eds.). (2014). *Thematic cartography for the society*. Cham: Springer International Publishing. p. 370. ISBN: 978-3-319-08179-3 (Print). 978-3-319-08180-9 (Online). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08180-9>.
2. Cartwright, W., Peterson, M. P. (2007). *Multimedia Cartography*. In: Cartwright, W., Peterson, M. P., Gartner, G. (eds) *Multimedia Cartography*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-36651-5_1.
3. Muehlenhaus, I. (2013). *Web cartography*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16229>.
4. Repekhovych, S., & Sossa, R. (2021, October). Approaches to web mapping of post-military facilities in Lviv region. In *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2021"* (Vol. 2021, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K3003>.

5. Repekhovych, S., & Sossa, R. (2022, October). Principles of web mapping of post-military facilities. In *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2022"* (Vol. 2022, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022590020>.

6. Yarema, N., Kowalsky, P., Marchenko, D. A., Holubinka, Y., & Yurkiv, M. (2023). Using the web GIS environment to collect and publish data of war crimes and war victims in Ukraine. In *Współczesne technologie geoinformacyjne w modelowaniu przestrzeni: I Kongres geoinformacyjny (X Ogólnopolskie sympozjum geoinformacyjne)*, Kraków, 25-27 października 2023: streszczenia referatów (p. 98). <https://doi.org/10.23939/istcgcap2024.100.025>.

Отримано 19.09.2025

UDC 528

Nataliya Yarema¹, Volodymyr Nikulishyn², Svitlana Demikhova³, Andrii Sohor⁴

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Cartography and Geospatial Modelling
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: nataliia.p.yarema@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5796-2038>. **Scopus Author ID:** [57218923725](https://orcid.org/0000-0002-5796-2038)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of 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](https://orcid.org/0000-0003-0027-3511)

³Lecturer at the Department of Humanities

Hetman Petro Sahaidachnyi National Ground Forces Academy (Lviv, Ukraine)

E-mail: svitlanademikhova@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6088-6195>

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Cartography and Geospatial Modelling
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: andrii.r.sohor@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0084-9552>. **Scopus Author ID:** [57224950613](https://orcid.org/0000-0002-0084-9552)

CREATION OF A SERIES OF WEBMAPS DEDICATED TO THE MEMORY OF THE HERO OF UKRAINE, THE FAMOUS OPERA SINGER WASSYL SLIPAK

A series of memory cards dedicated to Vasyl Slipak, a famous Ukrainian opera singer, volunteer, and participant in the Russo-Ukrainian War, has been created. These cards are designed to honor his life, work, and heroic journey, as well as to convey information about significant events and places related to his activities.

The series of maps aims to combine biographical data, the artist's creative work, and the geography of his life – from Lviv, where he was born and studied, to France, where he gained recognition on the opera stage, and to Ukraine, where he died defending his homeland.

This approach allows users to trace the life path of Vasyl Slipak in a spatial dimension and gain a deeper understanding of the scale of his figure.

Creating interactive maps also contributes to the popularization of digital cartographic technologies, in particular the ArcGIS Online, ArcGIS StoryMaps platform, as a means of presenting complex information in a convenient and visual format.

Users can view key events in the artist's life, learn about his work and achievements, and track places associated with his heroic deeds. Thus, the series of maps performs not only an informative but also an educational function, contributing to the preservation of national memory and patriotic awareness among different categories of audience.

Keywords: web cartography; ArcGIS; ArcGIS Online; web application; series of maps.

Fig.: 6. References: 6.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-494-505](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-494-505)

UDC 699.86: 621.384.3

Maksym Bolotov¹, Iryna Prybytko²

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding Technologies and Construction
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: m.bolotov@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>

Scopus Author ID: 57190377278. ResearcherID: H-4183-2014

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of welding Technologies and Constructions
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine).

E-mail: iryna.prybytko@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8550-8318>

Scopus Author ID: 57217181853. ResearcherID: F-7325-2014

THERMAL EFFICIENCY ASSESSMENT OF ECO-ORIENTED PREFABRICATED MODULAR BUILDINGS: CASE STUDY

The relevance of eco-oriented modular construction is constantly growing due to the aggravation of housing and environmental problems associated with military operations on the territory of Ukraine. At the same time, there are certain challenges limiting the widespread use of modular buildings in Ukraine, which are mainly associated with a high level of consumer skepticism regarding the quality and energy efficiency of modular buildings compared to traditional construction practices. On the example of a frame modular single-family building «QHome-26», located on the outskirts of the Chernihiv city, the thermal characteristics of prefabricated modular construction were studied. By using infrared thermography, monitoring of existing cold bridges and the main heat losses in the building's envelope was carried out. It was experimentally established that the potential source of heat loss of the building is translucent structural elements that does not meet modern standards, as well as the foundation of the building. At the same time, the results of the thermal calculation of the building's enclosing structures showed that the main source of heat loss at the level of 38.5 % of the total losses are walls. Heat losses for heating ventilated air are 26.3 %. While up to 14.5 % of heat is lost throughout the windows. Heat losses through the roof and floor are 12.6 % and 9.9 %, respectively.

Keywords: Sustainability; modular buildings; eco-construction; thermal efficiency.

Fig.: 5. Table: 4. References: 18.

Urgency of the research. The construction industry is one of the major pollutant as well as the largest natural resources user, which affects negatively the worldwide sustainability. The conventional construction practices has always been a huge contributor to the global greenhouse gases and carbon dioxide emissions [1; 2].

According to the International Energy Agency (IEA), construction industry consumes more than 50 % of steel production, 60-70 % of cement production, 40-50 % of overall energy. On top of that, the modern buildings releases about 30-40 % of CO₂ emission on atmosphere [3].

All of these increased dramatically the environmental concerns among the government and other stakeholders all over the globe.

Target setting. The intentions to go green and minimize natural resources consumption requires shifting of our habitual construction practices toward the more sustainable and energy-efficient ones [4]. In this context, the modularization in construction become one of the modern trend. This is mainly due to the fact that modular prefabrications focuses directly on the ecological and energy saving approaches in building construction that allows to downsize hazardous environmental impact, resources and energy consumption and construction waste.

The idea of modularization in house construction isn't new. It refers to the 1947 when French modernist architect Le Corbusier first provides his concept called "Unit of Dwelling" as an early example of modular house architecture. His well-known work "The Modulor" allowed for modularization and standardization in architectural design [5].

It noteworthy that World War II became a booster for modular buildings development as the rapid and affordable housing.

In Ukraine the demand in modular prafabs steadily growing after the full-scale Russian invasion in 2022. According to the UN statistics, the amount of internally displaced people in Ukraine from February 2022 by the beginning of 2025 counts more than 3.6 million people [6].

Modular prefabrications or modular prefabs implies the off-site manufacturing where whole building or its separate components are manufactured in controlled factory environment with further transportation and installation on construction site [7].

Actual scientific researches and issues analysis. It should be noted, that the prevalent majority of studies have focused mainly on sustainable performances of modular buildings, it's life cycle, operation and maintenance. For instance, the works [8; 9] explores the environmental benefits of modular housing in terms of CO₂ reduction by using of more eco-friendly materials. In work [10], the advantages of the off-site construction regarding the construction time reduction, higher level of prefabricated components quality control and minimization of on-site errors was shown. The works [11, 12] was dedicated to the newest advancements in modular buildings manufacturing based on the BIM technologies application. BIM tools allows the digital planning and design of building's components with high level of precision ensuring durability and sustainability during whole life cycle of a building.

However, there are some challenges limiting the modular buildings widespread application particularly in Ukraine that mainly related with the high level of consumer's skepticism regarding the quality and thermal efficiency of modular buildings compare to the traditional brick or concrete made. In our opinion, such a perception is mainly because of lack of profound knowledge about the energy performances of eco-oriented materials, which is the basis for sustainability.

As it is known, the heat energy has a tendency to disappear by conductivity through the enclosures (walls, windows), floor (basement) and the roof. In turn, the rate of the heat losses will be determined by the thermal characteristics of insulation materials, particularly it's thermal transmittance value.

The research objective. In this case, the aim of current research is to provide a deeper understanding of thermal performances of eco-oriented prefabricated modular housing based on the real example.

The statement of basic materials. Our case study is the single-family modular prefab "QHome-26" [13], which was off-site manufactured in 2023 by the Ukrainian company "QHome" supported by the UN Refugee Agency (UNHCR) and installed in the vicinity of Chernihiv city in Novoselivka village. As a foundation of the building, the FBS base blocks were used. The building's exterior, its installation process, 3D model of the timber carcass as well as the premises plan with its explication are given in Fig. 1.



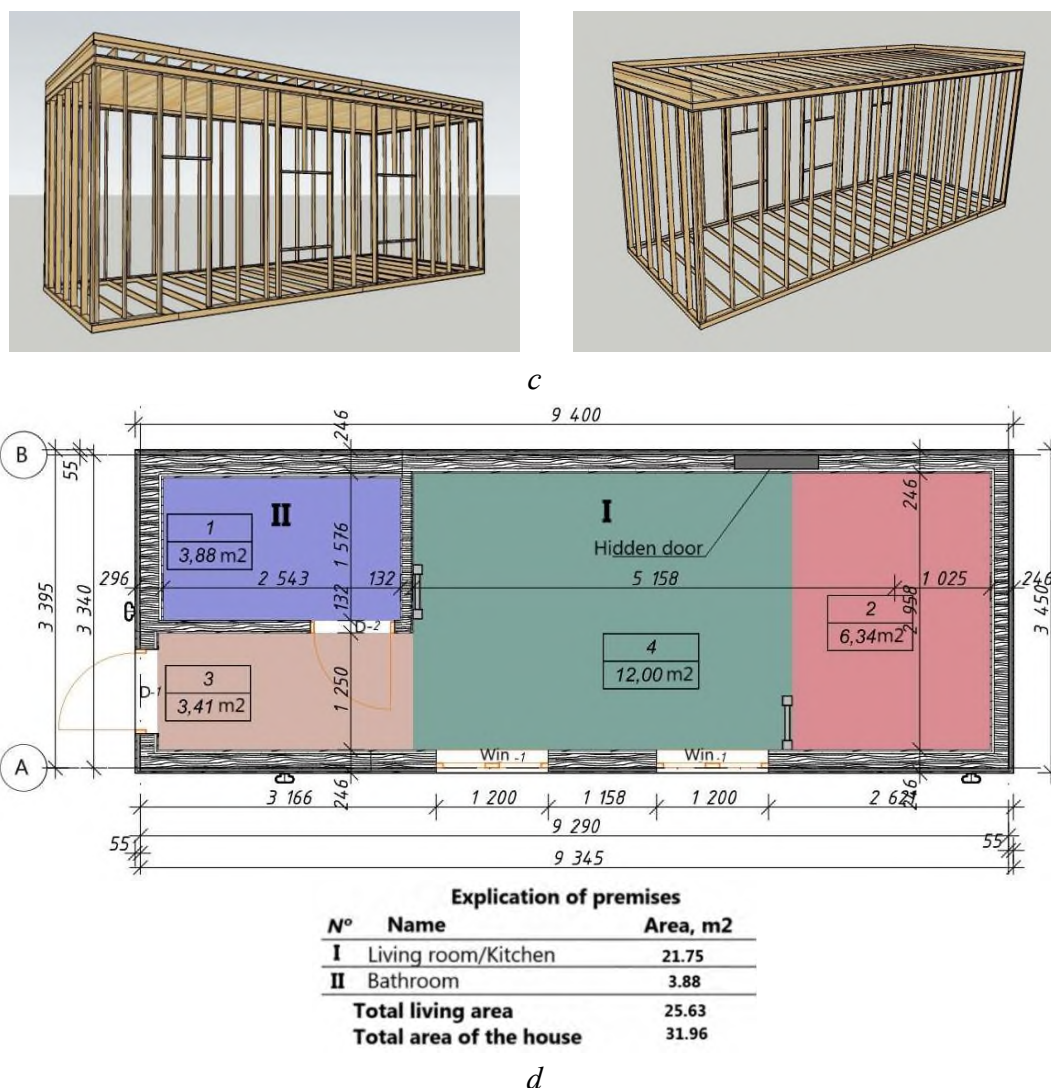


Fig. 1. External view of studied single-family modular prefab (a), its installation process (b), 3D model of the timber carcass (c) and the plan of the premises with its explication (d)

The basis of the house is a timber-made frame with the dimensions of 9400×3450 mm and the thickness of the partitions of 300 mm. The building is made up of two premises, particularly, combined living room and kitchen with the area of 21.75 m² and the bathroom of 3.88 m². Thus, the living area of 25.63 m² and the total area of the building of 31.96 m².

As far as it's known, the building's envelope plays a crucial role in terms of thermal performances of the buildings especially when it comes to the modular ones. In this case, the core content of the building's energy efficiency and sustainability is the thermal insulation performance of enclosure structures.

In our case study, as the insulator the ecologically friendly basalt wool was used which provides a high level of thermal efficiency with the low coefficient of heat conductivity about 0.038 W/m·K. On top of that, the basalt wool well-known as non-combustible, vapor permeable and soundproofing one.

The enclosing structures were manufactured as the sandwiches, which are made up of the timber frame, hydro barrier membrane, OSB plates, insulator, vapor barrier, and wooden lining as an internal decorative layer. The roofing consists of two layers of felt paper, OSB, timber checkrails, hydro barrier membrane, insulated timber rafter, vapor barrier, checkrails and wooden lining. The floor is detached from the ground on a distance of 250 mm and made up of the timber checkrails, two layers of felt paper, OSB, timber beams, insulator, OSB and PVC internal lining.

Reinforced timber frame of the building is the dry calibrated timber with the OSB-3 plates, bitumen primer, vapor and waterproof, roofing material (roofing felt EPP 2.5 and EPP 4.0.). The construction details of the enclosures (walls, floor, and the roof) are given in Fig. 2. It should be noted that the thickness of the walls and roof is 250 mm while the thickness of the floor is 300 mm.

On the Southern facade, there are two triple-glazed windows of 4-10-4-10-4 type with the three air filled chambers profile system with the dimensions of 1.2×1.2 m were installed.

The house is heated up by the solid fuel boiler with the power of 7 kW, which is easily allows to heat the building up to the total area of 100 m².

Before the assessment of studied building's thermal efficiency the infrared thermography inspection in order to get the information about the existing thermal bridges and the main heat loss in the building envelope was conducted.

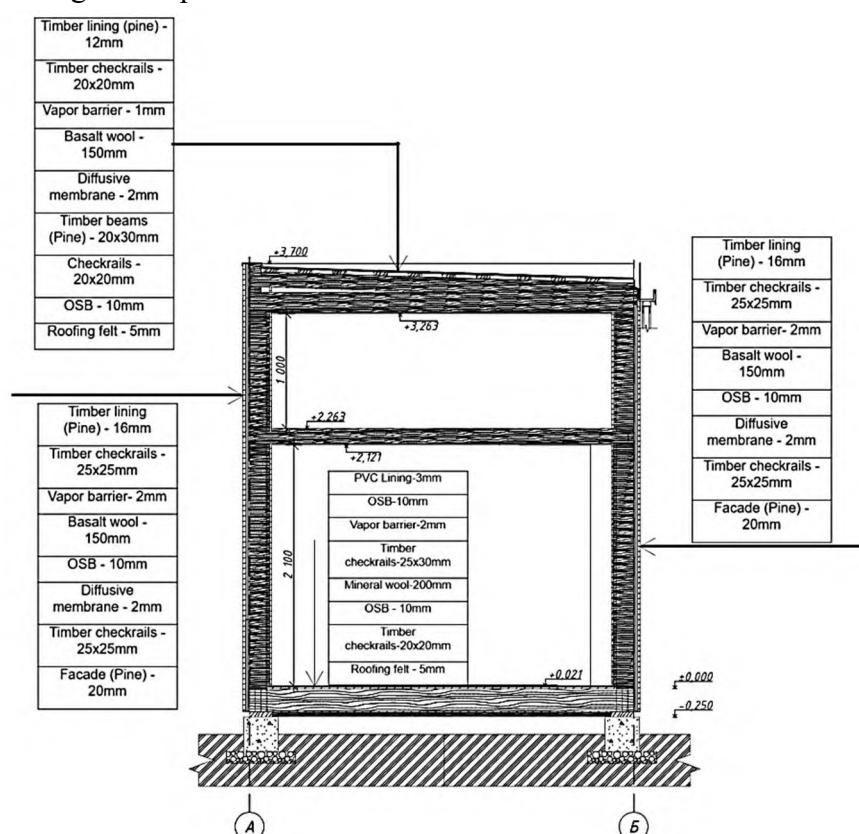


Fig. 2. The detailed content of the enclosures of studied modular building

The inspections were carried out on 12th of February 2025 approximately from 10:00 to 11:00 am when the weather was overcast, the temperature of the environment was about – 16 °C, wind speed doesn't exceed of 3 m/s with the humidity level of 60 %. The probability of precipitations was about 10 %. It should be noted that inside temperature at the time of inspection was fixed at a level of 21 °C more the 12 hour. The inspections of thermal bridges were carried out with HTi thermal imaging camera.

The inspection methodology consists of the following steps:

1. Checking the total heat loss through the walls, windows and roof;
2. Searching for areas with increased heat loss in typical problem zones;
3. Analyzing heat dissipation through gaps in window sashes and doorways;
4. Assessing heat leaks through ventilation and air conditioning systems (if available).

The results of infrared thermography are given in Fig. 3.

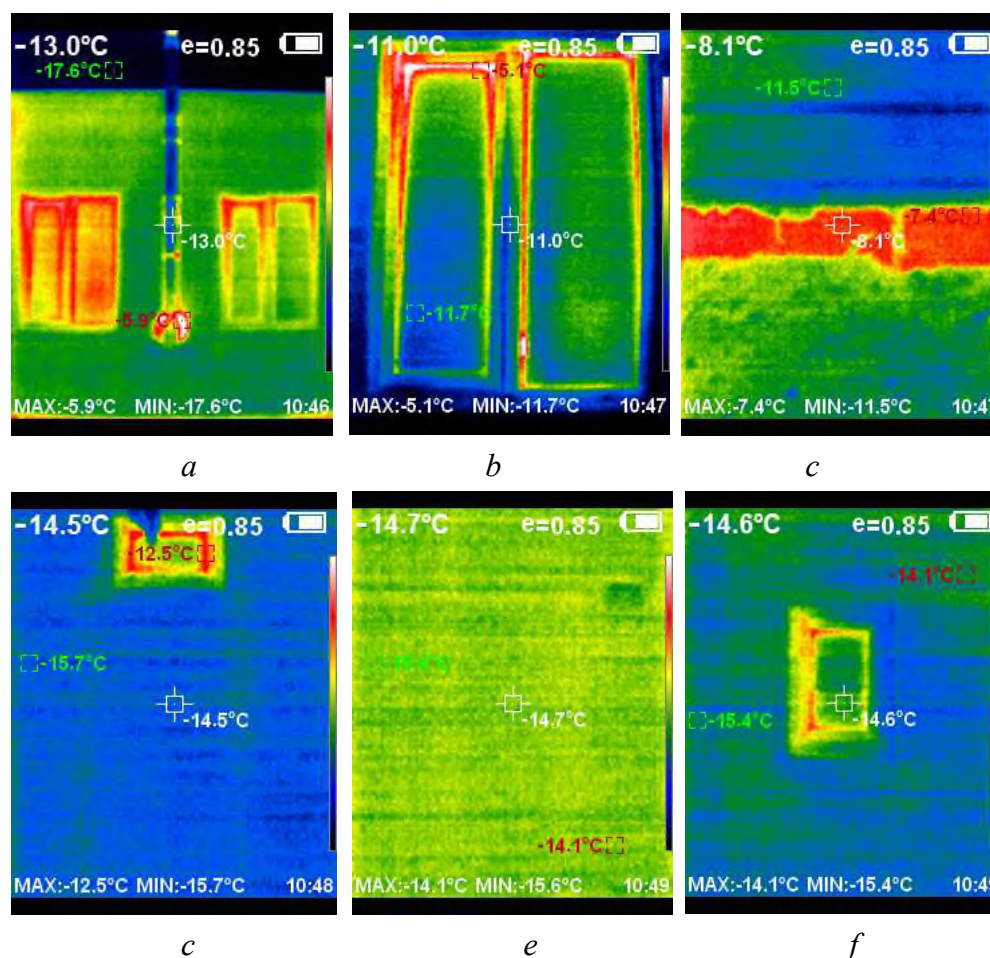


Fig. 3. Thermogram of Southern facade (a), window (b), basement (c), Eastern facade (d), Western facade (e) and Northern facade (f) of inspected building

Analyzing the obtained infrared thermal images of studied building it can be noticed that the main weaknesses that affect negatively of enclosure's thermal behavior is the windows. The thermal bridges concentrated directly along the window's frame contour, which can evidenced both the poor quality of installation, as well as the low quality of manufactured frame and insulating glass. It can be seen that on the surface of one window the temperature varies from -11 up to -5 °C depending on the measurement point, which indicates the heterogeneity of the heat flow passing through the window and the heterogeneity of the thermal resistances of its components accordingly. From the other hand, as it was already mentioned, the off-site manufacturing excludes the fabrication errors because of meticulous quality control of all production stages.

The other significant aspect of heat loss that weakens thermal performances of examined building this is foundation. Remind that our case study contains the FBS base blocks as a foundation without external thermal insulation frames. Additionally, there are no any heat leakages through the heat exchanger as well as the split air conditioning system were detected.

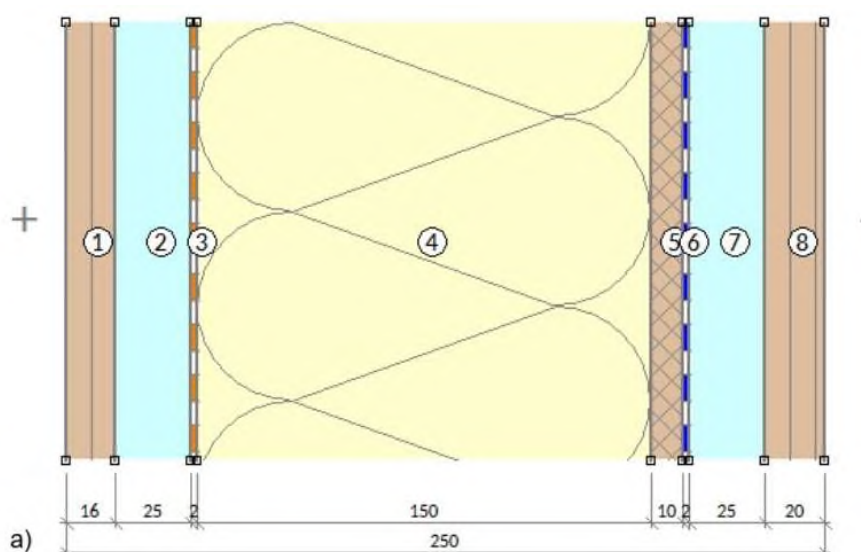
For deeper understanding of building's envelope energy performance, the meticulous thermal engineering calculation is required. The calculation is carried out to determine suitability of actual state of the enclosure structures thermal insulation to the regulatory requirements. Normally, it begins with determination of thermal characteristics of building's envelope. The material properties of the walls, floor and roofing are given in pivot Table 1.

Table 1 – Material characteristics of enclosure structures

№ of layer	Material	Thickness	Thermal conductivity	Ref.	Thermal resistance
		δ, m	λ, W/(m·K)		m²·K/W
External walls characteristics					
1	Timber lining (Pine)	0.016	0.18	[14]	0.089
2*	Closed air gap	0.025	–	[14]	0.155
3	Vapor barrier	0,002	0,3	[14]	0.0066
4	Basalt wool	0.15	0.038	[14]	3.947
5	OSB	0.01	0.13	[14]	0.077
6	Diffusive membrane	0.002	0.23	[14]	0.0087
7	Closed air gap	0.025	–	[14]	0.155
8	Facade (Pine)	0.02	0.18	[14]	0.111
Characteristics of the floor					
1	PVC Lining	0.003	0.33	[14]	0.009
2	OSB	0.010	0.13	[14]	0.077
3*	Closed air gap	0.03	–	[14]	0.155
4	Vapor barrier	0,002	0,3	[14]	0.006
5	Mineral wool	0.2	0.044	[14]	4.762
6	OSB	0.01	0.13	[14]	0.077
7*	Closed air gap	0.02	–	[14]	0.155
8	Check rail (Pine)	0.03	0.18	[14]	0.167
9	Roofing felt	0.005	0.17	[14]	0.029
Characteristics of the roof					
1	Timber lining (pine)	0.012	0.18	[14]	0.067
2*	Closed air gap	0.02	–	[14]	0.155
3	Vapor barrier	0,001	0,3	[14]	0,003
4	Basalt wool	0.15	0.038	[14]	3.947
5	Diffusive membrane	0.002	0.23	[14]	0,0086
6	Timber beams (Pine)	0.03	0.18	[14]	0.167
7*	Closed air gap	0.02	–	[14]	0.155
8	OSB	0.01	0.13	[14]	0.077
9	Roofing felt	0.005	0.17	[14]	0.029

*The systems of closed air gaps with the thickness of 0.025-0.03 m were provided by timber checkrails frame.

The calculation of enclosing structures were conducted with accordance to the models are shown in Fig. 4.



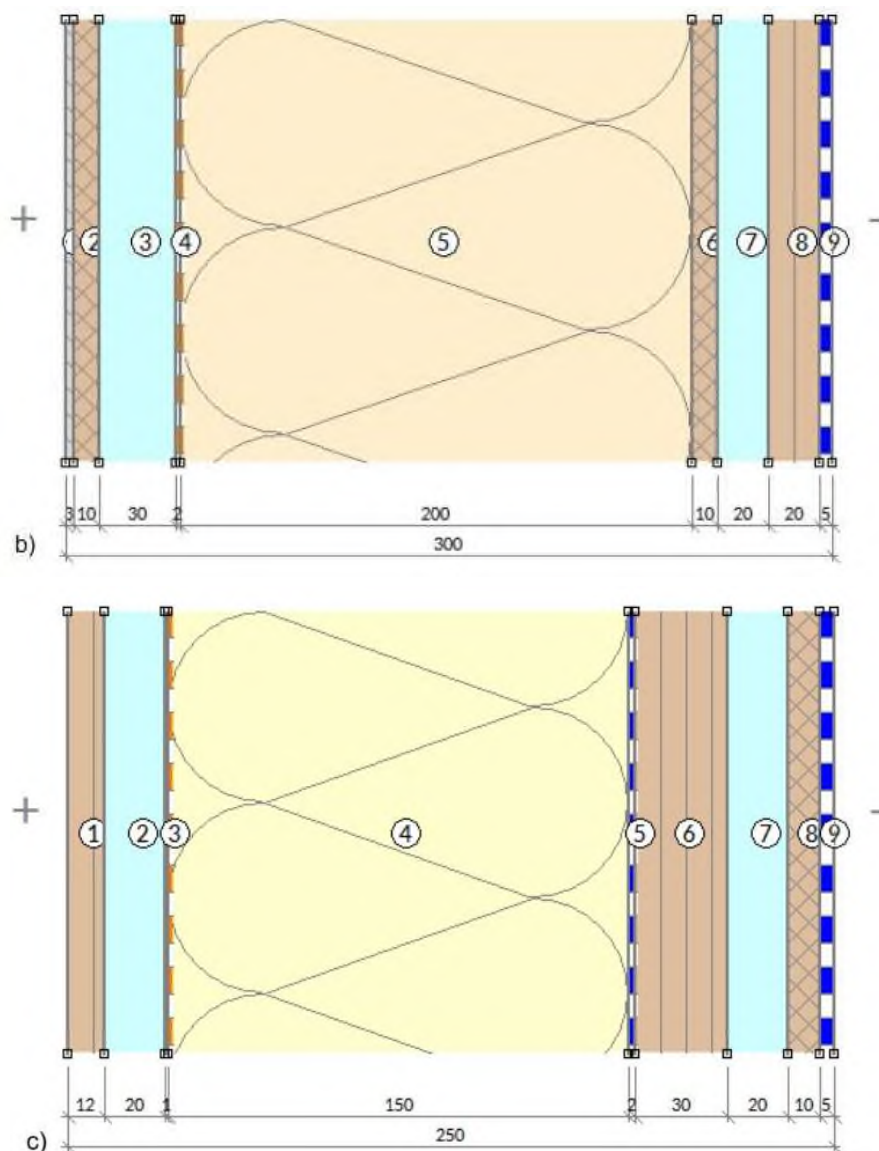


Fig. 4. The calculation models of enclosing structures:
a – walls; b – floor; c – roof

Thermal resistance of every separate enclosing layers in table 1 were determined as follows [15]:

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}; \quad (1)$$

where R_i – thermal resistance of i layer of enclosure, ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$); δ_i – the thickness of i layer; λ_i – thermal conductivity of i layer.

Thermal resistance of multilayered enclosing structure (R_0) can be determined as [15]:

$$R_0 = R_{\text{int}} + \sum_{i=1}^n R_i + R_{\text{ext}} = R_{\text{int}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + R_{\text{ext}}; \quad (2)$$

where R_{int} and R_{ext} – is the heat transfer resistance on the inner and external surfaces of enclosure, ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$); $\sum R_i$ – is the sum of layers thermal resistance, ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$).

The values of R_{int} and R_{ext} determines as follows [18]:

$$R_{int} = \frac{1}{\alpha_{int}}; R_{ext} = \frac{1}{\alpha_{ext}}; \quad (3)$$

where α_{int} , α_{ext} – the heat exchange coefficients near the internal and external surfaces of enclosure. According to [16], $\alpha_{int} = 8.7$ and $\alpha_{ext} = 23$.

Substituting the values obtained when calculating the (1) and (3) into a formula (2) allows us to obtain the actual values of enclosures heat transfer resistance that given in Table 2.

The standard values of heat transfer resistance for existing types of enclosure structures are determined with accordance to [16].

Table 2 – Comparison table of standard and actual values of thermal resistance

Type of enclosure	Thermal resistance, $m^2 \cdot K/W$	
	Actual value	Standard value
External walls	4.817	≥ 4
Floor	5.596	≥ 5
Windows	0.48	≥ 0.9
Combined enclosing bordering the outside air	4.76	≥ 7

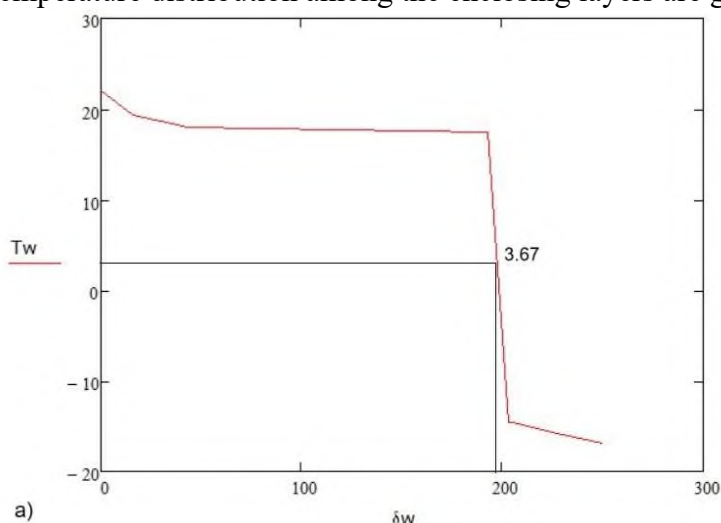
Analyzing of obtained data it can be concluded that the 4-10-4-10-4 type windows doesn't meet the regulatory requirements at all. That is also correlates with the results obtained after infrared thermography. In order to improve the energy performances of the windows with accordance to a standard value the 4i-10Ar-4-14Ar-4i type windows with five air filled chambers profile system or better should be installed. According to our calculations such windows system provides the thermal resistance at a level of $0.95 m^2 \cdot K/W$ with the energy loss about 0.178 kW. Additionally, the thickness of the roofing insulation of 150 mm is not enough. Our calculations has revealed that in order to get the regulatory value the roofing insulation thickness should be increased up to 250 mm.

The temperature distribution through the enclosing layers was calculated as follows [17]:

$$\tau_n = t_{in} - \left(\frac{t_{in} - t_{ext}}{R_0} \right) \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{int}} + R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \right); \quad (4)$$

where t_{in} – temperature of internal air, $t_{in} = 22$ °C; t_{ext} – estimated temperature of external air, (according to [16], $t_{ext} = -23$ °C); R_0 – overall thermal resistance of enclosure; R_1, R_2, R_3, R_n – thermal resistances of 1st, 2nd, 3^d and n layers of enclosure accordingly.

The estimated temperature distribution among the enclosing layers are given in Fig. 5.



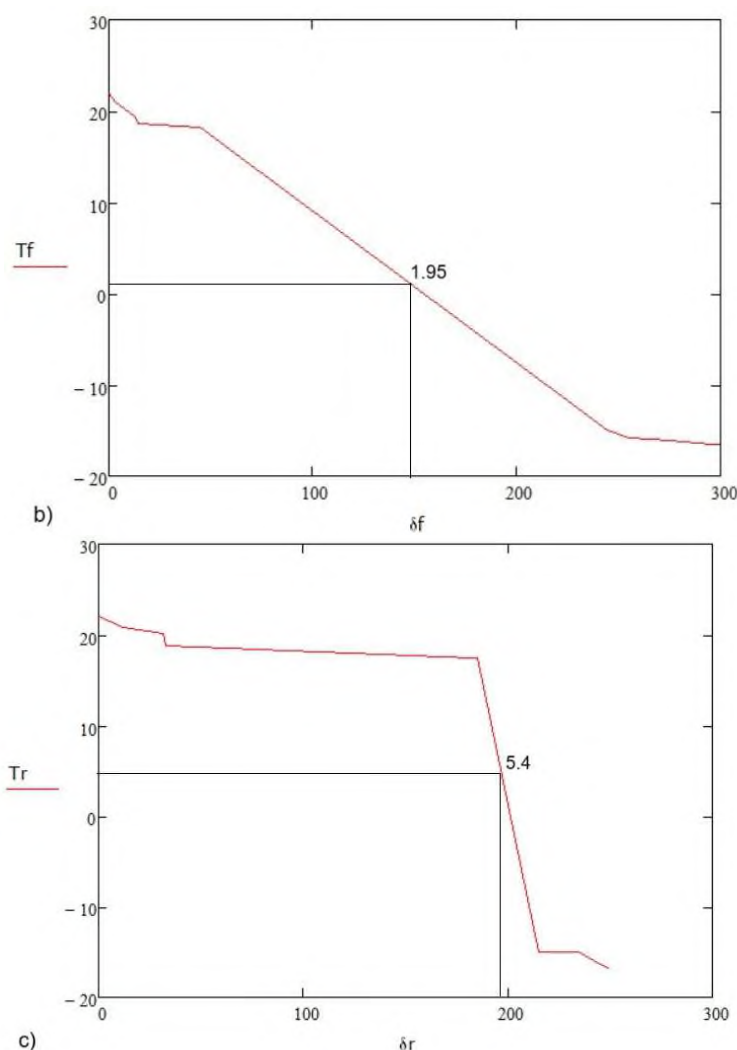


Fig. 5. The calculated temperature distribution among the building's enclosure layers:
a – walls; b – floor; c – roof

Analyzing of obtained results it should be noticed, that the temperature distribution between the walls and the roof layers has similar feature mainly because of similarity in their construction. The average temperatures of the building's enclosures in the period of the coldest month of the year revolve around the positive values, particularly + 3.67 °C for walls, + 1.95 °C for the floor and +5.4 °C for the roof. Thus, building's envelope provides the positive temperatures inside enclosures without any considerable deviation even though the significant daily and seasonal outside air temperature fluctuations. Theoretically, this should exclude the probability of condensation formation and as a result the possibility of thermal bridges development in the future.

Heat loss through the enclosing structures was determined as follows [17]:

$$Q_{en} = \frac{F}{R_0} (t_{in} - t_{ext}) \cdot n \cdot (1 + \sum \beta); \quad (4)$$

where F – calculated area of enclosing structures, m^2 ; R_0 – thermal resistance of enclosure structure, $(m^2 \cdot K)/W$; t_{in} , t_{ext} – internal and external temperatures, °C; n – the coefficient taking into account the dependence of the position of the outer surface of the fence with respect to the outside air, ($n = 1$) [17]; $\sum \beta$ – the sum of additional heat loss as a share of the main losses, ($\sum \beta = 1$) [17].

External walls area as well as their spatial orientation are given in Table 3.

Table 3 – External walls area

Type	Area by side orientation, m ²								Total
	South ↓	South-West ↙	West ←	North-West ↖	North ↑	North-East ↗	East →	South-East ↘	
Walls	31.18	–	12.76	–	34.78	–	12.6	–	91.32

The heat loss for heating of ventilation air is determined by the formula [18]:

$$Q_{va} = 0.28 \cdot L \cdot \rho \cdot c \cdot (t_{in} - t_{ext}); \quad (5)$$

where L - air flow rate, m³/h (for residential buildings, the specific normalized flow rate is can be taken as 3 m³/h per 1 m² of residential area); ρ - indoor air density, kg/m³; c - specific heat capacity of indoor air, $c = 1.005$ kJ/(kg · °C) [18].

$$\rho = \frac{353}{273 \cdot t_{in}}; \quad (6)$$

The calculation results obtained by calculating of (4) and (5) are shown in the Table 4.

Table 4 – Calculation of heat loss through the enclosures and for heating of ventilation air

Type of enclosures	Characteristics of enclosing structures				Heat loss, kW	%, from the overall losses
	Orientation	Dimensions		Area F, m²		
		a, m	b, m			
Walls	South	8.62	3.7	31.9	0.582	13
	West	3.45	3.7	12.76	0.238	5
	North	9.4	3.7	34.78	0.649	14.6
	East	3.45	3.65	12.6	0.235	5.3
Total:		24.92	14.75	91.32	1.3	31.9
Floor	—	8.99	3.04	27.3	0.404	9.9
Roof	—	8.99	3.04	27.3	0.515	12.6
Windows	Left	1.2	1.2	1.44	0.343	7.245
	Right	1.2	1.2	1.44	0.343	7.245
Total:		1.44	1.44	2.88	0.686	16.8
Total loss through enclosures:				148.8	2.9	71.3
Heat loss for heating of ventilation air:					1.165	26.3
Overall heat loss:					4.43	

Conclusions. It can be concluded that the walls are the main source of the heat loss with the overall balance of 31.9 % from the building's total heat loss. Increasing the thickness of the wall insulation up to 200 mm leads to a reduction in the percentage of heat loss to 27 % of the total amount.

Heat loss for heating of ventilation air is the second source of the building's heat loss that is 28.6 % from the total heat loss.

With the existing characteristics of translucent structures with the thermal resistance within $0.48 - 0.52 \frac{m^2 \cdot K}{W}$, heat loss through the windows is 16.8 %. It should be noted that the 4-10-4-10-4 type windows doesn't meet the regulatory requirements and must be replaced with more energy efficient ones. Therefore, to meet regulatory requirements for thermal insulation properties, windows must have at least a 4i-10Ar-4-10Ar-4i design, i.e. they must have a soft selective coating on the outer and inner glass, and the air gaps must be filled with an inert gas, particularly argon. Bringing the thermal resistance of windows to the standard values of $0.95 \frac{m^2 \cdot K}{W}$ reduces the heat loss through the windows up to 4.39 %.

The floor and ceiling have almost the same heat loss ratios of 9.9 % and 12.6 %, respectively.

Acknowledgement. This research is carried out within the framework of the ERASMUS+ KA2 The Bridge project “Bridging the Gap between University and Industry: Master Curricular Supporting the Development of Green Jobs and Digital Skills in the Ukrainian Building Sector” (Project number 101127884-ERASMUS-EDU-2023-CBHE-STRAND-2). The project is funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

References

1. Bolotov, M., Bolotov, H., Prybytko, I., & Korzachenko, M. (2019). Shliakhy pidvyshchennia koroziinoi stikosti zalizobetonu [Ways to increase the corrosion resistance of reinforced concrete]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, 4(18), 247-258. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2019-4\(18\)-247-258](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2019-4(18)-247-258).
2. Bolotov, H. H., Tsybulia, S., Bolotov, M., Prybytko, I., & Yushchenko, S. (2022). Analiz efektyvnosti zastosuvannia mihruichykh inhibitoriv korozi (MIK) dlia pidvyshchennia ekspluatatsiinoi dovhovichnosti zalizobetonu [Analysis of the effectiveness of migrating corrosion inhibitors (MCI) for increasing the operational durability of reinforced concrete]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, 1(27), 199-210. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-1\(27\)-199-210](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-1(27)-199-210).
3. International Energy Agency. (2025). *Global energy review 2025*. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/co2-emissions>.
4. Bolotov, M., Bolotov, H., Prybytko, I., & Korzachenko, M. (2024). Sustainable practices of concrete manufacturing. *Technical Sciences and Technologies*, 2(36), 15-30. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-2\(36\)-15-30](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-2(36)-15-30).
5. Linton, J. (2004). Le Corbusier et l'esprit mathématique. In C. Prelorenzo (Ed.), *Le symbolique, le sacré, la spiritualité dans l'œuvre de Le Corbusier* (pp. 55-65). Paris: Fondation Le Corbusier / Editions de la Villette.
6. UNHCR Ukraine. (n.d.). *Internally displaced persons (IDP)*. Retrieved from <https://www.unhcr.org/ua/en/internally-displaced-persons-idp>.
7. Blismas, N., Pasquire, C., & Gibb, A. (2006). Benefit evaluation for off-site production in construction. *Construction Management and Economics*, 24(2), 121-130. <https://doi.org/10.1080/01446190500184444>.
8. Sullcapuma Morales, M. A. (2023). Modular construction: A sustainable solution for carbon emission reduction in the construction industry. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 5(1), 393-401. <https://doi.org/10.33564/ijeast.2023.v08i01.055>.
9. Kamardeen, I., et al. (2020). Environmental of off-site construction: A Systematic review. *Journal of Cleaner production*, 226, 121999.
10. Baghchesaraei, A., & Baghchesaraei, O. R. (2015). Using prefabrication systems in building construction. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10, 44258-44262.
11. Mostafa, S., Kim, K. P., Tam, V. W. Y., & Rahnamayiezekavat, P. (2018). Exploring the status, benefits, barriers and opportunities of using BIM for advancing prefabrication practice. *International Journal of Construction Management*, 20(2), 146-156. <https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1484555>.
12. Chatzimichailidou, M., & Ma, Y. (2022). Using BIM in the safety risk management of modular construction. *Safety Science*, 154, 1058. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105852>.
13. QHome. (n.d.). *QHome-26*. Retrieved March 7, 2025, from <https://qhome.ua/project/qhome-26/>.
14. Designing Buildings. (n.d.). *Thermal conductivity*. Retrieved from https://www.designing-buildings.co.uk/wiki/Thermal_conductivity.
15. International Organization for Standardization. Building Components and Building Elements – Thermal Resistance and Thermal – Calculation Methods, International Organization for Standardization; ISO 6946; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2017.
16. DBN V.2.6-31:2021. Thermal insulation and energy efficiency of buildings. Kyiv. 2022.
17. Haidiuk, O. V., Herliand, T. M., Kulalaieva, N. V., Pivtoratska, N. V., & Piatnychuk, T. V. (2021). *Tekhnolohii uteplennia fasadiv budivel* [Technologies for building facade insulation]. Polissia.

18. Simona, P. L., Spiru, P., & Ion, I. V. (2017). Increasing the energy efficiency of buildings by thermal insulation. *Energy Procedia*, 128, 393-399. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.044>.

Отримано 10.07.2025

УДК 699.86: 621.384.3

Максим Геннадійович Болотов¹, Ірина Олександрівна Прибытько²

¹кандидат технічних наук, доцент, кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: m.bolotov@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>

Scopus Author ID: 57190377278. **ResearcherID:** H-4183-2014

²кандидат технічних наук, доцент, кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: iryna.prybytko@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8550-8318>

Scopus Author ID: 57217181853. **ResearcherID:** F-7325-2014

ОЦІНКА ТЕПЛОВОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКОЛОГІЧНО ОРІЄНТОВАНИХ ЗБІРНО-МОДУЛЬНИХ БУДІВЕЛЬ: РОЗБІР ПРАКТИЧНОГО КЕЙСУ

Актуальність екологічно орієнтованого модульного будівництва постійно зростає через загострення житлово-екологічних проблем, пов'язаних з військовими діями на території України. В свою чергу, екологічний підхід та мінімізація споживання природних ресурсів вимагають зміни звичних будівельних практик у бік більш стійких та енергоефективних. У цьому контексті модульність у будівництві стає однією з сучасних тенденцій. Широке впровадження модульних збірних конструкцій безпосередньо зосереджене на екологічних та енергозберігаючих практиках у будівництві, що дозволяє зменшити небезпечний вплив на навколишнє середовище, споживання ресурсів та енергії, а також будівельні відходи. Водночас існують певні виклики, що обмежують широке використання модульних будівель в Україні, які головним чином пов'язані з високим рівнем скептицизму споживачів щодо якості та енергоефективності модульних будівель порівняно з традиційними будівельними практиками. У зв'язку з цим, метою даного дослідження є глибше розуміння теплових характеристик екологічно орієнтованого збірного модульного житла на основі реального прикладу. На прикладі каркасного модульного одноквартирного будинку "QНоте-26", розташованого на околиці міста Чернігів, було досліджено теплові характеристики збірно-модульного будівництва. За допомогою інфрачервоної термографії було проведено моніторинг існуючих містків холоду та основних тепловтрат в огорожувальній конструкції будівлі. Експериментально встановлено, що потенційним джерелом тепловтрат будівлі є світлопрозорі конструктивні елементи, що не відповідають сучасним стандартам, а також фундамент будівлі. Водночас результати теплового розрахунку огорожувальних конструкцій будівлі показали, що основним джерелом тепловтрат на рівні 38,5 % від загальних втрат є стіни. Тепловтрати на нагрівання вентиляваного повітря становлять 26,3 %. У той час як через вікна втрачається до 14,5 % тепла, втрати тепла через дах та підлогу становлять 12,6 та 9,9 % відповідно.

Ключові слова: сталий розвиток; модульні будівлі; екобудівництво; тепла ефективність.

Табл.: 5. Рис.: 4. Бібл.: 18.

Віктор Васильович Ворох¹, Ольга Василівна Глоба²¹аспірант кафедри геоінформатики

Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: fainkucha@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0112-8422>²магістр наук, кафедри геоінформатики

Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: olgaglobo73@knu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4923-3374>**МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВОГО МОНІТОРИНГУ В ЗЕМЛЕРОБСТВІ**

Цифровий моніторинг є ключовим інструментом у розвитку точного землеробства, забезпечуючи оперативну оцінку стану агросистем і можливість просторово обґрунтованого управління технологічними процесами. В умовах підвищеного навантаження на ресурси, зміни клімату та варіативності ґрунтових умов виникає потреба в комплексному аналізі параметрів, що впливають на врожайність сільськогосподарських культур. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю впровадження інноваційних цифрових технологій у землеробстві, здатних підвищити ефективність агровиробництва, адаптивності до умов середовища та зменшити витрати ресурсів. До основних застосованих підходів належать: агрохімічний аналіз (вміст азоту, фосфору, калію, кислотність), просторове зондування електропровідності ґрунтів для виявлення структурних відмінностей, а також дистанційне зондування за допомогою супутникових даних Sentinel-2 для розрахунку вегетаційного індексу NDVI. Додатково використано телеметричні дані польової техніки, які дозволили оцінити ефективність виконання технологічних операцій, зокрема картографувати витрати пального. Отримані результати подано у вигляді тематичних карт та таблиць, що ілюструють просторову варіативність ключових показників. Дослідження показало значну різноманітність ґрунтових характеристик у межах одного поля, що підтверджується як агрохімічними результатами, так і показниками електропровідності. Просторові відмінності у значеннях NDVI свідчать про неоднорідність розвитку посівів, зумовлену комбінацією ґрунтових, кліматичних та технологічних факторів. Аналіз телеметричних даних виявив тенденції до впорядкування маршрутів і раціоналізації використання техніки, що опосередковано впливає на енергоефективність польових робіт. Інтеграція цифрових методів моніторингу — агрохімічного, електрофізичного, телеметричного й дистанційного — забезпечує багатовимірне розуміння стану агросистем. Такий підхід дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо диференційованого управління, знижує ризики перевитрат ресурсів і створює основу для сталого розвитку агровиробництва.

Ключові слова: цифровий моніторинг; точне землеробство (ПЗ); геоінформаційні системи (ГІС); телеметрія; дистанційне зондування Землі (ДЗЗ); вегетаційні індекси; NDVI (нормалізований диференціальний вегетаційний індекс); агрохімічний аналіз; картографування; ресурсоефективність; просторовий аналіз; агротехнології.

Рис.: 9. Бібл.: 31.

Актуальність теми дослідження. Зростаюча гетерогенність агроландшафтів, зумовлена природними і техногенними факторами, ускладнює ухвалення агротехнологічних рішень за традиційними схемами. Цифровий моніторинг дозволяє адаптувати землеробські практики до змінних умов, зменшуючи витрати та екологічне навантаження. Тому актуальним є вивчення ефективності цифрових рішень у контексті просторової мінливості сільськогосподарських територій та реальних виробничих умов.

Постановка проблеми. У сучасному аграрному виробництві відбувається стрімкий перехід до інноваційних технологій управління природноресурсним потенціалом, спрямованих на підвищення стійкості, ефективності та екологічності агросистем. В умовах підвищеного кліматичного навантаження та ресурсних обмежень аграрний сектор вимагає застосування рішень, що базуються на точних, просторово обґрунтованих даних. У цьому контексті особливої уваги набуває цифровий моніторинг — як комплексний підхід до збору, обробки й аналізу інформації про стан ґрунтів, посівів та довкілля за допомогою ДЗЗ, ГІС, GPS, телеметрії та сенсорних систем.

Новизна та практична цінність дослідження. Робота відрізняється комплексним застосуванням агрохімічних, проксимальних, дистанційних та телеметричних методів моніторингу для оцінки просторової неоднорідності агроєкосистем на рівні окремих полів у господарствах Чернігівської та Тернопільської областей. Особливістю є поєднання власних польових вимірювань, супутникових знімків Sentinel-2 та телеметричних даних сільськогосподарської техніки з інтеграцією результатів у геоінформаційне середовище для створення тематичних карт і практичних рекомендацій. Отримані результати можуть бути використані для диференційованого внесення добрив, оптимізації маршрутів техніки та своєчасного виявлення стресових зон посівів.

Аналіз останніх досліджень. Упродовж останніх років спостерігається активне зростання кількості наукових праць, присвячених цифровому землеробству, що підтверджується даними з баз Scopus та Web of Science. Зокрема, описують інтеграцію супутникових спостережень з алгоритмами аналізу для підвищення точності прийняття рішень [23], та акцентують увагу на ролі вегетаційних індексів (NDVI, NDRE, SAVI) у діагностиці стану посівів [14; 27]. Вітчизняні науковці зазначають, що впровадження цифрових технологій у фермерських господарствах дозволяє підвищити адаптивність агротехнологій [29], але водночас треба звернути увагу та підкреслити критичну роль якості вхідних даних для моделей машинного навчання в агросфері [16]. Також, доволі є актуальним питання економічної ефективності цифрових систем для малих господарств [30].

Попри позитивні результати досліджень, залишається низка нерозв'язаних проблем: обмежена інтеграція гетерогенних джерел даних у єдині аналітичні платформи; відсутність узагальнених підходів до оцінки точності моделей у різних ґрунтово-кліматичних умовах; недослідженість аспектів масштабованості цифрових рішень у межах України. Відтак виникає потреба у практичній апробації цифрових методів моніторингу в умовах реального виробництва з урахуванням просторової мінливості агроєкосистем.

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом дослідження є агроландшафти як просторово неоднорідні системи. Предметом — цифрові технології моніторингу стану ґрунтів, рослинності та агротехнічних параметрів, включаючи аналіз вегетаційних індексів, агрохімічні дослідження та просторову обробку телеметричних даних.

Мета статті полягає у системному аналізі та практичній оцінці ефективності цифрових методів моніторингу в агровиробництві, з подальшою візуалізацією результатів та формуванням аналітичної основи для прийняття управлінських рішень у точному землеробстві.

Виклад основного матеріалу. Цифровий моніторинг в землеробстві передбачає комплексне використання сучасних технологій для збору, обробки та аналізу даних про стан агроєкосистем. Основними об'єктами моніторингу виступають ґрунт, посіви, погодні умови та сільськогосподарська техніка. Методи, що застосовуються для цього, поєднують класичні підходи агрохімічної діагностики з інноваційними цифровими рішеннями – від автоматизованих сенсорних систем до моделей машинного навчання [23; 26].

Початковим етапом є агрохімічне обстеження ґрунтів, яке передбачає планування точок відбору, їхню геопросторову прив'язку та лабораторний аналіз. У сучасному землеробстві переважає сітковий підхід (grid sampling), де поле ділиться на осередки, а проби беруться в центрі кожної клітини див. (рис. 1). Альтернативою виступає коміркова стратегія див. (рис. 2), за якої здійснюється множинний забір зразків у межах клітинки для більшої точності [31].

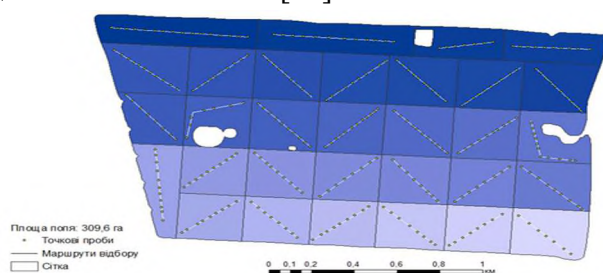


Рис. 1. Коміркова схема відбору проб ґрунту з діагональним ходом [31]

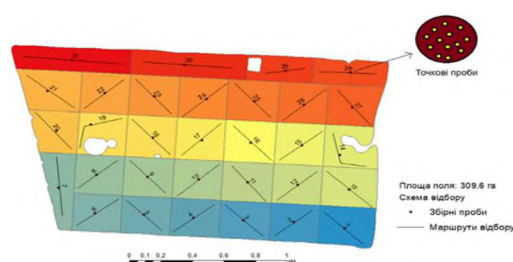


Рис. 2. Точкова схема відбору проб ґрунту [31]

Польовий відбір здійснюється автоматизованими пробовідбірниками, оснащеними GPS та контролерами. Це дозволяє значно підвищити швидкість і точність польових робіт. Відбір ґрунту здійснюється на глибину 0-25 см (для орних земель) і до 60 см при аналізі нітратного азоту [28]. Стандарти відбору регламентуються ДСТУ 4287:2004 та методиками, адаптованими до агроландшафтних умов [17].

Надалі здійснюється просторове моделювання параметрів ґрунту методами IDW-інтерполяції (Inverse Distance Weighting), що забезпечує прогноз значень між точками вимірювання з високою точністю [7].

Поєднання результатів агрохімічних досліджень з ГІС-аналітикою та дистанційним зондуванням забезпечує науково обґрунтоване управління ґрунтовими ресурсами на довгострокову перспективу, див (рис.3).

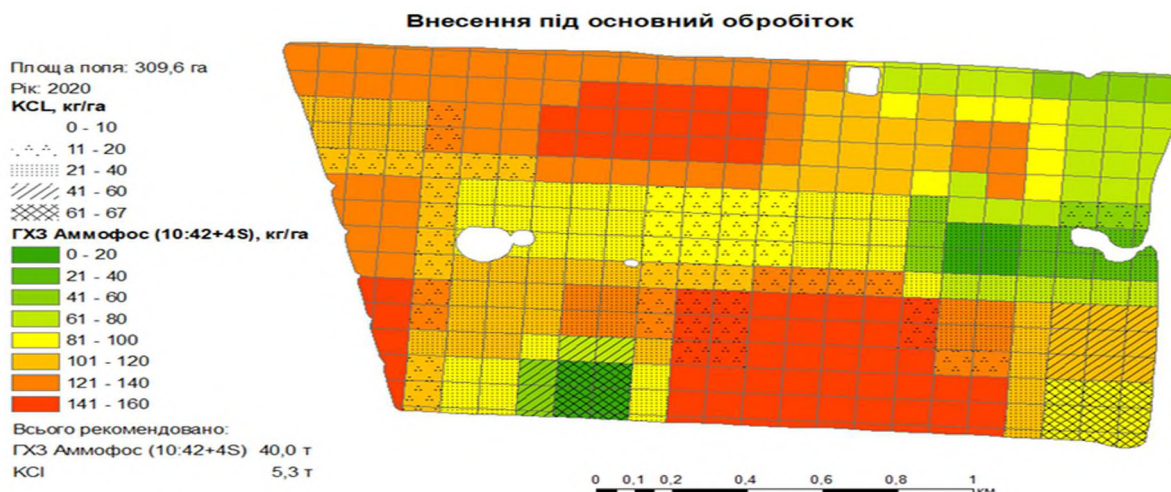


Рис.3. Карта-завдання на внесення добрив для сільськогосподарської техніки, створена на основі ґрунтових показників [31].

Проксимальне зондування ґрунтів (proximal soil sensing) являє собою використання польових сенсорів/датчиків у безпосередній близькості (на відстані менше 2 м від поверхні) або контакті з ґрунтом для швидкого зчитування його властивостей. Такі сенсори можуть бути стаціонарні (встановлені на місці для постійних вимірів) або рухомі (закріплені на транспортному засобі чи платформі для рухомої «on-the-go» зйомки) [8].

Інтеграція сенсорних даних із супутниковою навігацією відкриває принципово нові можливості для просторового картографування ґрунтових властивостей. Використання GNSS-пристроїв, особливо з реальним часом корекції (RTK-GPS) та точністю позиціювання на рівні 1-2 см, дає змогу прив'язувати кожне вимірювання до точних координат і висотних відміток [1]. Установивши на один рухомий агрегат кілька типів сенсорів, можна отримати синхронний набір даних за різними властивостями ґрунту, що дозволяє всебічно оцінювати його стан і точково коригувати агротехнічні операції.

Хоча деякі сучасні датчики безпосередньо вимірюють агрономічно значущі параметри (наприклад, кислотність ґрунту), більшість приладів реєструють проміжні фізико-хімічні характеристики, які потрібно калібрувати лабораторними вимірюваннями [20].

Сучасні проксимальні системи зондування дають змогу оперативно та без лабораторних досліджень оцінювати головні хімічні характеристики ґрунту. Для визначення запасів доступних рослинам макро- (N, P, K, S) та мікроелементів використовуються спектроскопічні методи у видимому, ультрафіолетовому та інфрачервоних (ближньому, середньому) діапазонах, які аналізують відбитий ґрунтом світловий спектр, а також іонно-селективні датчики (ISFET) і електрофоретичні підходи [3]. Кисотно-лужний баланс контролюють виключно іонно-селективними польовими транзисторами, що забезпечують безперервне картографування змін кислотності. Вміст органічної речовини легко оцінити за допомогою тих самих ІЧ-спектроскопічних систем, адаптова-

них для кількісного аналізу вуглецю та гумінових компонентів [22,25]. Проблеми високого вмісту натрію та засоленості ґрунту виявляються через електромагнітну індукцію та вимірювання електричного опору ґрунту, що дозволяє оперативно картувати відповідні хімічні зони.

Для просторового моніторингу ключових фізичних характеристик ґрунту застосовують низку проксимальних сенсорних технологій. Методи електромагнітної індукції та вимірювання електричного опору під час руху агрегату дозволяють оцінити електропровідність ґрунту, що корелює з його вмістом глини, ємністю катіонного обміну та запасом доступної вологи (рис. 6) [11].

Проксимальне зондування доповнює класичні підходи за рахунок використання сенсорів у безпосередній близькості до поверхні ґрунту. Серед найпоширеніших – електромагнітні сенсори (для оцінки електропровідності), спектроскопічні системи (оцінка органічної речовини, рН, вологи), іон-селективні сенсори (рН, натрій) та теплові датчики [22].

Спектроскопія у видимому, ближньому та середньому інфрачервоних діапазонах дає змогу судити про текстуру, вміст органічної речовини та вологість верхніх шарів ґрунту, а термальна інфрачервона зйомка фіксує температурні аномалії, що відображають нерівномірність вологоутримання. Радіолокаційні системи (радарне зондування) та вимірювання тягового опору ґрунтообробних знарядь (tillage draft) використовуються для виявлення субповерхневих перепон – ущільнених шарів або кам'яних включень, що обмежують розвиток кореневої системи. Для оперативного контролю вологи протягом вегетаційного періоду широко впроваджують ґрунтові вологоміри різних типів, а також теплове інфрачервоне дистанційне зондування, що дозволяє в реальному часі стежити за динамікою вологи. Виявлення зон перезволоження й підтоплення здійснюється поєднанням цифрових моделей висот, локальних вимірювань електропровідності та спостережень рівня ґрунтових вод у мініп'езометрах [10].

Автоматизовані пенетрометри застосовуються для лабораторно-польового вивчення явища твердості ґрунту, яка характеризується індексом опору конуса (cone index) і безпосередньо відображає ступінь ущільнення ґрунтової маси. Всередині приладу тензодатчик (strain gauge) або конусний трансдюсер фіксують зміну сили (опору ґрунту) й передає про це інформацію в реєстратор. Паралельно з вимірюваннями виконується GPS-геоприв'язка, що дозволяє отримати просторову карту розподілу твердості за глибиною до 30-50 см із кроком 1-2 см. Відтворюваність результатів забезпечується стандартизацією конусного кута і швидкості занурення, а електронна система реєстрації гарантує високу точність вимірювань і можливість подальшого статистичного та геостатистичного аналізу [21].

Пристрої проксимального зондування — це фактично «розумні» сенсори (вологоміри, датчики електропровідності, рН-зонди тощо), котрі збирають дані безпосередньо в полі. Щоб зробити ці виміри доступними в реальному часі кожен із таких сенсорів підключають до IoT-мережі. Для передачі показників із поля використовують низькошвидкісні, енергоефективні мережі — LoRaWAN (мережа великої дальності та широкого покриття), NB-IoT (вузькосмуговий IoT-речей) тощо, чиї протоколи дозволяють відправляти кілька десятків байт даних через десятки кілометрів без значного споживання енергії [12]. Дані із сенсорів збирає локальний IoT-координатор, а потім через інтернет надсилає на хмарну платформу чи сервер. Там вони агрегуються, обробляються аналітичними алгоритмами та зберігаються в базі даних.

Завдяки IoT-підключенню агроном чи фермер може у будь-який момент побачити показники вологості, температури, електропровідності ґрунту або рівня рН у кожному «вузлі» мережі – навіть із мобільного додатку чи вебпорталу.

Метеомоніторинг – це комплексна система регулярних спостережень, збору, обробки та аналізу даних про стан основних атмосферних параметрів (температура, вологість повітря, опади, швидкість та напрямок вітру, сонячна радіація, тиск тощо) з використанням мережі наземних метеостанцій, радарів, супутникових платформ й автоматичних датчиків.

Традиційні стаціонарні польові метеостанції розміщені безпосередньо на полі чи поблизу нього та безперервно вимірюють ключові метеопказники (температуру повітря, відносну вологість, кількість опадів, швидкість вітру тощо) в одній локації. Вони забезпечують базові дані про мікроклімат господарства та слугують еталонними точками спостереження. Мобільні метеостанції, що встановлюються на транспортних засобах чи БПЛА, доповнюють стаціонарні пункти, дозволяючи збирати дані з різних частин поля на різних висотах. Головна перевага мобільних станцій – висока просторово-часова деталізація даних: рухома платформа забезпечує щільнішу сітку вимірювань мікроклімату по території господарства. Бездротові сенсорні мережі великої кількості дрібних датчиків (сенсорів), встановлюються у ґрунті та над поверхнею по всій площі поля, де кожен сенсор може вимірювати локальні параметри (температуру ґрунту й повітря, вологість, інтенсивність випаровування тощо) у режимі реального часу. Дані передаються бездротовим шляхом на центральну базову станцію. Для такої телеметрії застосовуються енергоощадні далекодіючі радіомережі. Бездротові сенсорні мережі дозволяють аграріям отримувати дані про мікроклімат із різних точок одночасно в режимі реального часу, досягаючи геопросторового охоплення всієї площі поля (на відміну від точкових стаціонарних вимірювань) [6].

Іншим потужним інструментом є дистанційне зондування Землі (ДЗЗ). Оптичні супутники (Sentinel-2, Landsat-8), радарні платформи (Sentinel-1) та гіперспектральні сенсори (Hyperion) дозволяють здійснювати моніторинг вологості, органічної речовини, засолення, NDVI, NDMI та інших індексів. У табл. 1 узагальнено на основі відкритих наукових джерел та систематизовано під потреби оцінки стану ґрунтів і посівів у межах дослідних полів подано порівняльну характеристику різних типів супутникового зондування [9; 19]. Супутникові ДЗЗ-системи, такі як Landsat, Sentinel-2, MODIS та EOS-SAT 1 є базовими інструментами дистанційного моніторингу ґрунтів [29].

Протягом останніх десятиліть супутникові системи значно вдосконалилися. Найважливіші зміни включають:

- збільшення просторової розрізненості — від 80 м у перших супутниках Landsat до < 1 м у сучасних системах, таких як GeoEye, WorldView;
- підвищення частоти повторного знімання — від 18 днів (Landsat) до майже щоденного оновлення даних (2-3 дні) завдяки мережам супутників, таким як Sentinel-2 або PlanetScope;
- розширення спектрального діапазону: сучасні гіперспектральні сенсори, наприклад Hyperion (NASA), здатні фіксувати понад 200 спектральних діапазонів від 400 до 2500 нм із кроком 10 нм з просторовою розрізненістю 30 метрів.

Оптичні супутники (як-от Sentinel-2, Landsat) дозволяють оцінювати вологість ґрунту опосередковано — через спектральні індекси чи температуру поверхні. Наприклад, Landsat 5/7/8 Thermal Infrared Sensor (TIRS) працює в довгохвильовому інфрачервоному діапазоні (близько 10-12 мкм) і реєструє яскравісну температуру поверхні Землі, з якої за допомогою корекцій на емісивність та атмосферу обчислюють температуру земної поверхні (LST) [16; 19].

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика методів супутникового зондування для завдань цифрового моніторингу в точному землеробстві

Параметр	Панхроматичні	Мультиспектральні	Гіперспектральні	Радарні (SAR)
Кількість каналів	1	4-10	100-400	1 (мікрохвильовий)
Тип випромінювання	сонячне (пасивне)	сонячне (пасивне)	сонячне (пасивне)	мікрохвилі (активне)
Чутливість до погоди	висока (непридатні при хмарності > 10%)	висока (залежить від хмарності)	висока	низька (працює за будь-яких умов)
Основні завдання	деталізоване картографування рельєфу; підвищення просторової чіткості за допомогою паншарпенінгу	аналіз біомаси, розрахунок спектральних індексів, моніторинг стан рослин	аналіз неявних змін ґрунтового покриву	моніторинг вологості ґрунту, рельєфу, змін у рослинності
Обмеження	Монохромне зображення	середня точність	дороговартісна обробка, складний аналіз	складна інтерпретація даних

Джерело: власна розробка.

Сучасні технології дистанційного зондування надають аграріям доступ до погодної інформації з супутників, що доповнює наземні вимірювання. Наприклад, глобальні опади сьогодні можна моніторити із використанням супутника NASA GPM (Global Precipitation Measurement) та європейських Sentinel-супутників.

Окрім супутників, важливу роль відіграють чисельні моделі атмосфери та кліматичні реаналізи у прогнозуванні погоди для землеробства. Реаналізи — поєднання модельного прогнозу з усіма доступними спостереженнями (як наземними, так і супутниковими) за тривалий період, що дає погодні дані на регулярній сітці з високою розрізненістю. Приклад — ERA5 від Європейського центру середньострокових прогнозів погоди (ECMWF), що надає погодні параметри (температура, вологість, вітер, опади тощо) на глобальній сітці 30 км з часовим кроком 1 година. Дані ERA5-Land із підвищеною просторовою розрізненістю (до 9 км) на суходолі успішно застосовуються для оцінки зволоження ґрунтів і водного балансу на полях, що важливо для прийняття рішень щодо зрошення [15]. Вони дозволяють проводити ретроспективний аналіз кліматичних ризиків, моделювати розвиток посівів за різних погодних сценаріїв, а також вдосконалювати короткострокові прогнози погоди для конкретних локацій. На основі реаналізів та оперативних моделей національні гідрометслужби і приватні сервіси формують прогнози погоди на кілька днів вперед з прив'язкою до конкретних полів.

Інтернет речей (IoT) сьогодні проникає в агрометеорологію, об'єднуючи мережі сенсорів, бездротовий зв'язок і хмарні технології для автоматизованого збору та аналізу даних про погоду. Бездротова передача даних у польових умовах реалізується за допомогою різних технологій IoT-зв'язку: для відносно невеликих відстаней (десятки метрів) використовуються протоколи на кшталт Bluetooth або Zigbee; для середніх дистанцій (сотні метрів) — Wi-Fi чи Mesh-мережі; а для великих господарств і віддалених датчиків — LPWAN-мережі.

Сучасні платформи агромоніторингу інтегрують різноманітні дані (числові вимірювання, GPS-координати, часові ряди, навіть візуальні зображення) у єдиному інформаційному середовищі. Застосування алгоритмів обробки дозволяє автоматично виявляти тенденції та аномалії. Наприклад, система може в режимі реального часу проаналізувати телеметрію з десятків датчиків вологості ґрунту і на основі заданих порогів генерувати сповіщення про ризик посухи на певній ділянці поля. Або ж, отримавши дані про різке зниження температури на полі, IoT-платформа негайно повідомить фермера про загрозу

заморозків. Таким чином, IoT-технології роблять метеомоніторинг проактивним: не лише фіксують погодні показники, а й одразу перетворюють їх на сигнали для прийняття агротехнічних рішень.

Високоточна оцінка стану посівів також можлива за допомогою БПЛА, оснащених мульти- та гіперспектральними камерами, а також тепловізорами (рис. 4). Вони забезпечують деталізацію до 10...30 см і дозволяють виявляти фітопатологічні стани ще до появи візуальних симптомів [4]. Для автоматизованого виявлення бур'янів та зон ураження культур використовуються згорткові нейронні мережі (CNN), зокрема моделі типу YOLOv3 [26].

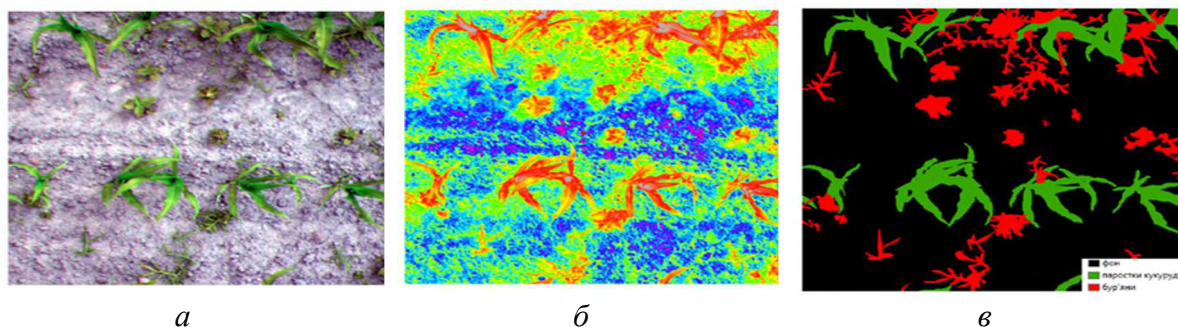


Рис. 4. RGB-знімок (а), удосконалене за допомогою ближнього інфрачервоного і червоного крайового діапазонів зображення (б) та карта семантичної сегментації посівів кукурудзи й бур'янів (в) [26]

Сучасні дослідження у галузі виявлення шкідників здебільшого переходять на глибоке навчання. Згорткові нейронні мережі (CNN) самостійно вчаться виділяти складні ознаки з даних. Для цього теж використовуються БПЛА-знімки. Наприклад, дрони з тепловими та спектральними камерами використовували для моніторингу позначених за допомогою моделі сегментації зображень YOLOv3 клопів-щитників (*T. rapillosa*) у садах [5].

Моделі росту сільськогосподарських культур (crop models) симулюють фізіологію рослин на основі вхідних даних про погоду, ґрунт, сорт культури та прийоми обробітку. Моделі APSIM, DSSAT, AquaCrop тощо широко застосовуються для моделювання цукрових буряків, зернових, олійних культур тощо. У дослідженні 2024 року модель AquaCrop була налагоджена на погодних і ґрунтових даних території Польщі, і кінцева середньоквадратична похибка прогнозу врожайності склала всього від 0,21 до 1,65 % від середнього врожаю (для кукурудзи й цукрових буряків) [18].

Супутникові платформи Copernicus (Sentinel-1, -2), Landsat, високочастотні супутники PlanetScope та БПЛА з мульти- і гіперспектральними камерами забезпечують багаторічні серії зображень рослинності. Модель росту посівів DSSAT з навчальними даними у вигляді індексу LAI дозволила в Меріленді (США) отримати розумно точні прогнози врожаю кукурудзи і сої: при цьому нормалізована середньоквадратична похибка становила 1-20 % від середнього врожаю [13]. У низці досліджень гіперспектральні знімки БПЛА від стадії цвітіння до заповнення зернівки дозволили побудувати моделі, де комбінації спектральних індексів і лінійної регресії забезпечують коефіцієнт детермінації понад 0,62-0,78 для врожайності пшениці [2].

Моделі машинного навчання – алгоритми, що навчаються на історичних даних із супутникових знімків та польових вимірів, дозволяють вивчати складні залежності між вхідними ознаками та урожаєм. Серед них: ансамблевий метод Random Forest (RF), Gradient Boosting, метод опорних векторів (SVM) та глибокі нейронні мережі (CNN для просторових патернів і LSTM/RNN для часових рядів).

Цифровий моніторинг техніки реалізується через телематичні системи (JDLink, TELEMATICS, Trimble). За допомогою GNSS-модулів, сенсорів обертів, тиску та витрат пального можна збирати дані про роботу агрегатів у режимі реального часу (рис. 7). До прикладу для побудови карти витрат пального було застосовано комплексний метод, який поєднує агротехнічні розрахунки, геопросторовий аналіз та статистичну класифікацію, що дозволяє визначити фактичне споживання пального з урахуванням пройденої відстані та ширини захвату техніки (вираз 1).

$$\text{FUEL}_{\text{л/га}} = \frac{\text{FUEL}_{\text{(л)}}}{\text{DISTANCE}_{\text{(м)}} \times \text{SWATHWIDTH}_{\text{(м)}}} \times 10000. \quad (1)$$

Такий метод дає можливість визначити затрати пального та прийняти комплекс обґрунтованих рішень для подальшої економії від обробітку ґрунту до збирання врожаю. Наприклад, аналіз від компанії «Farmonaut» продемонстрував, що телематичні жнивarki досягають зниження витрат пального на понад 16 % при інтегрованому використанні даних телеметрії. Інші дослідження підтверджують, що загальна економія ресурсів (паливно-мастильних матеріалів, ЗЗР, добрив) при переході на системи точного землеробства складає від кількох до десятків відсотків залежно від масштабу ферми і ступеня цифровізації [24].

Дослідження авторами проводилося на полі площею 309,6 гектара, що розташоване поблизу села Берізка у Варвинській ТГ Прилуцького району Чернігівської області, на основі даних агрокомпанії «Кернел» та поле площею 117 гектарів, знаходиться в Тернопільській області неподалік села Шипівці Заліщинського району на основі даних агрокомпанії «Агросем».

Ґрунти поля переважно представлені типовими малогумусними чорноземами та деградованими легкосуглинковими чорноземами, що характеризуються високим аграрним потенціалом, але водночас потребують особливої уваги до збереження їх родючості та структури. Час є критичним фактором для отримання надійних значень показників ґрунту. До прикладу, електропровідність ґрунту залежить від вмісту солей у ґрунтового розчині. Щоб отримати точні вимірювання, необхідно дочекатися, коли концентрація іонів стабілізується після змішування з водою чи іншим розчином.

Систематичний агрохімічний моніторинг ґрунту дає змогу кількісно оцінити просторову й тимчасову мінливість його властивостей (табл. 2). Ці дані лежать в основі диференційованого внесення добрив і захисних заходів, що підвищує ефективність використання ресурсів та зменшує ризики деградації та візуалізуються у вигляді картограм див. (рис. 5, а).

Таблиця 2 – Результати агрохімічного обстеження поля протягом десятиліття

Показник	Метод	Середнє значення [кількість ґрунтових проб]			
		2010	2013	2016	2020
pH (KCl), од.pH	ДСТУ ISO 10390:2019, IDT	6,25 [56]	-	5,84 [31]	5,7 [30]
Органічна речовина, %	ДСТУ 4289:2004	3,96 [11]	3,77 [28]	-	3,7 [30]
Рухомий фосфор (P ₂ O ₅), мг/кг	ДСТУ 4115-2002 (за методом Чирикова)	100,0 [32]	111,0 [59]	146,2 [31]	142,9 [30]
ДСТУ 4115-2002 (за методом Чирикова)	обрані методи випробування («Recommended chemical soil test procedures for the Central North Region. Chapter 7: Potassium and other Basic Cations» by D. Warncke and J.R. Brown)	105,5 [32]	100,5 [59]	106,5 [31]	121,2 [30]

Джерело: дані, надані агрокомпанією «Кернел»

Одним із найпростіших методів отримання картографічних даних для прецизійного землеробства є інтерполяція — метод математичного прогнозування значень у невідомих точках на основі вимірних значень у відомих точках див.(рис.5б). Також широко використовується геостатистика, адже неможливо зробити аналіз кожного квадратного метра поля. Тому інтерполяційні та геостатистичні методи дозволяють оцінювати просторовий розподіл параметрів із меншою кількістю польових вимірювань, тобто при більших розмірах комірки сітки, зберігаючи при цьому високу точність прогнозів. Наразі існують й інші технології, за допомогою яких можна провести агрохімічне обстеження ґрунтового покриття. Наприклад, експрес-тести для аналізу ґрунту базуються на кольорових реакціях. Їхня точність часто залишає бажати кращого через швидке здійснення, що породжує нехтування всіма вимогами з коректного відбору ґрунтової проби, їх зберігання, висушування, подрібнення тощо.



Рис.5. Просторове моделювання вмісту калію: точкові результати визначення вмісту калію у ґрунті (а), картограма розподілу вмісту калію, створена методом інтерполяції IDW (Inverse Distance Weighting) (б)

Джерело: власна розробка

На (рис.6) представлено картограму електропровідності ґрунту, створену на основі даних проксимального зондування, яке проводилося на полі із застосуванням польового сенсора. Метод вимірювання базувався на принципі електромагнітної індукції та дозволив отримати просторово-деталізовану картину розподілу електропровідності в межах усього масиву. Отримані значення варіюються в діапазоні від 2,21 до понад 31,8 мСм/см, що свідчить про виражену неоднорідність ґрунтового покриття.

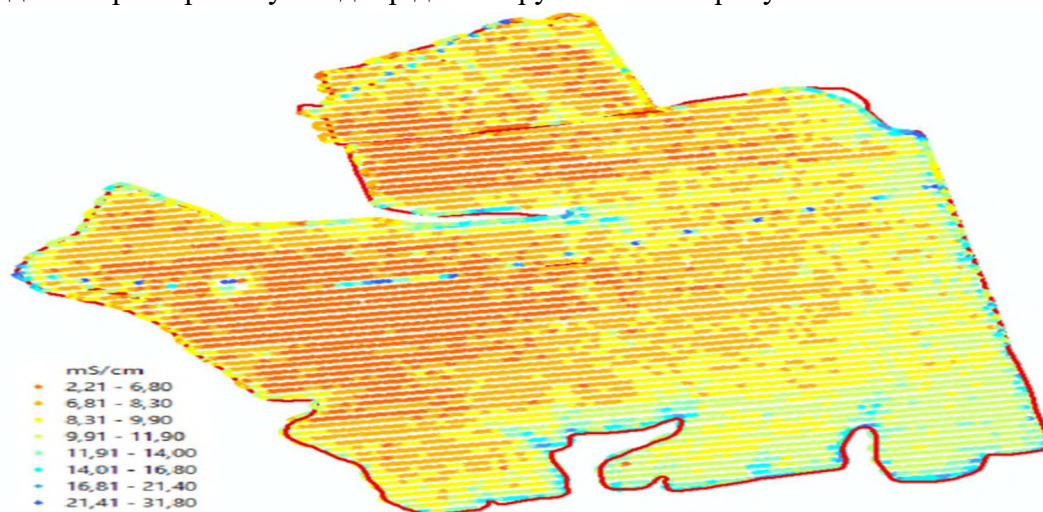


Рис. 6. Картограма електропровідності ґрунту

Джерело: власно розробка.

Електропровідність (ЕС) є інтегральним індикатором, який корелює з вологістю ґрунту, вмістом глинистих фракцій, ступенем засоленості, щільністю та катіонно-обмінною ємністю. Просторове зонування, яке спостерігається на картограмі, відображає зміну фізико-хімічних властивостей у межах одного поля, що може бути зумовлено як природними чинниками (рельєф, склад ґрунтоутворювальних порід), так і впливом господарської діяльності (ущільнення, нерівномірне зволоження, залишки добрив).

Наявність стабільних зон з низькою електропровідністю (до 6,3 мСм/см) свідчить про легкі за механічним складом ґрунти з низькою вологістю або недостатньою структурністю. Водночас підвищені значення (понад 16 мСм/см) можуть вказувати на важкі ґрунти з підвищеним вмістом глини, органіки або надмірною вологістю, зокрема в зонах водозатримання.

Отримані результати є основою для агрозонування поля та створення карт-завдань у системах точного землеробства. Зокрема, інформація про електропровідність може бути використана для планування диференційованого внесення добрив, змінної глибини обробітку ґрунту, регулювання норми висіву та інших адаптивних агротехнологій. Просторова структура, зафіксована на картограмі, підтверджує ефективність використання проксимального зондування як інструменту оперативної агродіагностики без потреби у масовому лабораторному аналізі. Таким чином, застосування подібних карт дозволяє приймати обґрунтовані рішення з підвищення ефективності господарювання на рівні окремого поля.

Цифровий моніторинг сільськогосподарської техніки передбачає постійне автоматизоване спостереження за параметрами роботи машин (тракторів, комбайнів, агрегатів) з використанням телематики та мережевих датчиків. Він дозволяє прогнозувати зношення, виявляти аномалії та підвищувати ефективність використання техніки (рис. 7).

Ель Гаучо_Шипівці_Поле 601_Harvest_2022-10-09_00							
FID	DISTANCE	SWATHWIDTH	SECTIONID	Time	Heading	Machine	
4786	2,801074	11,2	5438	10/9/2022 4:04:23 PM	4,058516	1	
4785	2,825074	11,2	5438	10/9/2022 4:04:22 PM	5,045803	1	
4784	2,801074	11,2	5438	10/9/2022 4:04:21 PM	8,148354	1	
4783	2,837074	11,2	5438	10/9/2022 4:04:20 PM	9,801734	1	
4802	2,779267	11,2	5438	10/9/2022 4:04:39 PM	21,82332	1	
4773	2,829074	11,2	5438	10/9/2022 4:04:10 PM	23,247889	1	
4772	2,820074	11,2	5438	10/9/2022 4:04:09 PM	26,136092	1	
4771	2,820074	11,2	5438	10/9/2022 4:04:08 PM	29,375876	1	
4770	2,813074	11,2	5438	10/9/2022 4:04:07 PM	32,145227	1	
834	2,598622	11,2	5438	10/9/2022 2:33:31 PM	40,215181	1	
22839	1,911138	11,2	9102	10/10/2022 10:14:33 AM	41,96607	1	
827	2,734621	11,2	5438	10/9/2022 2:33:24 PM	42,184625	1	
826	2,712622	11,2	5438	10/9/2022 2:33:23 PM	42,599272	1	
833	2,645621	11,2	5438	10/9/2022 2:33:30 PM	42,731721	1	
824	2,743622	11,2	5438	10/9/2022 2:33:21 PM	43,341163	1	
825	2,682622	11,2	5438	10/9/2022 2:33:22 PM	43,56747	1	
817	2,645621	11,2	5438	10/9/2022 2:33:14 PM	43,794608	1	
829	2,688621	11,2	5438	10/9/2022 2:33:26 PM	43,919391	1	
828	2,690622	11,2	5438	10/9/2022 2:33:25 PM	44,129977	1	
831	2,662622	11,2	5438	10/9/2022 2:33:28 PM	44,63776	1	
830	2,638622	11,2	5438	10/9/2022 2:33:27 PM	44,794394	1	
832	2,631622	11,2	5438	10/9/2022 2:33:29 PM	45,044442	1	
816	2,412622	11,2	5438	10/9/2022 2:33:13 PM	45,380211	1	
22840	1,850138	11,2	9102	10/10/2022 10:14:34 AM	46,232146	1	
1930	2,272695	11,2	5438	10/9/2022 2:58:30 PM	46,973827	1	

Рис.7. Зібрані зі зернозбирального комбайну (John Deere моделі: s770 , s670) дані про траєкторію руху та орієнтацію техніки в полі, контроль ширини захвату, автоматичне відключення секцій та часові мітки запису, необхідні для синхронізації телеметрії з іншими даними (дані, надані агрокомпанією Agroseм)

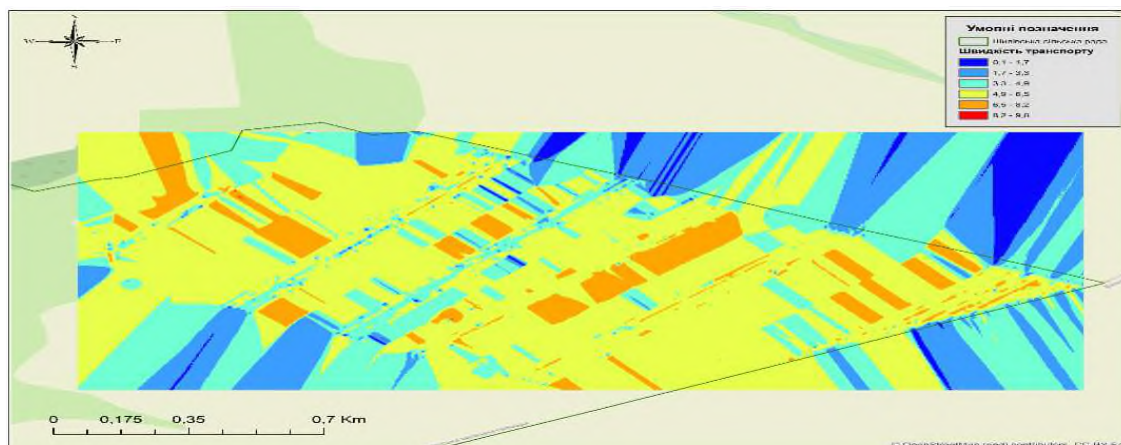


Рис. 8. Картограма щільності проходів сільськогосподарської техніки, побудована авторами на основі GPS-даних телеметрії, методика зонування та візуалізації у середовищі ГІС (Джерело: власна розробка)

На рис. 8 зображено картограму щільності проходів сільськогосподарської техніки, побудовану на основі телеметричних GPS-даних, отриманих під час виконання агротехнічних операцій на полі. Візуалізація відображає кількість проходів техніки в різних зонах поля за допомогою кольорової шкали. Найменша кількість проходів (від 0,1 до 3,2) позначена синіми та блакитними відтінками. Ці ділянки могли бути оброблені лише один раз або залишитися поза увагою техніки. Жовті та світло-зелені зони (4,3–6,5 проходів) відповідають основній масі поля, де техніка рухалась стабільно та без надмірних перекриттів. Водночас червоні та оранжеві області (8,7–9,8 проходів) вказують на зони з надмірною кількістю проходів, що, ймовірно, є результатом повторних обробок, розворотів або нераціонального маршруту. Такий просторовий аналіз дозволяє виявити проблемні ділянки поля, оптимізувати логістику руху машин, зменшити витрати пального та рівномірно розподіляти агротехнічні навантаження. Картограма є важливим інструментом у системі точного землеробства, оскільки забезпечує візуальне представлення ефективності роботи техніки та дозволяє формувати рекомендації для автоматизованого планування маршрутів у наступних сезонах.

Завдяки геоінформаційним системам (рис. 9) можна візуалізувати карти затрат палива для ухвалення ефективних рішень.

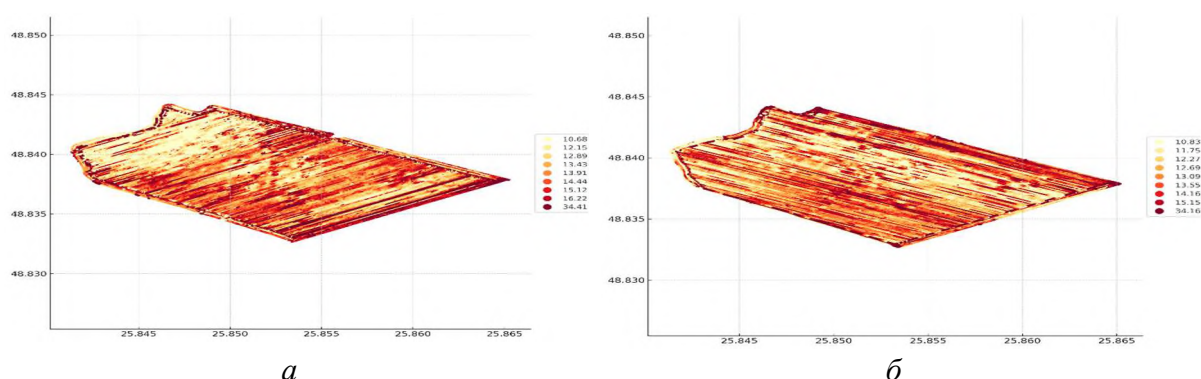


Рис. 9. Карти витрат пального для поля площею 117 га за 2021 та 2023 роки, побудовані авторами на основі телеметричних даних, наданих агрокомпанією «Агросем»

Джерело: власна розробка.

У результаті просторового аналізу телеметричних даних, зібраних під час виконання польових робіт у 2021 та 2023 роках на полі було виявлено суттєву зміну структури витрат пального, що свідчить про підвищення ефективності роботи сільськогосподарської техніки з часом (табл. 3).

Таблиця 3 – Витрати пального за даними геопросторового аналізу за 2021 та 2023 р. (дані, надані агрокомпанією Agrosem)

Клас	Середні витрати пального 2023 (л/га)	Середні витрати пального 2021 (л/га)	Різниця між (2023–2021) л/га
1	10,83	10,68	+0,15
2	11,75	12,15	-0,40
3	12,27	12,89	-0,62
4	12,69	13,43	-0,74
5	13,55	14,44	-0,89
6	14,16	15,12	-0,96
7	15,15	16,22	-1,07
8	34,16	34,41	-0,25

Джерело: власна розробка.

Згідно з аналізом отриманих теплових карт витрат пального за 2021 та 2023 роки, у 2023 році показники енергоспоживання на гектар виявилися нижчими в усіх класах, за винятком найнижчого (клас 1), що свідчить про вдосконалення технологічних процесів. Найбільш суттєве зменшення спостерігалось у класах з високими витратами пального, що вказує на впровадження змін у логістиці польових робіт: оптимізацію маршрутів техніки, уникнення перекриттів, а також покращення роботи обладнання, що зменшило навантаження на двигуни та підвищило енергоефективність.

Просторовий розподіл витрат пального у 2023 році був значно впорядкованішим порівняно з 2021 роком. На теплових картах чітко окреслювалися зони з різним рівнем витрат, що вказує на вищу узгодженість між картами-завдань і реальним виконанням робіт. Це, ймовірно, стало результатом аналізу телеметричних даних попередніх сезонів і їх подальшого використання для точного планування операцій. У 2021 році розподіл витрат був хаотичнішим і не демонстрував чіткої зональності, що ускладнювало прийняття диференційованих управлінських рішень на рівні поля.

Динаміка просторової варіативності витрат пального є не лише індикатором ефективності використання техніки, а й основою для подальшого планування в межах концепції точного землеробства. Дані про енергоспоживання можуть використовуватися для створення карт-завдань, адаптованих під окремі ділянки поля. Це дозволяє зменшити витрати пального, добрив, часу та інших ресурсів, одночасно знижуючи негативний вплив на довкілля.

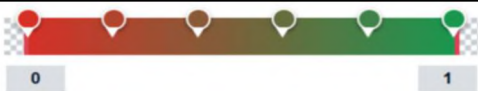
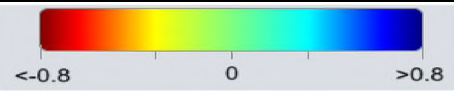
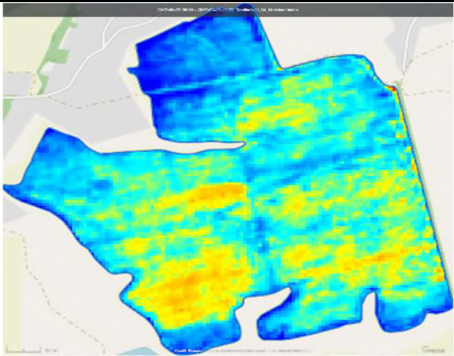
Паралельно з телеметриєю все ширше впроваджуються технології дистанційного зондування, які дають змогу оцінювати стан посівів і агроландшафту з різною просторовою деталізацією. Супутникові платформи забезпечують регулярний моніторинг великих площ, дозволяючи відстежувати стан рослин за допомогою часових рядів і виявляти зміни у вегетації. Вони особливо корисні на рівні поля або групи полів, де потрібна оперативність в ухваленні рішень.

Для локального моніторингу з високою точністю застосовуються безпілотні літальні апарати з мульти- і гіперспектральними сенсорами. Вони дозволяють виявляти проблемні ділянки - дефіцит поживних речовин, ураження шкідниками чи хворобами — ще до появи візуальних ознак. Теплові камери, встановлені на дронах або літаках, вимірюють температуру рослинного покриву, що є важливим показником водного стресу, транспірації та загального фізіологічного стану культур.

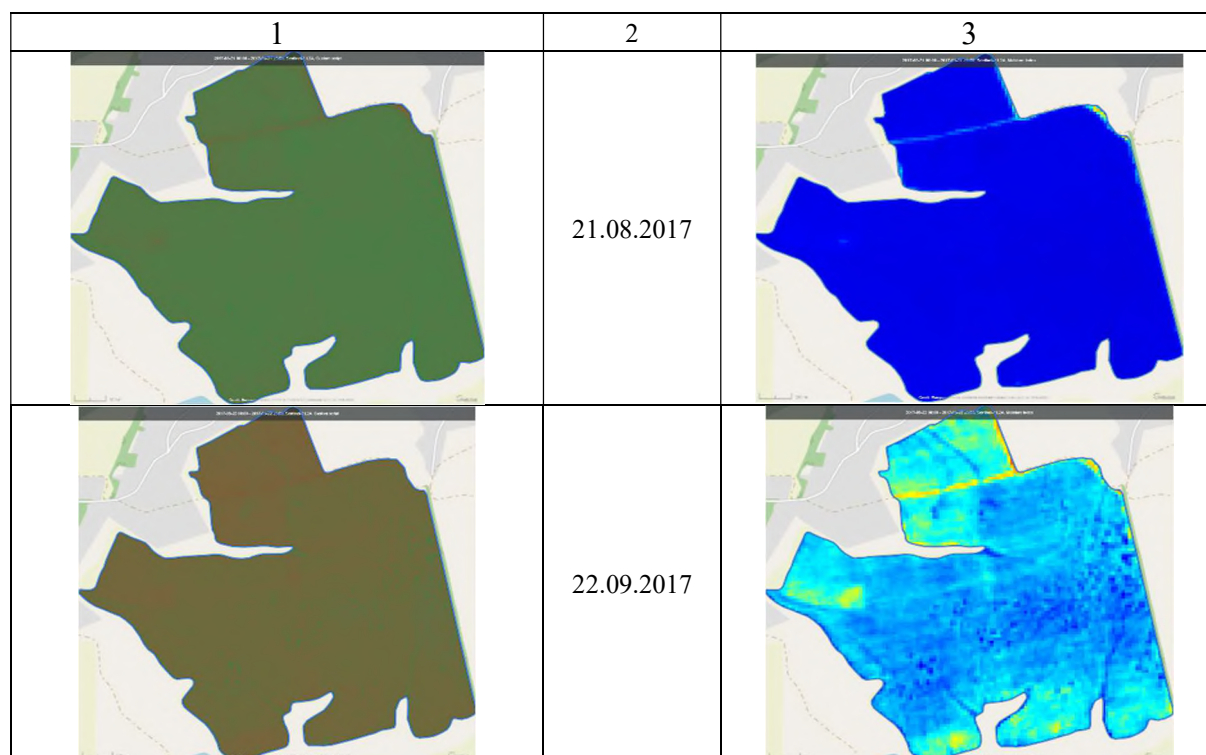
Спектральний аналіз у ближньому інфрачервоному діапазоні (700–1300 нм) дає змогу оцінювати площу листового апарату та загальний стан фотосинтетичних структур рослин. Найбільш поширеним показником є NDVI, що відображає співвідношення між поглинанням червоного світла та відбиттям інфрачервоного й дозволяє визначати інтенсивність росту та стан рослинного покриву. Для комплексної оцінки зволоженості використовується індекс NDMI, який чутливий до вмісту води в рослинах і ґрунті та допомагає виявляти періоди водного стресу. Поєднане використання NDVI та NDMI підвищує точність моніторингу посівів, дає змогу ідентифікувати фази активного росту та визначати потребу у зрошенні чи внесенні добрив (див. Таблицю 4). Моделі розвитку сільськогосподарських культур математично описують ріст рослин, баланс води та поживних речовин, фазову фенологію і реакцію культури на стреси (посуха, дефіцит азоту тощо) та хвороби. Наприклад, DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) — набір узгоджених моделей вирощування понад 40 сільськогосподарських культур, призначений для оцінки впливу погодних, ґрунтових, генетичних і управлінських факторів на врожайність.

Після інфікування рослин коливання спектральної відбивності, текстури або температури можуть бути виявлені аналізом знімків. БПЛА-платформи, обладнані гіперспектральними камерами, дозволяють побачити зміни кольору листя, пігментації та температури, спричинені хворобами та дають унікальні спектральні відбитки: використання гіперспектра дозволяє фіксувати ці «відбитки» на ранніх стадіях.

Таблиця 4 – Динаміка значень NDVI та NDMI для дослідного поля у Чернігівській області під кукурудзою на зерно на різних етапах вегетації (29.06–22.09.2017)

NDVI 1	Дата 2	NDMI 3
		
	29.06.2017	
	22.07.2017	

Закінчення табл. 4



Джерело: власна розробка

Динаміка вегетаційних індексів NDVI та NDMI упродовж вегетаційного періоду кукурудзи на зерно у Чернігівській області (29.06–22.09.2017 р.) відображає зміни фізіологічного стану посівів та рівня зволоження ґрунту. На початковому етапі (29.06.2017) NDVI становив 0,56, NDMI — 0,28, що відповідає фазі активного наростання листової маси. У середині сезону (22.07.2017) зафіксовано максимальні значення індексів (NDVI — 0,79; NDMI — 0,42), які свідчать про найвищу фотосинтетичну активність та оптимальний водний режим. Під час формування врожаю (21.08.2017) спостерігалось зниження NDVI до 0,73 та NDMI до 0,36, що може бути пов'язано з частковим водним стресом і початком дозрівання. Наприкінці сезону (22.09.2017) індекси зменшилися до 0,48 та 0,22 відповідно, що відображає завершення вегетаційних процесів і зменшення біомаси. Така динаміка дозволяє ідентифікувати періоди максимального росту та вразливості культури, що є основою для коригування агротехнічних заходів.

Паралельний аналіз NDMI, який є чутливим до змін вологості рослинного покриву та ґрунту, показав подібну загальну тенденцію, але з більш вираженими коливаннями у періоди недостатнього зволоження. Зростання індексу від 0,28 на початку сезону до максимуму 0,42 у фазі активного росту свідчить про сприятливий водний режим у цей період. Подальше зниження NDMI до 0,36 під час формування врожаю та до 0,22 наприкінці сезону вказує на поступове виснаження запасів води та можливий прояв водного стресу, що корелює зі спостереженнями зниження NDVI. Це підкреслює доцільність поєднання обох індексів для комплексної оцінки стану посівів.

Отже, поєднання даних цифрового моніторингу створює надійну базу для побудови адаптивної системи управління агротехнологіями. Завдяки цьому аграрії отримують змогу оперативно реагувати на зміну умов, планувати обробіток із врахуванням просторової неоднорідності та поступово впроваджувати принципи точного, ресурсоефективного та екологічно орієнтованого землеробства.

Висновки. Комплексне застосування агрохімічного, проксимального, телеметричного та дистанційного моніторингу дозволило виявити просторову неоднорідність ґрунтових та біофізичних характеристик дослідних полів, а також оцінити ефективність використання сільськогосподарської техніки.

Агрохімічний аналіз показав суттєві відмінності у вмісті елементів живлення та кислотності ґрунту навіть у межах одного поля. Такі результати підтверджують необхідність впровадження зонального управління родючістю, що дозволяє уникнути як надлишкового, так і недостатнього внесення добрив.

Дані проксимального зондування (електропровідність) виявили чітко окреслені зони з різними фізико-хімічними властивостями ґрунту. Встановлено, що високі значення електропровідності корелюють з важкими ґрунтами та зонами накопичення вологи, тоді як низькі значення характерні для легких ґрунтів з підвищеним ризиком посухи. Це створює підґрунтя для адаптивного планування глибини обробітку, поливу та норм внесення добрив.

Телеметричний моніторинг техніки засвідчив наявність локальних ділянок з надлишковими проходами агрегатів, що негативно впливає на структуру ґрунту і збільшує енерговитрати. Порівняння даних 2021 та 2023 років показало, що після оптимізації маршрутів та використання карт-завдань вдалося зменшити витрати пального на більшості ділянок, особливо у зонах з початково високим споживанням, що підтверджує ефективність інтеграції телеметрії в управлінські процеси.

Дистанційний аналіз посівів за супутниковими знімками Sentinel-2 та індексами NDVI/NDMI дозволив визначити фази активного росту та періоди водного стресу культур. Встановлено, що критичною фазою з точки зору водного забезпечення є період формування врожаю в період серпня поточних років, коли NDMI знизився на 14 % від пікового значення. Це дає змогу заздалегідь планувати зрошення та агротехнічні заходи для зменшення негативного впливу стресу на врожайність.

Інтеграція результатів у єдиному ГІС-середовищі забезпечила можливість просторової візуалізації ключових показників і формування карт-завдань для диференційованого внесення добрив та оптимізації руху техніки. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність використання ресурсів, знизити витрати пального та мінімізувати негативний вплив на довкілля, що відповідає принципам точного та ресурсоефективного землеробства.

Список використаних джерел

1. Alif, M., & Hussain, M. (2024). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 32, 100785. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100785>.
2. Akumaga, U., Gao, F., Anderson, M., Dulaney, W. P., Houborg, R., Russ, A., & Hively, W. D. (2023). Integration of Remote Sensing and Field Observations in Evaluating DSSAT Model for Estimating Maize and Soybean Growth and Yield in Maryland, USA. *Agronomy*, 13(6), 1540. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061540>.
3. Archbold, G., Parra, C., Carrillo, H., & Mouazen, M. A. (2023). Towards the implementation of ISFET sensors for in-situ and real-time chemical analyses in soils: A practical review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 209, 107828. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107828>.
4. Celikkan, U., Duran, T., & Kaya, Y. (2024). Early detection of plant stress using UAV-based thermal and hyperspectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 213, 108145. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108145>.
5. Chen, C.-J., Huang, Y.-Y., Li, Y.-S., Chen, Y.-C., Chang, C.-Y., & Huang, Y.-M. (2021b). Identification of fruit tree pests with deep learning on embedded drone to achieve accurate pesticide spraying. *IEEE Access*, 9, 21986–21997. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3056082>.
6. Chodorek, A., Mazur, M., & Adamczyk, B. (2021). Wireless sensor networks in precision agriculture: State-of-the-art and future directions. *Agricultural Systems*, 191, 103152. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103152>.

7. Farmaha, B. S., Guzman, J., & Ferguson, R. B. (2020). Spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Geoderma*, 370, 114343. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114343>.
8. Gebbers, R. (2018). Proximal soil surveying and monitoring techniques. In *Precision agriculture for sustainability* (pp. 29–78). London: Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.1201/9781351114592>.
9. Graldi, F., Martínez, J. F., & Skok, M. (2023). Advances in satellite-based soil moisture estimation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 117, 103249. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103249>.
10. Grains Research and Development Corporation. (2023, March). Proximal soil sensing systems fact sheet. *Grains Research and Development Corporation*. https://grdc.com.au/__data/assets/pdf_file/0039/585669/GRDC_ProximalSoilSS_FS2211_Screen.pdf.
11. Hawkins S. E., Mueller, T. G., & Shearer, S. A. (2017). Use of electromagnetic induction for soil mapping. *Computers and Electronics in Agriculture*, 136, 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.02.005>.
12. Hrdličková, Z. (2025). Application of IoT in agroecosystems: A review of sensor integration and communication protocols. *Agronomy*, 15(2), 321. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020321>.
13. Li, Z., Wang, X., & Zhang, H. (2022). Remote sensing and crop simulation model coupling for yield prediction. *Field Crops Research*, 285, 108606. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108606>.
14. Mahlein, A. K., Behmann, J., Kusk, M. T., & Kersting, K. (2024). Machine learning in plant stress detection: State-of-the-art and future prospects. *Computers and Electronics in Agriculture*, 212, 108005. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108005>.
15. Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., & Agustí-Panareda, A. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13, 4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>.
16. Nikolaou, A., Papadopoulos, F., & Tsaniklidis, G. (2023). Multispectral and thermal UAV data for crop stress assessment. *Sensors*, 23(3), 712. <https://doi.org/10.3390/s23030712>.
17. National Scientific Centre “Institute of Soil Science and Agrochemistry named after O. N. Sokolovskiy”. (2005). Soil quality: Method for determining potassium buffering capacity (DSTU 4375:2005). Author.
18. Panek-Chwastyk, M., Kowalski, P., & Wójcik-Gront, E. (2024). Simulation of sugar beet and maize yield using AquaCrop model under Polish conditions. *European Journal of Agronomy*, 140, 126681. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126681>.
19. Reddy, S. N., Manikiam, B., & Jeevalakshmi, D. (2017). Land surface temperature retrieval from LANDSAT data using emissivity estimation. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(21), 9679–9687.
20. Schirrmann, M. (2011). Evaluation of mobile sensor platforms for soil mapping. *Sensors*, 11(7), 6380–6398. <https://doi.org/10.3390/s110706380>.
21. Scholz, M., Gebbers, R., & Duttman, R. (2014). Evaluation of a penetrometer-based soil strength measurement system. *Soil and Tillage Research*, 136, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.012>.
22. Sinha, S., & Pal, T. (2022). A comprehensive review of FET-based pH sensors: Materials, fabrication technologies, and modeling. *Electrochem Science Advances*, 2, e202100147. <https://doi.org/10.1002/elsa.202100147>.
23. Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*, 12(19), 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>.
24. European Commission. (2024). The Environmental Benefits of Digital Agriculture. *European Commission Report*. <https://ec.europa.eu/environment/agriculture-digital-benefits-2024>.
25. Van Wesemael, B., Montanarella, L., & Jones, R. J. A. (2024). Soil monitoring in Europe: The role of remote sensing. *Science of the Total Environment*, 856, 159931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159931>.
26. WeedsGalore Dataset. (2025). Annotated aerial dataset for weed and crop classification. <https://www.weedsgalore-dataset.org>.

27. Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>.
28. Яцук І. П., Балюк С. А. Методика проведення агрохімічної паспортизації сільськогосподарських угідь. 2-ге вид., 108 с. Київ: Державна установа «Інститут охорони ґрунтів України», 2019.
29. Зацерковний, В. ., & Ворох, В. (2024). Диференційні технології прецизійного землеробства. *Технічні науки та технології*, (1 (35), 292–301. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-292-301](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-292-301).
30. Semeniaka, V., Zatserkovnyi, V., Vorokh, V., Ilyin, L., & Mironchuk, T. (2024). Differential technologies for precision agriculture. *У International conference of young professionals «geoterrace-2024»* (с. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510098>.
31. Zatserkovnyi, V., Vorokh, V., Hloba, O., Mironchuk, T., & Siuiva, I. (2025b). *Soil monitoring in precision farming technologies* [Моніторинг ґрунтів у технологіях точного землеробства]. In *XVIII International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”* (14–17 April, Kyiv). <https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2025/04/Mon25-057.pdf>.

References

1. Alif, M., & Hussain, M. (2024). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 32, 100785. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100785>.
2. Akumaga, U., Gao, F., Anderson, M., Dulaney, W. P., Houborg, R., Russ, A., & Hively, W. D. (2023). Integration of Remote Sensing and Field Observations in Evaluating DSSAT Model for Estimating Maize and Soybean Growth and Yield in Maryland, USA. *Agronomy*, 13(6), 1540. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061540>.
3. Archbold, G., Parra, C., Carrillo, H., & Mouazen, M. A. (2023). Towards the implementation of ISFET sensors for in-situ and real-time chemical analyses in soils: A practical review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 209, 107828. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107828>.
4. Celikkan, U., Duran, T., & Kaya, Y. (2024). Early detection of plant stress using UAV-based thermal and hyperspectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 213, 108145. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108145>.
5. Chen, C.-J., Huang, Y.-Y., Li, Y.-S., Chen, Y.-C., Chang, C.-Y., & Huang, Y.-M. (2021b). Identification of fruit tree pests with deep learning on embedded drone to achieve accurate pesticide spraying. *IEEE Access*, 9, 21986–21997. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3056082>.
6. Chodorek, A., Mazur, M., & Adamczyk, B. (2021). Wireless sensor networks in precision agriculture: State-of-the-art and future directions. *Agricultural Systems*, 191, 103152. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2021.103152>.
7. Farmaha, B. S., Guzman, J., & Ferguson, R. B. (2020). Spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Geoderma*, 370, 114343. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114343>.
8. Gebbers, R. (2018). Proximal soil surveying and monitoring techniques. In *Precision agriculture for sustainability* (pp. 29–78). London: Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.1201/9781351114592>.
9. Galdi, F., Martínez, J. F., & Skok, M. (2023). Advances in satellite-based soil moisture estimation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 117, 103249. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103249>.
10. Grains Research and Development Corporation. (2023, March). Proximal soil sensing systems fact sheet. *Grains Research and Development Corporation*. https://grdc.com.au/__data/assets/pdf_file/0039/585669/GRDC_ProximalSoilSS_FS2211_Screen.pdf.
11. Hawkins S. E., Mueller, T. G., & Shearer, S. A. (2017). Use of electromagnetic induction for soil mapping. *Computers and Electronics in Agriculture*, 136, 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.02.005>.
12. Hrdličková, Z. (2025). Application of IoT in agroecosystems: A review of sensor integration and communication protocols. *Agronomy*, 15(2), 321. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020321>.

13. Li, Z., Wang, X., & Zhang, H. (2022). Remote sensing and crop simulation model coupling for yield prediction. *Field Crops Research*, 285, 108606. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108606>.
14. Mahlein, A. K., Behmann, J., Kuska, M. T., & Kersting, K. (2024). Machine learning in plant stress detection: State-of-the-art and future prospects. *Computers and Electronics in Agriculture*, 212, 108005. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108005>.
15. Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., & Agustí-Panareda, A. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13, 4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>.
16. Nikolaou, A., Papadopoulos, F., & Tsaniklidis, G. (2023). Multispectral and thermal UAV data for crop stress assessment. *Sensors*, 23(3), 712. <https://doi.org/10.3390/s23030712>.
17. National Scientific Centre “Institute of Soil Science and Agrochemistry named after O. N. Sokolovskiy”. (2005). Soil quality: Method for determining potassium buffering capacity (DSTU 4375:2005). Author.
18. Panek-Chwastyk, M., Kowalski, P., & Wójcik-Gront, E. (2024). Simulation of sugar beet and maize yield using AquaCrop model under Polish conditions. *European Journal of Agronomy*, 140, 126681. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126681>.
19. Reddy, S. N., Manikiam, B., & Jeevalakshmi, D. (2017). Land surface temperature retrieval from LANDSAT data using emissivity estimation. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(21), 9679–9687.
20. Schirrmann, M. (2011). Evaluation of mobile sensor platforms for soil mapping. *Sensors*, 11(7), 6380–6398. <https://doi.org/10.3390/s110706380>.
21. Scholz, M., Gebbers, R., & Duttman, R. (2014). Evaluation of a penetrometer-based soil strength measurement system. *Soil and Tillage Research*, 136, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.012>.
22. Sinha, S., & Pal, T. (2022). A comprehensive review of FET-based pH sensors: Materials, fabrication technologies, and modeling. *Electrochem Science Advances*, 2, e202100147. <https://doi.org/10.1002/elsa.202100147>.
23. Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*, 12(19), 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>.
24. European Commission. (2024). The Environmental Benefits of Digital Agriculture. *European Commission Report*. <https://ec.europa.eu/environment/agriculture-digital-benefits-2024>.
25. Van Wesemael, B., Montanarella, L., & Jones, R. J. A. (2024). Soil monitoring in Europe: The role of remote sensing. *Science of the Total Environment*, 856, 159931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159931>.
26. WeedsGalore Dataset. (2025). Annotated aerial dataset for weed and crop classification. <https://www.weedsgalore-dataset.org>.
27. Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>.
28. Yatsuk, I. P., & Balyuk, S. A. (2019). Metodyka provedennia ahrokhimichnoi pasportyzatsii silskohospo-darskykh uhid [Methodology for conducting agrochemical certification of agricultural land (2nd ed., 108 pp.)]. State Institution "Institute of Soil Protection of Ukraine. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.1.2019>.
29. Zatserkovnyi, V. I., & Vorokh, V. V. (2024). Dyferentsiini tekhnolohii pretsyziinoho zemlerobstva [Differential technologies of precision agriculture]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Engineering sciences and technologies*, 1(35), 292–301. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-292-301](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-292-301).
30. Zatserkovnyi, V. I., Vorokh, V. V., Samko, M. V., & Ilchenko, A. S. (2025). Monitoring using UAVs in precision farming technologies. Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, XVIII, Kyiv. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510098>.
31. Zatserkovnyi, V., Vorokh, V., Hloba, O., Mironchuk, T., Siuiva, I. (2025 6). Soil monitoring in precision farming technologies. XVIII International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”, 14-17 April, Kyiv. Retrieved from <https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2025/04/Mon25-057.pdf>.

Отримано 19.08.2025

Victor Vorokh¹, Olga Hloba²¹graduate student of the Department of Geoinformatics

Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)

E-mail: fainkucha@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-0112-8422>²master of Science of the Department of Geoinformatics

Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)

E-mail: olgagloba73@knu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-4923-3374>

METHODS AND TECHNOLOGIES OF DIGITAL MONITORING IN AGRICULTURE

Digital monitoring is a key tool in the development of precision agriculture, providing timely assessment of the state of agroecosystems and enabling spatially justified management of technological processes. Under conditions of increasing resource pressure, climate change, and variability of soil conditions, there is a need for a comprehensive analysis of parameters influencing crop yields. The relevance of this research lies in the necessity of implementing innovative digital technologies in agriculture, which can improve production efficiency, adaptability to environmental conditions, and reduce resource losses.

The main approaches applied include agrochemical analysis (nitrogen, phosphorus, potassium content, acidity), spatial sensing of soil electrical conductivity to detect structural differences, as well as remote sensing using Sentinel-2 satellite data for calculating the NDVI vegetation index. Additionally, telemetry data from field machinery were used, which made it possible to assess the efficiency of technological operations, particularly mapping fuel consumption.

The results obtained are presented in the form of thematic maps and tables illustrating the spatial variability of key indicators. The study revealed significant heterogeneity of soil characteristics within a single field, confirmed by both agrochemical results and electrical conductivity indicators. Spatial differences in NDVI values indicate heterogeneous crop development caused by a combination of soil, climatic, and technological factors. Analysis of telemetry data revealed trends toward route optimization and rationalization of machinery use, which indirectly affects the energy efficiency of field operations.

The integration of digital monitoring methods — agrochemical, electrophysical, telemetry, and remote sensing — provides a multidimensional understanding of the state of agroecosystems. This approach enables well-founded decisions regarding site-specific management, reduces the risks of resource overuse, and establishes a foundation for the sustainable development of agricultural production.

Keywords: digital monitoring, precision agriculture (PA), geographic information systems (GIS), telemetry, remote sensing (RS), vegetation indices, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), agrochemical analysis, mapping, resource efficiency, spatial analysis, agrotechnologies.

Fig.: 9. References: 31.

**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

№ 3(41)

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 28.09.2025. Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. – 61,15.
Тираж 100 пр. Замовлення № 25/25.

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.