

## РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-2(36)-102-115

УДК 004.2

**Володимир Вікторович Казимир<sup>1</sup>, Андрій Іванович Роговенко<sup>2</sup>,  
Олексій Олександрович Карась<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних та комп'ютерних систем  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** [vykazymyr@gmail.com](mailto:vykazymyr@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8163-1119>. **ResearcherID:** [Q-2925-2016](https://orcid.org/Q-2925-2016)

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** [arogovenko@gmail.com](mailto:arogovenko@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4594-5692>. **ResearcherID:** [G-3926-2014](https://orcid.org/G-3926-2014)

<sup>3</sup>студент магістратури

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** [oleksiykaras2016@gmail.com](mailto:oleksiykaras2016@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-8862-7234>. **ResearcherID:** [JZT-2594-2024](https://orcid.org/JZT-2594-2024)

### ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДРОНА У СКЛАДІ ЗАХИСНОЇ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ

*У статті представлено результати науково дослідження існуючих архітектур систем керування дронами. Наведені приклади застосування цих архітектур у реальних пристроях. Виділені та наведені основні структурні елементи типових систем керування. Визначено основні вимоги до систем керування дроном у мультиагентній системі. Запропоновано архітектуру системи керування дроном на базі одноплатного мікрокомп'ютера та програмного забезпечення системи керування дроном у мультиагентній системі. Проведена оцінка продуктивності системи керування дроном при виконанні задач обробки та розпізнавання аудіосигналу. Обґрунтовано подальший напрямок розвитку функціонала запропонованої архітектури системи керування дроном у складі рою.*

**Ключові слова:** мультиагентна система; рій дронів; одноплатний комп'ютер; БПЛА; польотний контролер; нейромережа.

*Рис.: 10. Бібл.: 18.*

**Актуальність теми дослідження.** Швидкі технічні розробки зробили БПЛА набагато більш доступними й широко використовуваними звичайними людьми, а також комерційними компаніями. Китай перебуває попереду в сегменті БПЛА, використовуваному для розваг, а увагу країн Європейського Союзу направлено на створення безпілотників цивільного й урядового використання [1]. Також БПЛА стають інструментом військових дій. Згідно з інформацією із загальнодоступних джерел Сполучені Штати й Ізраїль домінують у безпілотному військовому технологічному секторі [2].

Безпілотні апарати використовуються також і для терористичних атак. Останні події показали, що особливо небезпечними ці атаки є, коли тероризм набуває державного рівня і кількість безпілотних апаратів може сягати сотень. У результаті безпілотники являють серйозну загрозу для недоторканності приватного життя, а також ставлять під загрозу установи, які, попри наявність захисних споруд і інших систем безпеки, не в змозі захистити себе від вторгнення безпілотних апаратів на їхню територію.

**Постановка проблеми.** Вочевидь протистояти великій кількості безпілотних апаратів ефективніше, використовуючи не одиничні дрони, а групи дронів, що функціонують за роївовими правилами [3]. Дрони в рої взаємодіють між собою, обмінюються інформацією та координують свої дії. Це дозволяє збільшити швидкість реагування на події та ефективність у порівнянні з поодинокими дронами. Але робота в групі вимагає від дрона відповідності певним вимогам, що призводить до необхідності розробки нового апаратного та програмного забезпечення. Зокрема це стосується системи керування, оскільки в одиничних дронах система керування має дуже обмежений функціонал, налаштований на автономну роботу. Тому потрібно провести аналіз найбільш розповсюджених архітектур систем керування сучасних дронів, сформулювати вимоги до системи керування дроном, що входить до складу рою дронів, та на основі цих вимог запропонувати архітектуру системи керування дроном у складі мультиагентної системи, яка являє собою рій дронів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У наш час існує достатньо способів боротьби з незаконним вторгненням БПЛА на територію, що охороняється. Наприклад, компанія «Amba Defence», що розташована у Великобританії, займається виробництвом дронів, які забезпечують охорону об'єктів і територій у багатьох країнах. Американська компанія «Optellios» випускає охоронні системи з волоконно-оптичними сенсорами, завдяки яким також організовується виявлення несанкціонованого доступу на об'єкт [4].

Японська компанія «Secom» пропонує клієнтам свою систему охорони власності із залученням автономного робота-дрона, який підніметься в повітря у випадку спрацьовування штатної системи сигналізації. У цій системі єдина функція робота-дрона полягає у використанні невеликої відеокамери, дані з якої передаються на пульт охорони. У такий спосіб співробітники "Secom" можуть швидко оцінити ситуацію на місці несанкціонованого проникнення. Програмне забезпечення дозволяє роботі виявити підозрілого суб'єкта й вести за ним спостереження. У випадку виявлення підозрілого автомобіля пілотник почне спробу зафіксувати номер транспортного засобу [5].

Сторожовий дрон компанії "Aptonomy", що є перспективним американським стартапом, може бути використаний для охорони приватної території або виробничих приміщень від вторгнення [5]. Типова процедура охорони об'єктів, як правило, ведеться охоронцями, які регулярно обходять довірені території, або ж сторожовим собакам і спеціальним системам спостереження. «Aptonomy» пропонує сторожові дрони, які забезпечують більш надійну охорону з меншими витратами. Для цього сторожовий дрон, зроблений по типу октокоптера, має пробіскові маячки, два гучномовці і прожектор. Крім того, апарат оснащений відеокамерою, камерою нічного бачення й тепловізором. Дрон оснащений автоматичною системою підзарядки. Якщо під час патрулювання заряд його акумулятора знизиться до декількох відсотків, апарат повернеться на базу й самостійно під'єднається до зарядного обладнання. За допомогою спеціального пульта керування оператор може намалювати план патрулювання території й передати його сторожовим апаратам, після цього вони будуть вести охорону в автономному режимі. При виявленні порушника дрон зависне на деякій відстані від нього й попередить спалахами пробіскових маячків, одночасно апарат включити відеозапис. Якщо порушник не відреагує, дрон почне програвати через гучномовці заздалегідь записані попереджувальні фрази, включити прожектор і направити його промінь на ціль. За оцінкою «Aptonomy», цих дій буде достатньо, щоб запобігти більшості порушенням. Крім того, оператор зможе безпосередньо зв'язатися з порушником через гучномовець апарата.

Що стосується безпосередньо системи керування, то в роботі [6] запропоновано такі види різних архітектур систем керування груп БПЛА, які можна використовувати для систем захисту на основі рою дронів. Передусім пропонується централізоване управління з Лідером, який керується центральною системою (пілотом або системою на основі штучного інтелекту) з постійною підтримкою зв'язку. Основними можливостями в цій системі є постійне керування та контроль за одним БПЛА, який контролює всю групу на стаціонарному об'єкті, що може бути важливим в ситуації, коли необхідно мати особливо детальний контроль над групою. Додатковою гнучкості надає можливість міняти лідера під час виконання завдання, що надає можливість продовжувати роботу у випадку, коли лідер групи став недієздатним або коли з ним було втрачено зв'язок. Основним недоліком цього підходу є необхідність мати постійний зв'язок з центральною системою, що може бути поганим варіантом у сукупності з використанням додаткових систем захисту від дронів, які глушать зв'язок з центральною системою.

Інший підхід полягає в децентралізованому управлінні з Лідером. Ця архітектура надає можливість назначити лідера групи до того, як її буде відправлено на виконання завдання, але далі зв'язок з групою не буде продовжуватися. Лідер має ухвалювати всі рішення групи самостійно на основі інформації, що присилаються іншими дронами. При виході зі строю лідера група може автоматично вибрати нового лідера.

Ще одне рішення - колективне самоврядування з обміном інформацією (мультиагентна архітектура). Дана архітектура робить всі БПЛА рівними за значеннями та змушує їх обмінюватися інформацією між собою. Ця система є гарним варіантом для захисту стаціонарних об'єктів у випадках, коли швидкість реагування окремого дрона є важливим фактором. Якщо окремий БПЛА отримує зі своїх датчиків інформацію, на яку потрібно швидко реагувати, то дрона не потрібно відправляти інформацію лідеру групи, а потім чекати на відповідь з рішенням від нього. Замість цього дрон може відправити інформацію групі та самостійно прийняти рішення для себе та на основі цього порекомендувати іншим дронам ухвалювати відповідні рішення.

Також розглядається децентралізоване керування з розвідкою (або з прогнозуванням). Дана архітектура надає можливість вибору додаткового дрона для розвідки, який може знаходитися на більшому віддаленні від об'єкта захисту, ніж інші БПЛА, і отримувати менш точні, але з більшим радіусом покриття дані. У цьому випадку застосовується спеціальний дрон, який буде відрізнятися від інших дронів у групі більшою максимальною швидкістю горизонтального польоту та датчиками більшого радіуса покриття. При виході зі строю спеціального розвідувального дрона замінити його буде складніше, ніж у ситуації, коли для розвідки вибирається будь-який дрон з групи.

Нарешті розглядається самоорганізація без обміну інформації. Ця архітектура робить кожен БПЛА самостійним і незалежним від інших членів групи. У випадку виходу зі строю будь-якого з дронів, інші не втрачають здатності до виконання завдання. Але основною проблемою цієї системи у завданнях захисту стаціонарних об'єктів є мала ефективність групи через те, що датчики дронів не об'єднуються між собою для підвищення точності та радіусу покриття. Крім цього, при захисті об'єктів малої площі БПЛА однієї групи можуть заважати один одному.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Не зважаючи на наявність існуючих рішень, проблема високої автономності БПЛА залишається недостатньо дослідженою. Важливим аспектом є розробка апаратної та програмної архітектури системи керування, яка забезпечить ефективне вирішення задач у складі мультиагентної системи. Додатково важливо розглянути можливості використання одноплатних мінікомп'ютерів для підвищення гнучкості системи керування за рахунок розпізнавання повітряних цілей.

**Мета дослідження.** Метою цієї статті є опис дослідження з проектування апаратної та програмної архітектури системи керування БПЛА у складі мультиагентної системи. Дослідження також спрямоване на удосконалення рішень для захисту об'єктів від різних видів повітряних цілей, що виявляються по їхнім аудіосигналам.

**Виклад основного матеріалу.** Для системи захисту від повітряних цілей, що будується на основі БПЛА, найбільшу ефективність може мати мультиагентна архітектура, адже вона дозволяє кожному дрону виконувати роботу як окремо, так і у складі групі (рою). Крім цього при виході з ладу будь-якого БПЛА, його буде легко замінити, адже вони між собою не відрізняються по функціональності. Однак основною проблемою в даній архітектурі залишається складність розробки системи рішень для всієї групи, а не тільки для кожного агента окремо.

#### ***Вибір базової архітектури.***

Базуючись на обмеженнях та вимогах до елементів мультиагентної системи слід обрати архітектуру системи керування агентів-дронів, яка б дозволила забезпечити функціонування цієї системи. Якщо орієнтуватися на безпілотні літальні апарати з електронним керуванням, то базовою схемою систем керування є схема, яка застосовувалась, наприклад, у американських одногвинтових безпілотних апаратах типу Gyrodyne QH-50 DASH [7] (рис. 2).

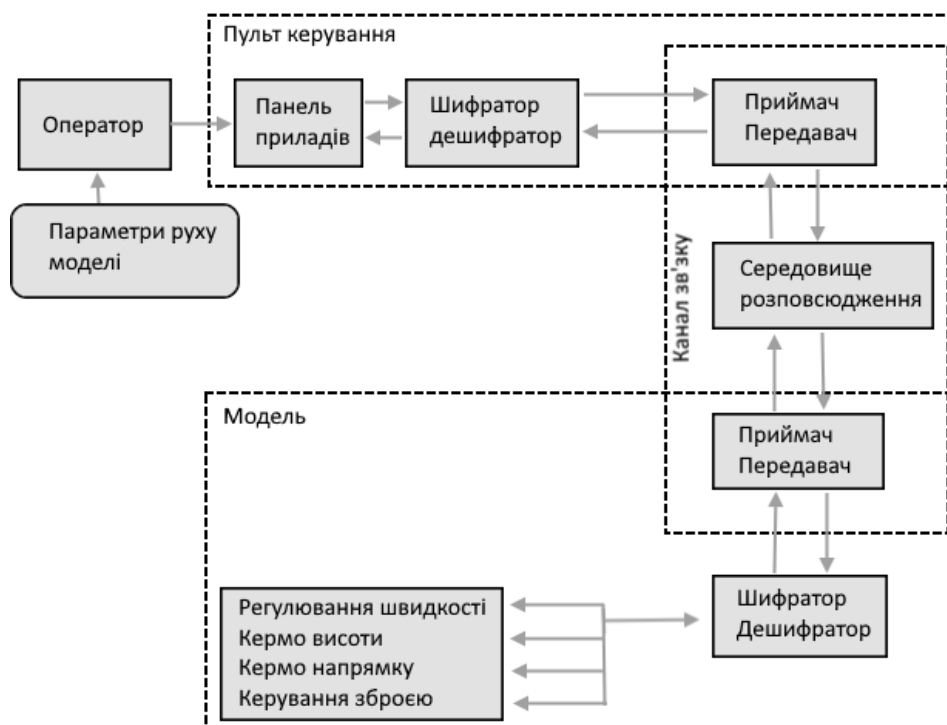


Рис. 2. Архітектура системи керування одногвинтового безпілотною апарату Gyrodyne QH-50 DASH [7]

Як видно зі схеми, ця система керування не має елементів, які б автономно ухвалювали рішення та генерували команди керування польотом. В даній системі керування передбачається наявність постійного контролю безпілотною апарату з наземного пульта керування, що практично унеможлиблює її використання в мультиагентній системі. Тож для вирішення нашої задачі слід звернути увагу на системи керування безпілотними коптерами, до складу яких входять автономні елементи керування польотом. Одним з таких варіантів є системи керування засновані на так званих польотних контролерах. Польотний контролер – це центральний модуль керування, який керує елементами безпілотною дрона під час польоту.

Одним із перших польотних контролерів був MultiWii [8]. Це відкритий проєкт на базі платформи Arduino, яка використовується як опитування сенсорів, так і для генерування сигналів керування. Фактично польотним процесором виступає плата з контактами, до яких потрібно під'єднувати сенсори та модулі зв'язку. Потужності такої платформи вистачає для обробки сигналів керування, що приходять по радіоканалу. Базовими функціями автопілота є рух по координатах, та утримання курсу. Для реалізації автопілота в систему потрібно додавати модуль GPS, а для утримання курсу модуль магнітометра. Плата базується на мікроконтролерах ATmega2560 або STM32. Архітектура системи керування на основі польотних контролерів MultiWii наведена на рис. 3.

Польотні контролери мають низьку обчислювальну потужність, і хоча вони й забезпечували певні функції керування польотом, але оператор обов'язково має контролювати рух дронів. Наприклад, при русі по координатах система керування не відпрацьовує самостійно огинання перешкод. Таким чином, використання таких систем керування в мультиагентній системі є практично неможливим.

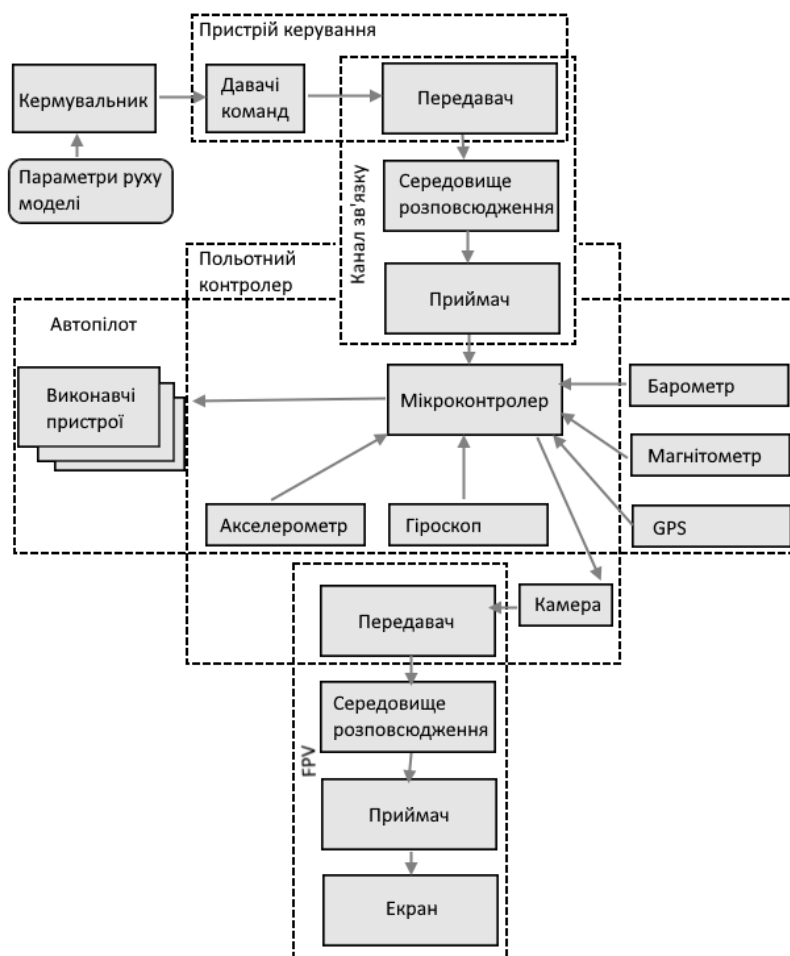


Рис. 3. Архітектура системи керування на основі польотних контролерів MultiWii [9]

Наступна система керування базується вже на спеціалізованому контролері CopterControl3D (CC3D)[10], який, на відміну від MultiWii, вже був зорієнтований на використання в мультикоптерах, та має своє програмне забезпечення для налаштування. Його архітектура подібна до архітектури, приведеної на рис. 3, але в цьому випадку мікроконтролер замінений на плату контролера CC3D[11]. Оскільки контролер базується на мікроконтролері STM32F103, то практично ніякого приросту в обчислювальній потужності не існує. Тому така схема керування знайшла широке застосування в FPV дронах, а для мультиагентної системи є зовсім не придатною.

Наступна система керування базується на спеціалізованому польотному контролері ArduPilot Mega від компанії Arduino[12]. Ця система має більш розвинений автопілот, та двосторонню систему телеметрії. Також в системі реалізовано ведення логування. Контролер програмується мовою програмування Arduino та є більш гнучко запрограмований під задачі. Він базується на мікроконтролері ATmega32U2, продуктивність якого є дуже обмеженою і не дозволяє реалізувати задачі агента мультиагентної системи. Архітектура ArduPilot Mega подібна до архітектури наведеної на рис. 2.

Нарешті, остання з найрозповсюдженіших архітектур систем керування безпілотними апаратами - польотний контролер Pixhawk[13], зовнішній вигляд якого наведено на рис. 4.



Рис. 4. Зовнішній вигляд польотного контролера PixHawk [13]

На відміну від попередньо розглянутих польотних контролерів, PixHawk має операційну систему реального часу, підтримує систему симуляції Mission Planner, має велику кількість інтерфейсів і доступний у вигляді закінченого модуля в корпусі, який з мінімальною адаптацією можна інтегрувати в проєкт. Архітектура системи керування на основі PixHawk наведена на рис. 5 [14].

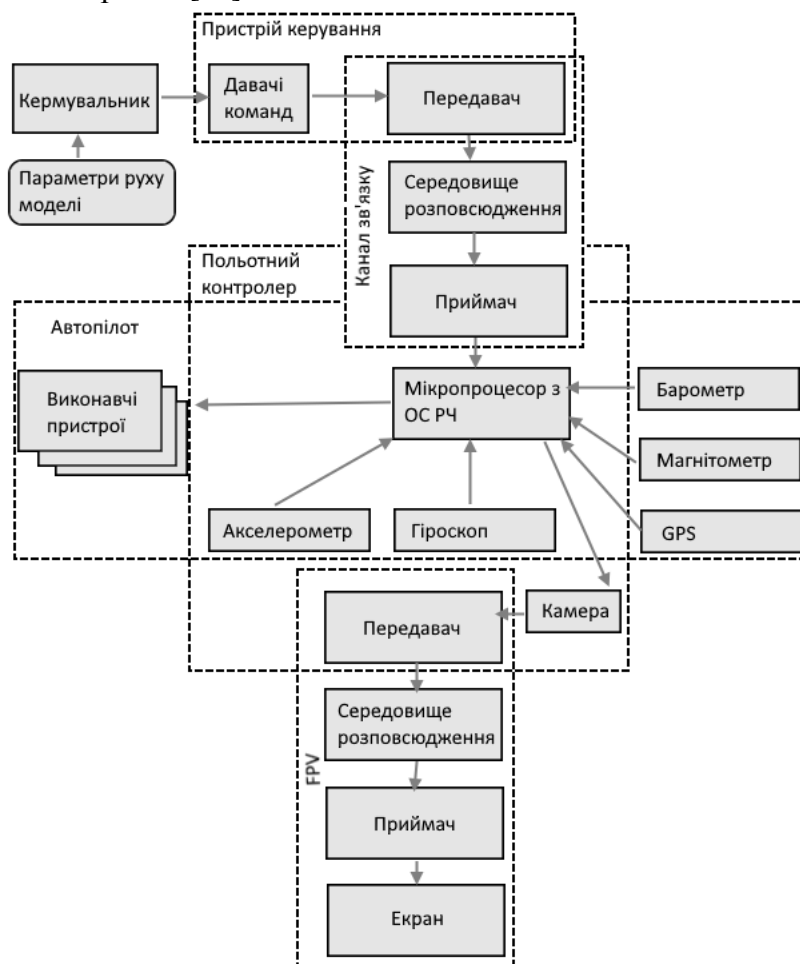


Рис. 5. Архітектура системи керування на основі польотних контролерів PixHawk [14]

На платі Pixhawk встановлено STM32F427 Cortex M4, що суттєво підіймати обчислювальну спроможність системи керування. Але при цьому дуже ускладнено застосування стороннього програмного забезпечення в складі системи, яке б вирішувало задачі інтелектуального керування польотами.

Підсумовуючи результати проведеного аналізу слід зазначити, що для забезпечення вищого ступеня автономності безпілотному апарату не вистачить одного лише польотного контролера. Щоб збільшити обчислювальну потужність системи керування дроном потрібно розробити багаторівневу апаратну архітектуру й, відповідно, багаторівневу програмну архітектуру.

#### **Проектування архітектури системи керування.**

Пропонується використовувати архітектуру, що складається із трьох рівнів. Нижчий рівень архітектури, це виконавчі пристрої та датчики, які безпосередньо взаємодіють із польотним контролером. Другий рівень архітектури базується на польотному контролері, якості якого буде використовуватись один з уже наявних. У розробці спеціалізованого польотного контролера в межах цієї задачі немає сенсу, оскільки ніяких додаткових функцій, крім вже реалізованих у контролерах, не потрібно. Такий підхід суттєво прискорить розробку всієї системи. Верхній рівень архітектури базується на одноплатному мікрокомп'ютері, програмне забезпечення якого має аналізувати інформацію від польотного контролера, звукових та оптичних сенсорів, підсистеми живлення. На основі обробки цих даних верхній рівень генерує команди для всіх елементів дрона, та підтримує обмін з іншими агентами мультиагентної системи.

Для реалізації вказаного підходу запропоновано архітектуру автономно керованого охоронного квадрокоптера, яка показана на рис. 6. Така архітектура базується на польотному контролері Pixhawk з автопілотом PX4, який забезпечує широкую номенклатуру інтерфейсів, для взаємодії з іншими елементами мультикоптера. Зокрема є інтерфейс для підключення одноплатного мінікомп'ютера, сенсорних елементів для визначення положення мультикоптера в просторі та стану батареї. Програмний інструментарій для роботи з цим польотним контролером дуже розвинутий, що дає можливість якісно налагоджувати програмне забезпечення, ще на ранніх етапах розробки.

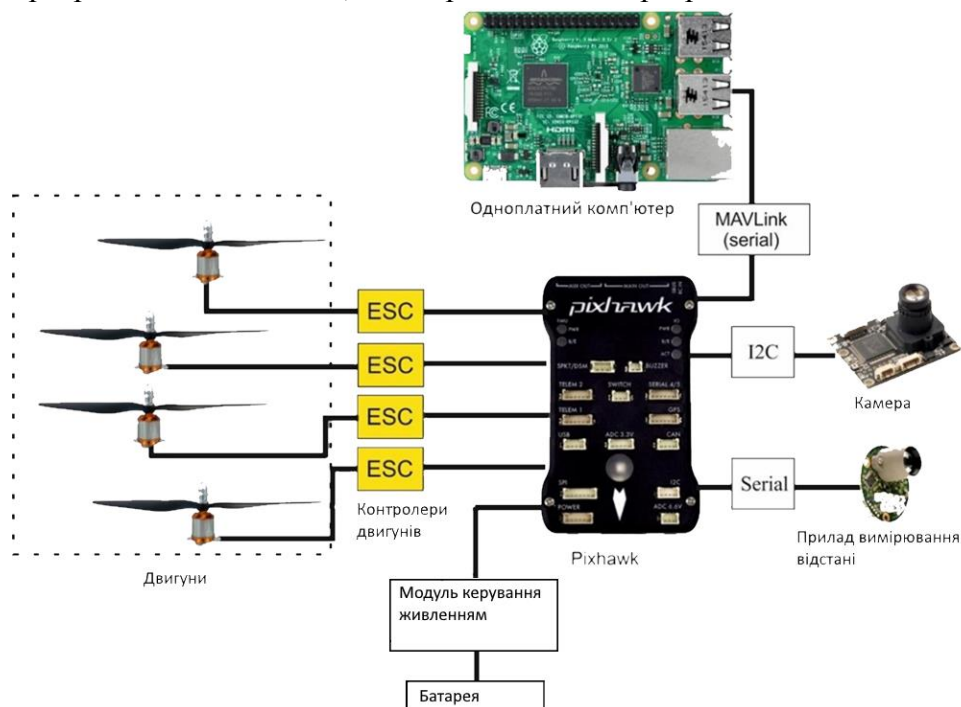


Рис. 6. Типова архітектура квадрокоптера з модулем керування на основі одноплатного комп'ютера

У цій архітектурі використання польотного контролера є типовим [14] за виключенням організації взаємодії з одноплатним мікрокомп'ютером верхнього рівня. Вибір одноплатного мікрокомп'ютера обмежується певними вимогами, основними з яких є габарити, вага, енергоспоживання, продуктивність, наявність інтерфейсів та систем зв'язку, наявність розвинутого інструментального програмного забезпечення.

В нашому випадку габарити одноплатного мікрокомп'ютера обмежуються розміром шасі мультикоптера, тобто, беручи за основу раму 450 Carbon Fiber Frame [15], це орієнтовно становить  $120 \times 120 \times 50$  мм. Вага також обмежується можливостями шасі. Таким чином, базуючись на загальній вазі коптера до 4 кг і розрахунками ваги під систему живлення, обмеження на вагу становить 350 грамів.

Інтерфейси одноплатного мінікомп'ютера мають забезпечити зв'язок із польотним контролером по протоколу MavLink [16], а також підключення камер спостереження та мікрофонів. Якщо аналогові входи будуть відсутні, то мають бути в наявності цифрові входи, до яких можна приєднати АЦП модулі. Система зв'язку має бути бездротовою, або ж мати стандартний інтерфейс для підключення модулів бездротового зв'язку.

Вимоги до програмного забезпечення мінікомп'ютера базуються на наявності засобів розробки та налагодження. У такому випадку, наявність типової операційної системи, в якій можна виконувати програмні застосунки та організувати зв'язок між ними за загальними принципами, є одною з найголовніших вимог. Це зумовлено тим, що зазвичай використання спеціалізованих платформ потребує застосування спеціалізованих засобів розробки ПЗ, що призводить до збільшення часу розробки.

Енергоспоживання має бути мінімально можливим для збільшення часу перебування в повітрі. У цьому випадку ми маємо обмеження у 20 Вт.

І нарешті, виходячи продуктивності, системи повинна забезпечувати паралельну роботу мінімум п'яти програмних підсистем: підсистема керування та прийняття рішень, підсистема обробки відео, підсистема обробки аудіо, підсистема взаємодії з польотним контролером та підсистема захищеного зв'язку. Структура програмного забезпечення системи керування дроном мультиагентної системи наведена на рис. 7.

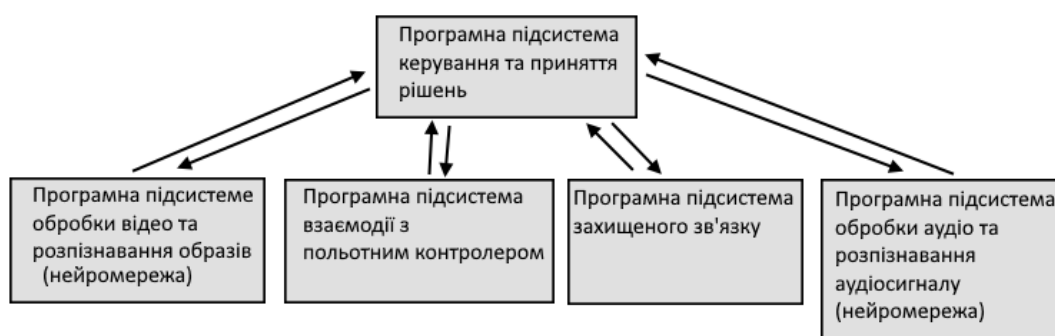


Рис. 7. Структура програмного забезпечення системи керування дроном мультиагентної системи

Орієнтуючись на наявні обмеження, було виділено дві альтернативні платформи на основі одноплатного мікрокомп'ютера, які можна застосувати як систему керування дрона мультиагентної системи.

Перший варіант – це одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4 Model B.[17] Дана апаратна платформа пропонується максимально з 8 Гб оперативної пам'яті. Вона базується на потужному чотириядерному 64-бітному SoC Broadcom BCM2711B0 ARM Cortex-A72 процесорі, що виконаний за 28 нм технологією та працює на частоті 1,5 ГГц. Бездротові адаптери - Wi-Fi дводіапазонний стандарту IEEE 802.11ac та Bluetooth – 5.0 BLE. Контролер Ethernet на базовому SoC підключається до зовнішнього фізичного



пристрою Broadcom через виділений канал RGMII, що дозволяє використовувати повну пропускну здатність інтерфейсу. Процесор керується оновленою версією операційної системи, що базується на Debian 10 Buster.

Raspberry Pi 4 вимагає живлення 5 В/3 А, максимальне значення вхідної напруги живлення 5,5 В а його основні характеристики включають:

- об'єм оперативної пам'яті до 8 Гб;
- 4-піновий роз'єм для підключення додаткового PoE модуля;
- два USB 3.0 роз'єми;
- два micro-HDMI роз'єми відеовиходу;
- роз'єм живлення USB-C;
- тактова частота процесора (до 1,5 ГГц);
- гігабітний Ethernet, що працює на повній швидкості інтерфейсу;
- дводіапазонний Wi-Fi модуль;
- підтримка PXE (Preboot eXecution Environment) для завантаження ОС через мережевий інтерфейс використання локальних носіїв даних;
- покращене керування температурою та живлення процесора (на базі MaxLinear MxL7704-P4);
- покращене пасивне охолодження процесора;
- зберігання операційної системи та файлів на SD-карті з можливістю її встановлення в іншій пристрій.
- сумісність: повна сумісність з більш ранніми продуктами Raspberry Pi.

Як альтернатива розглядалась платформа на базі одноплатного комп'ютера NVIDIA Jetson Nano Developer Kit.[18] Цей одноплатний комп'ютер має можливості паралельного запуску декількох нейронних мереж для забезпечення роботи додатків для класифікації зображень, виявлення об'єктів, обробки звуку. Забезпечуючи дані характеристики, дана платформа проста у використанні та має гарну енергоефективність, споживаючи не більше 5 Вт, що вкрай важливе для автономності літального апарату. Одноплатний комп'ютер підтримується пакетом NVIDIA JetPack. Програмне забезпечення пакету надає необхідний ресурс та можливості для розв'язання задач із використанням штучного інтелекту: повний робочий стіл Linux з драйверами NVIDIA, бібліотеками AI та штучного зору, програмні інтерфейси додатків (APIs), документацію та зразки коду. Пакет JetPack повністю сумісний з основною AI платформою NVIDIA для навчання та розгортання програмного забезпечення штучного інтелекту. Один і той же пакет Jetpack SDK застосований у всій лінійці продуктів NVIDIA Jetson. Це забезпечує мінімізацію зусиль для розробки та прискорює вихід кінцевого виробу.

Конструктивно комп'ютер є комбінацією процесорного модуля Jetson Nano Module та несучої плати. Головними елементами процесорного модуля є 128-ядерний графічний процесор NVIDIA з архітектурою Maxwell та чотириядерний процесор ARM Cortex-A57 з частотою 1.43 ГГц. Охолодження модуля забезпечує радіатор, що розсіює до 10 Вт при температурі навколишнього середовища 25 °С. У разі необхідності додаткового охолодження є можливість налаштування модуля для керування системним вентилятором (40 × 40 мм). Плата містить 64-бітну оперативну пам'ять максимум 8 Гб LPDDR 4 25.6 Гбіт/с та слот для microSD карти. MicroSD карта призначена для запису та встановлення образу операційної системи Linux, а також для зберігання даних. Карта повинна забезпечувати достатній обсяг пам'яті (не менш 16 Гб) та швидкість обміну даними (UHS-1). Модуль забезпечує продуктивність до 472 GFLOPS (FLoating-point Operations Per Second).

На несучій платі, де розміщені інтерфейси Gigabit Ethernet, роз'єм відеокамери MIPI CSI-2 DPHY lanes, HDMI 2.0 та eDP 1.4, 4 × USB 3.0, 1 × USB 2.0 (microUSB), GPIO, I2C, I2S, SPI, UART, має такі технічні характеристики:

- 128-ядерний графічний процесор Maxwell;
- 4-ядерний процесор ARM Cortex-A57 з частотою 1.43 ГГц;
- оперативна пам'ять 4 Гб 64 біт LPDDR4 25.6 Гбіт/с;
- зберігання даних: слот для карт microSD;
- камера: 12-канальна (3 × 4 або 4 × 2) MIPI CSI-2 DPHY 1.1 (1,5 Гбіт/с)
- можливості мережі: Gigabit Ethernet, M.2 Key E;
- дисплей: HDMI 2.0 та eDP 1.4;
- роз'єми: 4 × USB 3.0, 1 × USB 2.0 (microUSB);
- 40-піновий роз'єм, сумісний з Raspberry Pi;
- інші інтерфейси: GPIO, I2C, I2S, SPI, UART;
- габарити: 100×80×29 мм.

Таким чином, Jetson Nano Developer Kit для вирішення задач керування мультикоптером підходить краще при всіх приблизно рівних параметрах, має апаратну підтримку роботи з відео й орієнтований на використання штучного інтелекту. Перелік інтерфейсів дає можливість під'єднати як польотний контролер, так і модулі АЦП.

Базуючись на наявних інтерфейсах і структурі Jetson Nano Developer Kit, була спроектована архітектура системи керування дрона, яка наведена на рис. 8.

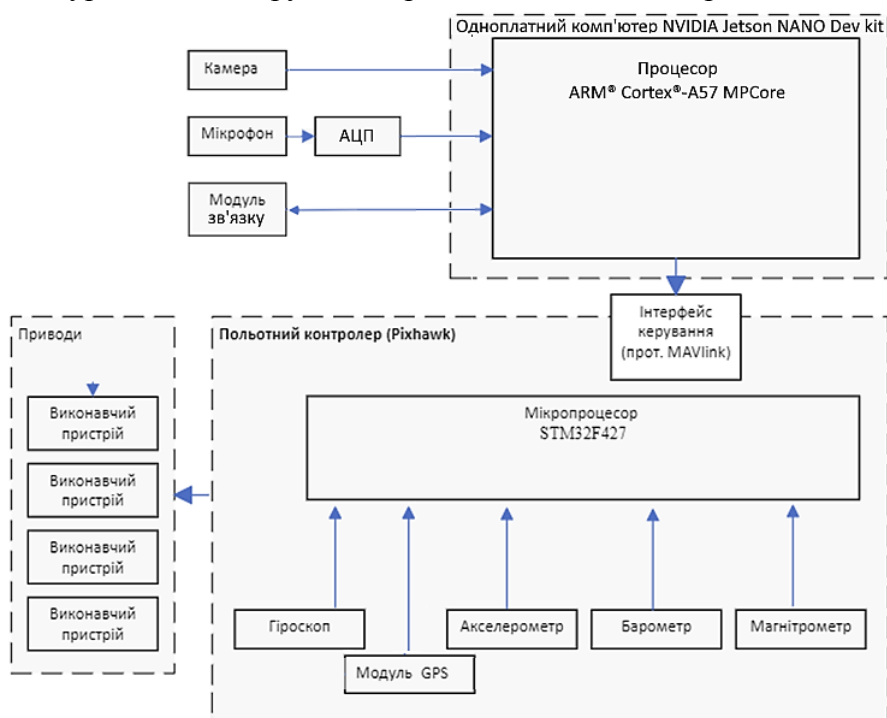


Рис. 8. Архітектура системи керування дрона у складі мультиагентної системи на основі Jetson Nano Developer Kit

#### **Експериментальне тестування розробленої архітектури системи керування.**

Для експериментального тестування запропонованої архітектури була розроблена модель нейронної мережі для розпізнавання БПЛА за аудіосигналом. Модель є прототипом програмної підсистеми обробки аудіо та розпізнавання аудіосигналу, представлена на рис. 9. Ця модель містить наступні шари з описом:

1. Вхідний шар (Flatten); не містить ваг або нейронів, а лише переформатовує вхідні дані.
2. Повнозв'язні (Dense) шари. Ці шари є основними будівельними блоками моделі. Модель має два Dense шари, перший з 256 нейронами і другий зі 128 нейронами, які використовують активаційну функцію ReLU, що є популярною для нелінійних перетворень.

3. Dropout шар. Використовується для регуляризації, щоб зменшити перенавчання шляхом випадкового відключення нейронів під час тренування з ймовірністю 0.5.

4. Вихідний шар (Dense) з одним нейроном, оскільки модель має задачу бінарної класифікації. Тут використовується активаційна функція sigmoid для виведення ймовірності приналежності до класу.

На рис. 7 наведено схему розробленої моделі нейронної мережі. Дані передаються у вхідний шар, який перетворює двовірну спектрограму в одномірний масив і передає його в кожен нейрон Layer 1. Наступний шар являє собою перший повнозв'язний шар з 256 нейронами й використовує активаційну функцію ReLU. Далі йде Dropout Layer 2, де половина нейронів відсіюється випадковим чином і залишається 128 нейронів, які переходять в Layer 3. Layer 3 – це другий повнозв'язний шар, що також використовує функцію активації ReLU. Останнім йде вихідний шар з сигмоїдальною функцією активації, який виводить значення від 0 до 1, де 0 – відсутність шуканого звуку на аудіозаписі, а 1 – наявність цього звуку.

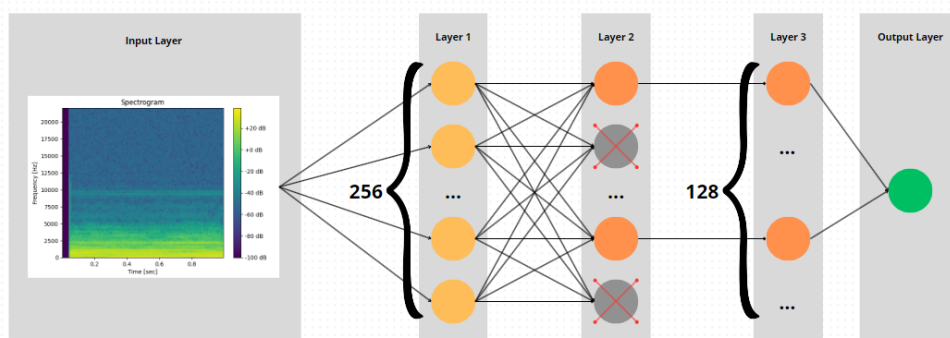


Рис. 9. Схематична модель нейронної мережі бінарної класифікації

Експериментальне дослідження наведеної моделі було проведено за допомогою обчислювальної платформи Jetson Nano Developer Kit. Важливо відзначити, що на цій платформі проводилося лише тестування готової моделі, а процес її навчання був проведений у середовищі Jupyter notebook з використанням бібліотек tensorflow. Для випробувань були використані реальні дані звуку повітряної цілі, а також інші звуки, які мали схожість з цільовим звуком. Результати тестування моделі для розпізнавання ворожих БПЛА за аудіопотоком представлені на рис. 10.

```

16/16 [=====] - 0s 6ms/step
      precision    recall  f1-score   support

     0       0.92      0.99      0.95       113
     1       1.00      0.97      0.99       382

   accuracy                   0.98       495
  macro avg                   0.96      0.98      0.97       495
 weighted avg                   0.98      0.98      0.98       495

[[[112  1]
 [ 10 372]]]
    
```

Рис. 10. Результати тестування моделі для розпізнавання ворожих БПЛА за аудіопотоком

Продуктивність системи керування щодо вирішення задачі розпізнавання аудіосигналів була оцінена безпосередньо на апаратній платформі Jetson Nano Developer Kit. Процес розпізнавання забирав до 10 % від загальної робочої спроможності ЦПУ та до 300 МБ оперативної пам'яті. Ці параметри були визначені як критерії продуктивності.

Наведена модель була використана тільки як приклад застосування запропонованої архітектури. Однак для використання в реальних умовах, вона може потребувати удосконалення з метою розпізнання цілей в умовах, коли мікрофон захоплює велику кількість додаткових шумів.

**Висновки.** 1. Базуючись на особливостях задач, що має вирішувати система захисту, побудована на основі БПЛА, доцільно організувати роботу цієї системи за принципами мультиагентної архітектури. Це дозволить забезпечити найбільшу автономність елементів системи – окремим дронам, та збільшить продуктивність системи із захисту об'єктів. Також ця система не має недоліку централізованої системи, та при втраті одного або кількох агентів, продовжить своє функціонування.

2. Апаратна платформа системи керування дронами має базуватися на обчислювальних елементах з потужністю достатній для організації підсистеми прийняття рішень та зв'язку, задач виявлення звукових та візуальних об'єктів. Окрім того, платформа повинна забезпечувати використання нейромереж для вирішення задач розпізнавання цілей.

3. Використання Jetson Nano Developer Kit від компанії NVIDIA як основу апаратної платформи забезпечує можливість паралельно використовувати декілька нейронних мереж, що дозволяє одночасно проводити виявлення візуальних об'єктів та обробки звуку різними додатками. При цьому дана платформа має гарну енергоефективність.

4. Пакет підтримки NVIDIA JetPack надає необхідний ресурс та можливості для рішення задач з використанням штучного інтелекту: ОС Linux з драйверами NVIDIA, бібліотеки AI та штучного зору, програмні інтерфейси додатків, документацію та зразки коду. Це значно прискорює розробку програмного забезпечення для мультиагентної системи.

5. NVIDIA Jetson Nano має інтерфейси для зв'язку з польотним контролером, відео та аудіо реєструючими пристроями, тож система керування має доступ до інформації від усіх сенсорів та до повідомлень від інших агентів мультиагентної системи.

6. Результати тестування апаратної платформи на основі одноплатного комп'ютера Jetson дозволяють зробити висновок, що апаратні можливості архітектури на основі Jetson Nano Developer Kit забезпечують реалізацію нейронні мережі для розпізнавання ворожих БПЛА за аудіосигналом. Під час тестування моделі нейронної мережі було використано тільки 10 % від обчислювальної потужності платформи. Таким чином, залишається ще достатньо обчислювальних ресурсів для вирішення задач зв'язку між агентами, забезпечення безпеки з'єднання, розпізнавання цілей за відеопотоком, навігації у просторі та інших можливих варіантів використання дронів у складі мультиагентної системи.

#### Список використаних джерел

1. . Unclassified and Secure: A Defense Industrial Base Cyber Protection Program for Unclassified Defense Networks / D. Gonzales, S. Harting, M. K. Adgie, J. Brackup, L. Polley, K. D. Stanley. – United States, 2020. – 150 p. DOI: <https://doi.org/10.7249/RR4227>.
2. Konert, A. TOWARDS AVIATION REVIVAL Military autonomous drones (UAVs) – from fantasy to reality. Legal and Ethical implications / A. Konert, T. Balcerzakb // Transportation Research Procedia 59 (2021) :10th International Conference on Air Transport – INAIR 2021. – Pp. 292–299.
3. European Global Navigation Satellite Systems (EGNSS) for drones operations // White paper. European GNSS Agency (GSA), 2023. DOI:10.2878/52219.
4. SECOM [Electronic resource] // SECOM – Mode of access: <http://www.secom.co.jp>.
5. Home [Electronic resource] // Home Security Info Watch. – Mode of access: <https://www.securityinfowatch.com>.
6. Кравчук, С. О. Підходи та стратегії щодо колективного керування роєм дронів / С. О. Кравчук, І. М. Кравчук // Перспективи телекомунікацій: збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції. – 2019. DOI: 10.31474/2415-7902-2023-2-11-16-26.
7. Gyrodyne QH-50C Drone Anti-Submarine Helicopter (DASH) [Electronic resource] // Homepage National Air and Space Museum. – Mode of access: [https://airandspace.si.edu/collection-objects/gyrodyne-qh-50c-drone-anti-submarine-helicopter-dash/nasm\\_A20090023000](https://airandspace.si.edu/collection-objects/gyrodyne-qh-50c-drone-anti-submarine-helicopter-dash/nasm_A20090023000).

8. MULTIWI. 2023 <http://www.secom.co.jp>.
9. Yen Fang Chong. MultiWii Based Quadcopter by Using Arduino Controller [Electronic resource] / Yen Fang Chong, Najib Mohammed Ahmed Al-Fadhali // *Progress in Engineering Application and Technology*. – 2023. – Vol. 4(1). – Pp. 221-229. – Mode of access: <https://publisher.uthm.edu.my/periodicals/index.php/peat/article/view/9986>.
10. Lim, Jia Tian. Development and control of mini-quadrotor / Lim Jia Tian // *DRNTU Engineering Electrical and electronic engineering Control and instrumentation* Nanyang Technological University, 2013.
11. OPWiki Documentation. Release 0.1.4. OpenPilot community [Electronic resource]. 2017. – Mode of access: <https://readthedocs.org/projects/openpilotwiki/downloads/pdf/latest>.
12. ArduPilot Documentation – ArduPilot documentation [Electronic resource] // ArduPilot - Versatile, Trusted, Open. – Mode of access: <https://ardupilot.org/ardupilot>.
13. Homepage - Pixhawk [Electronic resource] // Pixhawk. – Mode of access: <https://pixhawk.org>.
14. Yang, K. Research of Control System for Plant Protection UAV Based on Pixhawk / Kang Yang, Guang You Yang, S Isi Huang Fu // *Procedia Computer Science*. – 2020. – Vol. 166. – Pp. 371-375. DOI:10.1016/j.procs.2020.02.082.
15. Pixhawk 2.4.8 Flugs teuerung Kohle faser 450 Rahmen Kit Ardu pilot 100mw Radio Telemetry Quadcopter Blheli 20a 2212 Motor Esc - AliExpress 26 [Electronic resource] // aliexpress. – Mode of access: <https://www.aliexpress.com/item/1005006845741147.html>.
16. Introduction MAVLink Developer Guide [Electronic resource] // Choose a language MAVLink Developer Guide. – Mode of access: <https://mavlink.io/en>.
17. DATASHEET, Raspberry Pi 4 Model B, Release 1.1. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf>.
18. JETSON NANO DEVELOPER KIT, December 17, [Electronic resource]. – Mode of access: [https://developer.download.nvidia.com/embedded/L4T/r32-3-1\\_Release\\_v1.0/Jetson\\_Nano\\_Developer\\_Kit\\_User\\_Guide.pdf](https://developer.download.nvidia.com/embedded/L4T/r32-3-1_Release_v1.0/Jetson_Nano_Developer_Kit_User_Guide.pdf).

### References

1. Gonzales D., Harting S., Adgie M. K., Brackup J., Polley L., Stanley K. D. (2020). *Unclassified and Secure: A Defense Industrial Base Cyber Protection Program for Unclassified Defense Networks*. United States.
2. Konert A., Balcerzak T. (2021). Towards Aviation Revival. Military autonomous drones (UAVs) - from fantasy to reality. Legal and Ethical implications. *Transportation Research Procedia* 59. 10th International Conference on Air Transport – INAIR 2021 (pp. 292–299).
3. European Global Navigation Satellite Systems (EGNSS) for drones operations. White paper. European GNSS Agency (GSA). (2023). DOI:10.2878/52219.
4. SECOM. (2023). <http://www.secom.co.jp>.
5. SECURITY INFOWATCH. (2023). <http://www.securityinfowatch.com>.
6. Kravchuk, S.O., Kravchuk, I.M. (2019). Approaches and strategies for collective drone swarm management. *Collection of materials of the International Scientific and Technical Conference "PROSPECTS OF TELECOMMUNICATIONS"*. DOI: 10.31474/2415-7902-2023-2-11-16-26.
7. Gyrodyne QH-50C Drone Anti-Submarine Helicopter (DASH). (2023). [https://airandspace.si.edu/collection-objects/gyrodyne-qh-50c-drone-anti-submarine-helicopter-dash/nasm\\_A20090023000](https://airandspace.si.edu/collection-objects/gyrodyne-qh-50c-drone-anti-submarine-helicopter-dash/nasm_A20090023000).
8. MULTIWI. (2023). <http://www.secom.co.jp>.
9. Yen Fang I, Najib M. Al-Fadhali. (2023). MultiWii Based Quadcopter by Using Arduino Controller. *Progress in Engineering Application and Technology*, 4(1), 221-229. Universiti Tun Hussein Onn Malaysia Publisher's.
10. Lim, Jia Tian. (2013). Development and control of mini-quadrotor. *DRNTU Engineering Electrical and electronic engineering Control and instrumentation*. Nanyang Technological University.
11. OPWiki Documentation. Release 0.1.4. OpenPilot community. (2017). <https://readthedocs.org/projects/openpilotwiki/downloads/pdf/latest>.
12. ArduPilot Documentation. (2023). <https://ardupilot.org/ardupilot>.
13. PIXHAWK. (2023). <https://pixhawk.org>.

14. Kang Yang, Guang You Yang, S Isi Huang Fu. (2020). Research of control system for plant protection UAV based on pixhawk. *Procedia Computer Science*, 166, 371-375.

15. PIXHAWK2.4.8 Flight Control Carbon Fiber 450 Frame Kit - Ardupilot 100MW Radio Telemetry Quadcopter BLHELI 20A 2212 Motor ESC.

16. MAVLink Developer Guide. (2023). <https://mavlink.io/en>.

17. DATASHEET, Raspberry Pi 4 Model B, Release 1.1. (2019). <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf>.

18. JETSON NANO DEVELOPER KIT. (2019). [https://developer.download.nvidia.com/embedded/L4T/r32-3-1\\_Release\\_v1.0/Jetson\\_Nano\\_Developer\\_Kit\\_User\\_Guide.pdf](https://developer.download.nvidia.com/embedded/L4T/r32-3-1_Release_v1.0/Jetson_Nano_Developer_Kit_User_Guide.pdf).

Отримано 09.05.2024

UDC 004.2

**Volodymyr Kazymyr<sup>1</sup>, Andrii Rohovenko<sup>2</sup>, Oleksii Karas<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Sciences, Professor, Professor of the Department of Information and Computer Systems  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [vkazymyr@gmail.com](mailto:vkazymyr@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8163-1119>. **ResearcherID:** [Q-2925-2016](https://orcid.org/Q-2925-2016)

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, associate professor of the Department of Information and Computer Systems  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [arogovenko@gmail.com](mailto:arogovenko@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4594-5692>. **ResearcherID:** [G-3926-2014](https://orcid.org/G-3926-2014)

<sup>3</sup>Student of the Department of Information and Computer Systems  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [oleksiykaras2016@gmail.com](mailto:oleksiykaras2016@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-8862-7234>. **ResearcherID:** [JZT-2594-2024](https://orcid.org/JZT-2594-2024)

## DESIGNING A DRONE CONTROL SYSTEM AS PART OF A DEFENSIVE MULTI-AGENT SYSTEM

*Recent events have shown that attacks by UAVs become particularly dangerous when terrorism reaches a state level, and the number of drones can reach hundreds. These attacks threaten institutions that, despite having defensive structures and other security systems, are unable to defend themselves against drone incursions into their territory.*

*It is apparent that countering a large number of drones is more effective by using not individual drones but groups of drones operating according to swarm rules. However, working in a group requires drones to meet certain requirements, leading to the need for the development of new hardware and software. This particularly applies to the control system, as in individual drones, the control system has very limited functionality, tuned for autonomous operation.*

*The aim of this article is to describe research on designing the hardware and software architecture of UAV control systems as part of a multi-agent system*

*The article presents the results of the analysis of architectures of the most common unmanned drones. The main elements of the architecture are highlighted, and the suitability of each architecture for use as the control architecture of a drone in a multi-agent system is determined.*

*The results of the analysis of modern computing platforms based on single-board microcomputers for use as the basis of a drone control system in a multi-agent system are presented.*

*A hardware and software architecture for controlling a drone in a multi-agent system is proposed.*

*A developed neural network model for recognizing UAVs by audio signals is presented.*

*The results of practical studies of the operation of the neural network model for recognizing UAVs by audio signals as part of a drone control system in a multi-agent system are provided.*

*The hardware platform of the drone control system should be based on computing elements with sufficient power to organize decision-making and communication subsystems, tasks for detecting sound and visual objects. In addition, the platform should provide for the use of neural networks to solve target recognition tasks.*

*During the testing of the neural network model, only 10 % of the computing power of the platform was used. Thus, there are still enough computational resources left to solve communication tasks between agents, ensure connection security, recognize targets by video stream, navigate in space, and other possible uses of drones as part of a multi-agent system.*

**Key words:** Multi-agent system; drone swarm; single-board computer; UAV (Unmanned Aerial Vehicle); flight controller; neural network.

*Fig.: 10. References: 18.*

**Павло Дмитрович Козолуп<sup>1</sup>, Володимир Олександрович Любчак<sup>2</sup>**<sup>1</sup>аспірант кафедри комп'ютерних наук,

Сумський державний університет (Суми, Україна)

**E-mail:** pavlo.kozolup@student.sumdu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-1303-3424><sup>2</sup>кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри кібербезпеки

Сумського державного університету (Суми, Україна)

**E-mail:** v.liubchak@dcs.sumdu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7335-6716>**SCOPUS Author ID:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55654127800>, **ResearcherID:** [IVV-0145-2023](https://orcid.org/0000-0002-7335-6716)**ФУНКЦІОНАЛЬНА МОДЕЛЬ ТА АЛГОРИТМ РОЗРОБКИ  
ІНФОРМАЦІЙНОГО СЕРВІСУ ДЛЯ ОБЛІКУ Й ЗАКУПІВЛІ ТОВАРІВ**

Дослідження присвячено розробці функціональної моделі та алгоритму інформаційного сервісу з питань обліку і закупівлі, що враховує індивідуальні потреби користувача. Це актуально для забезпечення зручності та економічності в повсякденних покупках користувачів. У роботі проведений аналіз існуючих методів розрахунку періоду закупівлі товарів з урахуванням особистих уподобань та часу, який витрачається на закупівлю товару. Зазначена необхідність індивідуального підходу до процесу закупівлі на основі часу, який користувач витрачає на повне використання товару. Запропонований алгоритм базується на моделі особистості користувача, історії замовлень та враховує фактори, що впливають на періодичність покупок кожного окремого користувача. Алгоритм може використовувати дані з попередніх покупок, враховувати зміни в споживчому попиті та пропонувати терміни закупівлі. Також алгоритм, на основі отриманих даних, може прогнозувати потреби користувача та створювати замовлення відповідно до них. Використання цього алгоритму в додатку може сприяти зручності та ефективності покупок для кожного користувача.

**Ключові слова:** інформаційний сервіс; управління запасами; період закупівлі; модель користувача; індивідуальне налаштування; автоматизація замовлень.

Рис.: 2. Бібл.: 12.

**Актуальність теми дослідження.** У сучасному світі зменшення витрат часу та ресурсів на повсякденні справи стає дедалі більш актуальним завданням. Вибір та закупівля предметів і товарів особистого попиту як для пересічної людини, так і для діяльності приватного підприємця потребує уваги та часу. Ефективне ведення обліку є ключовим для оптимізації витрат. Необхідно розуміти, як і на що витрачаються кошти, та здійснювати розрахунки, щоб забезпечити достатній рівень життєдіяльності та мати необхідні ресурси. У такому контексті наявність інформаційного сервісу-помічника з питань обліку та закупівлі, який автоматизує частину цієї роботи, стає надзвичайно корисною.

Такі сервіси є доволі поширеним явищем у банківській сфері. Як приклад, використовуються банківські сервіси-додатки, що допомагають управлінню фінансами користувачів. Прикладом є додаток «Ukrsibonline» [1]. Він допомагає відстежувати витрати та графічно показує, які кошти були витрачені та на які потреби. Також як приклад можна розглянути додаток «Fishka», розроблений для сфери обслуговування [2]. Проте нині майже немає помічників, які б допомагали з упорядкуванням власних активів, предметів, товарів. Існуючі сервіси не допомагають з питанням – як та коли купувати товари?

Та головне, усі ці сервіси не використовують методів індивідуалізації додатків. Більшість додатків спрямовані на загальні потреби користувачів, не враховуючи індивідуальні потреби. Нині лише декілька сервісних додатків пропонують майже індивідуальний та сучасний функціонал помічника. Наприклад, англійські додатки Pantrist [5] та Kitchenpal: Pantry Inventory [3] призначені переважно для обліку та використання харчових продуктів.

Отже, ідея інформаційного сервісу у формі персонального помічника, який відстежує індивідуальні потреби в матеріальних та фінансових ресурсах, буде надзвичайно важливою. Цей сервіс стане незамінним у вирішенні щоденних побутових питань як для приватних осіб, так і для малих приватних підприємств.

Тема дослідження має значення для галузей, пов'язаних з управлінням запасами, електронною комерцією та аналізом даних. Це стосується не лише роздрібних покупців, але і компаній, які можуть використовувати подібні алгоритми для оптимізації закупівельних процесів, і це дозволить впроваджувати сервісні додатки, які надають індивідуальні поради користувачам щодо їхніх покупок.

**Постановка проблеми.** У сучасному суспільстві та бізнес-середовищі виникає необхідність використання ефективних інструментів для автоматизації процесів закупівель і керування запасами. Є не так багато інформаційних сервісів (у тому числі на Google Play та Apple Store), які призначені саме для обслуговування ресурсів/активів приватних користувачів та допомагають керувати обліком і закупівлею необхідних товарів. При цьому ці інформаційні сервіси, у тому числі промислового призначення, часто також передбачають «ручні операції». Наприклад, урахування залишків товарів та розрахунків часу закупівлі поповнення запасів. Цей процес займає багато часу та потребує перевірки наявності товару, розрахунку бажаної кількості та внесення цих даних у замовлення людиною самостійно.

Проблемне питання полягає у пропозиції щодо індивідуалізованого підходу та автоматизації обліку та закупівлі товарів для користувачів таких сервісів. Зазвичай, існуючі методи та алгоритми оптимізації запасів спрямовані на потреби підприємств та оптових покупців і не враховують унікальних вподобань, структури споживчого попиту та змінних факторів індивідуальних користувачів.

Вирішення цих питань та розробка відповідного інформаційного сервісу слугувало б підвищенню ефективності споживчого сектору, сприяло оптимізації витрат та поліпшенню якості процесу закупівлі. Також це є важливим у галузі управління запасами, де індивідуалізований підхід допоможе компаніям зменшити витрати на зберігання запасів, покращити прогноз попиту та налагодити цільову комунікацію з конкретним користувачем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання методів та технологій щодо організації автоматизованого управління запасами, обліку й закупівлі товарів розглядалися у багатьох дослідженнях. Відповідний інформаційний огляд методів та інструментів для розробки інформаційних сервісів проведено в роботі [7].

У статті «Вибір моделі формування системи управління запасами на підприємстві» [8] пропонується розробка алгоритму для створення системи підтримки прийняття рішень у галузі управління запасами на промисловому підприємстві. Для вирішення завдання було необхідно побудувати модель процесу, засновану на системі відносин між різними змінними. У процесі вибору конкретної моделі для управління запасами були враховані характер попиту, наявність дефіциту, економічність впровадження системи обліку вимог та інші. Попит розглядається з урахуванням його змінюваності в часі. Під час аналізу та оцінки попиту на продукцію для вибору моделі системи управління запасами використовувалися критерії: детермінованість, стохастичність, невизначеність попиту, а також дискретний характер надходження і споживання запасів. Для детермінованих моделей встановлювався повний процес функціонування системи управління запасами в майбутньому, коли стан системи відомий у заданий момент часу. У разі наявності випадкового фактору стан системи в конкретний момент часу можна було визначити лише в разі оперативного фіксування операцій з обліку та їхнього сповіщення виконавцям. Ця модель обробки та роботи із запасами є схожою з тим, що планується зробити в межах цієї наукової статті, але вона спрямована на роботи з великим бізнесом та не може бути пристосована до потреб користувачів.

У роботі «Теоретичні основи управління матеріальними запасами підприємств» [9] розглянуто питання управління матеріальними запасами на підприємстві, а саме: оперативне розпорядження ресурсами, товарами та готовою продукцією з метою забезпечення ефективного виробництва та збуту. Це вимагає визначення необхідного обсягу замовлення та створення системи контролю за фактичними запасами та їх своєчасним поповненням. У статті розглядається підхід до управління запасами, який базується на логістичному підході. Виконано класифікацію запасів, розроблено схему формування запасів на підприємстві та представлено основні етапи управління запасами, які включають у



себе використання різних методів для оптимізації товарно-матеріальних запасів. Найбільш цікавим для нас виглядає процес замовлення та контролю над запасами, який буде використаний як приклад для схожого процесу замовлення в нашій роботі.

У дослідженні «The application of activity based costing (ABC) system in calculating the cost of goods sold (cogs) at PT.XZY» [10] обговорюється методологія Activity-Based Costing (ABC). На відміну від більш традиційних бюджетів за статтями витрат, ABC генерує корисну інформацію щодо того, як витрачаються гроші, наскільки ефективний відділ та як порівняти його з іншими для покращення якості. ABC є більш точною системою управління витратами порівняно з традиційним обліком витрат: виявляє можливості покращення ефективності бізнес-процесів і ефективності шляхом визначення реальної вартості продукту чи послуги. Ця система буде прикладом для нас у межах роботи над інформаційною частиною сервісу помічника, а саме питань витрат користувача.

Розглянемо також приклади вже ухвалених рішень сервісних додатків, які за призначенням та функціональними можливостями будуть корисними для вирішення завдань дослідження. Широке застосування має банківський сервісний додаток «Ukrsibonline» [1], який має корисний функціонал із надання статистичної інформації з використання коштів та її графічного представлення. Схожий контент, як приклад, має додаток «Raiffeisen Online Україна» [4]. Ці сервіси налаштовані саме на допомогу користувачу узагальнити та зрозуміти свої витрати. Збирається статистика щодо витрат за місяць, середніх витрат тощо. Ці дані можуть бути переглянуті користувачем у розділі «Огляд витрат», та дає можливість планувати користувачу свої витрати на майбутнє. Корисним буде передбачити схожий графічний функціонал і в нашому проєкті.

Ще приклад – сервісний додаток Pantrist [5]. Має доволі широкий функціонал, призначений для обліку та замовлення харчових продуктів. Дозволяє створювати список покупок, формувати залишки товарів. Але сервіс не використовує алгоритмів розрахунку періоду використання товару, а лише подає їх як константні значення. Тобто якщо товар закінчився 7 днів тому, то він і буде подаватись до замовлення завжди через 7 днів. Такі розрахунки не є коректними та спроможними покрити потреби користувача. Іншим прикладом є додаток Kitchenpal: Pantry Inventory [3], який нагадує попередній додаток, але має більш широкий функціонал. Додаток має можливість залучити автоматично вибрані користувачем товари до замовлення, планувати замовлення, відповідно до рецептів, які полюбає користувач. Також автори додатка стверджують, що додаток навчається та надає пропозиції, але не уточнюють, які методи для цього використовують.

Також викликає зацікавленість стаття «Розробка мобільного додатку з геолокацією обліку витрат» [11]. Розглядається мобільний застосунок, який допомагає відстежувати й контролювати свої витрати за допомогою функції геолокації. Додаток дозволяє користувачам створювати помітки на карті, що відображає, де вони витрачають свої гроші. Це особливо корисно для тих, хто хоче розуміти, де та як витрачаються кошти користувача.

Матеріал про розвиток напряму банківських додатків, питання актуальності та якості банківських додатків-помічників детально висвітлені у статті журналу Forbes.ua [12]. Цей огляд висвітлює доцільність створення додатків помічників та статистику використання таких додатків. Також можна зрозуміти, що перспективи в розробці персоналізованих додатків помічників є високими.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Для вирішення проблеми створення інформаційного сервісу для обслуговування ресурсів/активів приватних користувачів виникає необхідність розробки моделі та алгоритму для ефективного та індивідуалізованого підходу до обліку та закупівлі товарів із застосуванням відповідних методів. Потрібно передбачити вирішення наступних завдань: скорочення витрат; зменшення часу на покупки; автоматизація процесу купівлі.

Для цього необхідно створити описову модель користувача з атрибутами індивідуальних потреб. На основі моделі потрібно запропонувати відповідну функціональну схему розробки персоналізованих пропозицій та стратегій, що враховують індивідуальні потреби користувача. Передусім необхідно визначити методи для індивідуалізації функціонування додатка. Покупці різних товарів і послуг мають різні попити та покупкові звички, що вимагає індивідуального підходу.

**Мета дослідження.** Метою проєкту є розробка описової моделі користувача, функціональної моделі та алгоритму інформаційного сервісу з питань обліку й закупівлі, що враховує індивідуальні потреби користувача. Алгоритм повинен передбачати аналіз особистих покупкових звичок, історії замовлень та враховувати фактори, що впливають на періодичність покупок. Для цього передбачається використовувати дані з попередніх покупок, враховувати зміни в споживчому попиті та пропонувати оптимальні періоди закупівлі. Для виконання завдань потрібно організувати процес обліку ресурсів та витрат на їх придбання. Облік витрат як компонент фінансового управління є ключовим для окремої особи, для групи осіб, для компаній та має за мету зменшення витрат та підвищення прибутковості. Серед основних цілей обліку витрат є:

1. Використання методів аналізу даних: для адаптації до змін у кількості товарів та інтервалу між замовленнями, ідентифікації споживчих патернів та прогнозування тенденцій використовуються методи аналізу даних. Це дозволяє розуміти споживчу поведінку та вчасно реагувати на зміни, оптимізуючи процес закупівель.

2. Планування на майбутнє: шляхом використання методів прийняття рішень та індивідуальних параметрів користувача, планується розробка гнучкої системи планування замовлень та витрат. Це дозволить враховувати індивідуальні потреби користувачів та спланувати майбутні замовлення.

3. Прогнозування попиту: попереднє прогнозування кількості товарів або послуг, необхідних користувачам протягом певного періоду часу, є важливим для управління ланцюгом постачання та планування. Це допомагає уникнути надлишкових запасів або нестачі товарів.

4. Регулярний моніторинг та контроль залишків: система моніторингу за залишками товарів дозволяє уникнути надмірних запасів або нестачі товарів шляхом постійного контролю за наявними запасами.

5. Системи автоматизованого замовлення: застосування систем автоматизованого замовлення з урахуванням індивідуальних параметрів оптимізації запасів спрощує та прискорює процес закупівель, забезпечуючи відповідність потребам користувачів.

**Виклад основного матеріалу.** Основним завданням дослідження є проєктування алгоритму інформаційного сервісу та процесу, який буде обробляти дані від системи та користувача, виконувати розрахунки, та автоматично створювати замовлення на підставі отриманих даних.

#### **Описова модель користувача**

Для створення моделі користувача розглянемо дані, необхідні для розробки алгоритму:

1. Характеристики користувача: базова кількість одиниць товару в наявності користувача; бюджет витрат на місяць; ціна або якість (визначатиметься бюджетом та побажанням користувача); бажаний обсяг для зберігання.

2. Потреби та цілі: бажання витратити менше коштів на закупівлю повсякденних товарів; бажання витратити менше часу на закупівлю повсякденних товарів; бажання мати достатню кількість товарів за найкращу ціну.

3. Індивідуальні особливості: цінність часу, що витрачається на побутові речі; цілеспрямованість та мотивація до використання сервісного додатка; рівень досвіду (чи мав користувач досвід зі схожими додатками); бажання співпрацювати з додатком помічником.

4. Ризики: можливість некоректного розрахунку обсягів товару на початковому етапі; ризик перевитрат коштів на початковому етапі використання додатка.

Дані параметри характеризують користувача та будуть використовуватись у таких розрахунках.

Пропонуємо формулу для описової моделі користувача:

$$\text{Користувач} = \langle U, N, C, F \rangle \quad (1)$$

де U (user) – персональні атрибути користувача;

N (needs) – потреби користувача;

C (characteristics) – особливості користувача;

F (fears) – побоювання;

Для індивідуалізації користувача нам важливо врахувати такі характеристики, які можна виміряти:

- U<sub>1</sub>. Ціна або якість додатковий параметр використовуваний користувачем для визначення якого цінового діапазону повинен бути закуплений товар.

- U<sub>2</sub>. Загальний бажаний обсяг зберігання.

- U<sub>3</sub>. Потреба в наявності товару може вимірюватись кількістю одиниць одного товару, що є в постійній наявності.

- U<sub>4</sub>. Бажаний бюджет.

- N<sub>1</sub>. Час, витрачений на моніторинг додатка.

- C<sub>1</sub>. Діапазон (час), який необхідний між закінченням товару та доставкою нового.

- C<sub>2</sub>. Кількість переглядів додатку для контролю за процесами. Може бути розрахована як кількість запусків за добу.

- F<sub>1</sub>. Ризик перевитрат коштів контролюється за допомогою простої формули:

$$F1 = (U_4 - S) > 0. \quad (2)$$

де U<sub>4</sub> – сума коштів, що задовольняє користувача при витраті на закупівлю групи товарів за визначений період;

S – поточні витрати за період;

Запропонована модель дозволяє систематизувати характеристики користувача для подальшого впровадження методів індивідуалізації у розробці інформаційного сервісу.

Сценарії роботи користувача формально можна описати таким чином. Спершу буде розраховуватись кількість товару, яка необхідна для користувача:

$$A(\text{факт}) = \begin{cases} \text{if } (A(\text{мин}) - U_3 \leq 0), \\ \text{than } U_3, \\ \text{else } A(\text{мин}) \end{cases} \quad (3)$$

де A(факт) – актуальна кількість товару для замовлення;

A(мин) – кількість товару з минулого замовлення.

A фактичне дає змогу отримати необхідну кількість товару для оформлення замовлення. Визначення змінної U<sub>3</sub> дозволяє користувачу встановлювати бажану кількість товару на окремий період.

Далі при отриманні товару буде розраховуватись час наступного замовлення саме цього товару за допомогою формули:

$$T(\text{факт}) = \begin{cases} \text{if } (V! = \text{false and } U_4 > 0) \\ \text{than } (X_1 + X_2 + \dots + X_n) / n; \\ \text{else } T(\text{мин}) + T(\text{відкл}); \end{cases} \quad (4)$$

де T(факт) – розрахунковий час для наступного замовлення;

V – необхідність купівлі товару в цьому замовленні;

$U_4$  – бюджет, встановлений користувачем;

$T$ (відкл) – період часу заданий користувачем для очікування;

$T$ (мин) – розрахунковий час попереднього замовлення;

$X_1, X_2, \dots, X_n$  - період використання в днях одного типу товару;

$n$  – кількість замовлень товару;

На час замовлення впливає декілька змінних, що надає можливості точніше розраховувати час для окремого користувача. За допомогою цієї формули отримаємо кількість днів, необхідних для наступного замовлення або додавання товару вже в наявні.

Базовий сценарій розрахунку буде виглядати таким чином:

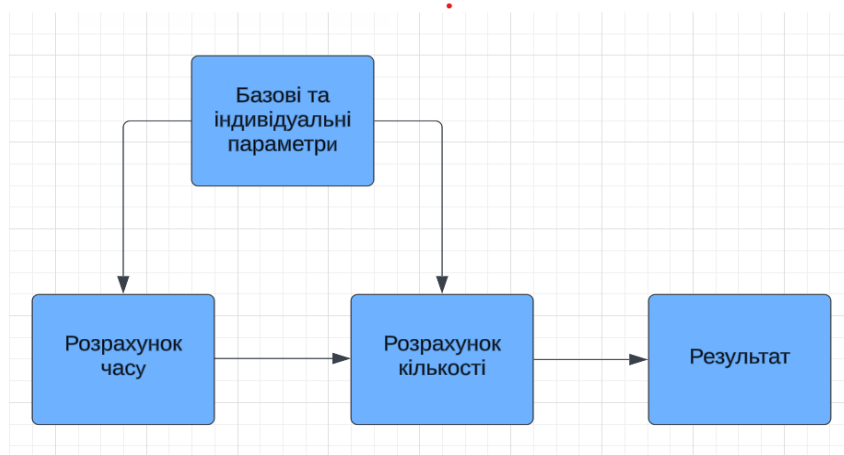


Рис. 1. Базовий процес розрахунку замовлення товару

Джерело: розроблено авторами.

### Алгоритм обліку та закупівлі

Розглянемо більш детально алгоритм визначення залишку товарів та планування, використовуючи методи аналізу даних та регулярного моніторингу. На першому етапі реалізації необхідні початкові дані, серед яких такі характеристики кожного виду товару:

1. Початкова кількість товару ( $U_3$ ).
2. Максимальна сума замовлення.
3. Часовий проміжок (термін) для використання однієї одиниці товару.

Користувач має можливість задати або змінити ці параметри. Наприклад, вказавши 10-15 основних товарів ( $U_3$ ) та обмеження суми замовлення до 1000 гривень ( $U_4$ ). Термін використання товару також визначається користувачем або автоматично задається приблизно в один місяць. Ці дані дають алгоритму необхідну стартову інформацію для планування закупівлі.

Спираємось на описативний аналіз – це перший етап аналізу даних, який включає в себе опис та підведення підсумків щодо основних характеристик набору даних. Будуть створенні записи в базі даних на основі вже отриманих початкових даних від користувача та системи. Це дасть можливість розпочати розрахунки та перейти до наступного етапу.

Прогнозування попиту буде досягається за рахунок вже отриманих даних від попередніх циклів замовлення, або базових та скорегованих користувачем. Буде зрозуміло, які товари і якої кількості вже використано користувачем у минулому. Це дозволить, наприклад, автоматично додавати до замовлення товари, що використовуються регулярно у фіксований період часу.

У комерційних розробках використовуються різноманітні методи розрахунку та оптимізації часу використання товарів. Для нашого дослідження, а саме для розрахунку часу замовлення, використаємо метод нормативів [6], який застосовується в торгівлі, виробництві, логістиці тощо. Цей метод ґрунтується на тому, що для кожного виду товару

існує певна норма споживання - кількісна характеристика, яка визначає, скільки товару необхідно споживати за певний період часу. Для розрахунку часу його споживання за методом нормативів необхідно знати норму споживання товару, та кількість товару, що споживається. Ці дані та розрахунки були наведені вище.

Регулярний моніторинг та контроль залишків забезпечить актуальність наявних запасів у користувача. Кожне нове замовлення буде мати характеристики: час між двома останніми замовленнями, загальна сума замовлення, кількість позицій в замовленні, тощо. За допомогою отриманих даних з попередніх періодів ми можемо розрахувати середній час використання товару, та заздалегідь автоматично додавати його до замовлення. Як приклад, за попередні три замовлення ми використали товар за 15, 20 та 25, днів відповідно. Таким чином, при обрахунку середнього значення, можна запланувати наступним строк використання товару в 20 днів (Т факт).

Система замовлень буде створюватись на базі даних, що визначив користувач. По настанню критичного часу для замовлення товару, або по закінченню товару, потрібно автоматично додати товар до замовлення або створити нове замовлення враховуючи змінну F1. Наступні товари будуть додаватись до замовлення за тим самим принципом, але тільки якщо F1 буде позитивним.

Поки що для нашого проекту процес автоматизації замовлення буде ґрунтуватися на цьому простому алгоритмі, описаному вище. Проте після пілотної апробації інформаційного сервісу плануємо для планування замовлення та прогнозування попиту залучити нейромережеві технології.

Розглядаючи сам процес замовлення товару можливо побачити, що він є циклічним. Кожні 24 години буде запускатись CRON процес, для перерахунку залишків товару. У спрощеному вигляді кожен товар має свою кількість днів для його використання. Щодня ця «дистанція» буде зменшуватись на 1 день. Таким чином, при набуті підрахованої кількості днів, необхідних для закупівлі та доставки товару, потрібно додати товар до існуючого замовлення або створити нове. Залежно від параметрів замовлення буде визначатись час його виконання. Також буде враховуватись час доставки, аби не було проблем з наявністю товару у клієнта.

Реалізація цієї схеми базується на методах ухвалення рішень. А саме обрано метод дерева вибору, також відомий як дерево рішень, що дозволяє моделювати послідовність можливих варіантів вирішення проблеми та їх взаємозв'язків.

Також для обрахунків маємо враховувати такі непостійні параметри:

1. Врахування паузи на випадок перерви користування.
2. Зменшення або збільшення залишків товару, за бажанням клієнта.
3. Збільшення кількості користувачів.
4. Зменшення або збільшення балансу витрат на місяць який задається користувачем

та інше.

Наразі алгоритм передбачає реалізацію більшої частини запитів клієнта, таких як:

1. Своєчасне замовлення товару.
2. Своєчасне нагадування про закінчення товару.
3. Контроль залишків за допомогою алгоритму перерахунку наявності товару.
4. Прогнозування попиту на базі вже отриманих замовлень та використання користувачем товару.
5. Аналіз даних використаних товарів та товарів що є в наявності.
6. Створення автоматизованого замовлення по закінченню групи товарів, або по періоду часу.

З використанням вищенаведених рішень розроблено загальну концепцію роботи алгоритму, візуальна інтерпретація якого у вигляді діаграми надається на рис. 2.

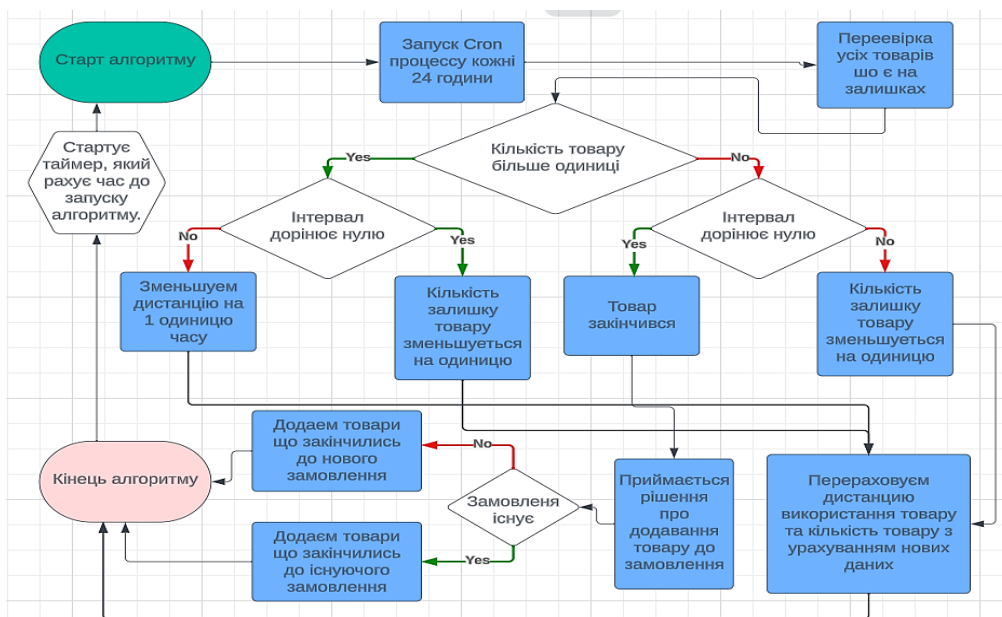


Рис. 2. Концептуальна діаграма процесу розрахунку замовлення товару  
Джерело: розроблено авторами.

Схема деталізує процес роботи алгоритму, та показує як та коли ми починаємо розрахунок залишків, коли та які ухвалюються рішення, коли та як буде створено замовлення. Після запуску CRON процесу система переглядає всі наявні товари та запускає алгоритм обчислення на основі даних по залишках товару, часу його використання та може ухвалити такі рішення:

1. Зменшення часу використання товару на одну добу.
2. Зменшення часу використання товару на одну добу, та зменшення наявної кількості на одиницю.
3. Товар закінчився та має бути доданий до замовлення.

Після цього стартує алгоритм автоматичного замовлення товару. Цей алгоритм вирішує, яку кількість товару ми додаємо до замовлення. Далі запускається перевірка існуючих замовлень. Якщо замовлення вже оформлене, то товар додається до існуючого замовлення. Якщо ні – створюється нове. На цьому розрахунки закінчуються, та запускається таймер відліку часу до наступного запуску алгоритму.

**Висновки.** У роботі виконано створення описової моделі користувача та запропоновано алгоритми розрахунку обліку та закупівлі товару, що дозволить користувачу ефективно керувати своїми споживчими потребами. Розробка цієї моделі та архітектури системи обліку для персональних товарів, на відміну від класичних додатків помічників (банківський сектор, супермаркети), буде спрямована більше на споживача ніж на бізнес. Також розроблена функціональна модель сервісу може бути використана для створення API для бізнесу.

Такі моделі матимуть потенціал завдяки новому напрямку в обслуговуванні клієнтів. Орієнтуючись на потреби користувача та на вигоду бізнесу одночасно. Сфери застосування такої моделі можуть бути:

- 1) окремий додаток з обліку тематичних персональних активів (наприклад - побутова хімія, дрібні товари, продовольчі товари).
- 2) використання API для бізнесу для прогнозування потреб клієнтів на базі власних сайтів. додатків, систем керування.
- 3) використання в системах обліку для можливого прогнозування залишків на складах.

Простота алгоритм, що пропонується, у дозволить швидко та ефективно проектувати відповідні сервісні додатки та програми.

Надалі плануємо створити сервісний додаток, який робить процес закупівлі більш зручним, автоматизованим та індивідуалізованим. Цей інструмент зможе допомогти користувачам зекономити час та гроші, зробивши їхні покупки більш раціональними та зручними.

### Список використаних джерел

1. Uksib Online: додаток в Google Play [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://play.google.com/store/search?q=uksib+online&c=apps>.
2. Fishka: додаток в Google Play [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://play.google.com/store/search?q=fishka&c=apps&hl=ru&gl=US>.
3. Kitchenpal: додаток в Google Play [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://play.google.com/store/apps/details?id=fr.icuisto.icuisto>.
4. Raiffeisen Online Україна: додаток в Google Play [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://play.google.com/store/apps/details?id=ua.aval.dbo.client.android>.
5. Pantrist: додаток в Google Play [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.nicolueg.pantrist>.
6. Економічний аналіз : навч. посіб. / М. А. Болюх, В. З. Бурчевский, М. І. Горбаток ; за ред. акад. НАНУ, проф. М. Г. Чумаченка. – Київ : КНЕУ, 2001. – 540 с.
7. Козолуп, П. Д. Огляд методів та інструментів для розробки інформаційного сервісу обліку особистих активів / П. Д. Козолуп, В. О. Любчак // Інформаційні технології та суспільство. – 2023. – № 3. – С. 47–53. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.3.6>.
8. Меркулов, М. М. Вибір моделі формування системи управління запасами на підприємстві / М. М. Меркулов, Л. В. Ширяєва, В. В. Гуральська // Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету. – 2020 – № 46(13). – С. 95-102. DOI: <https://doi.org/10.32841/2413-2675/2020-46-11>
9. Круш, П. В. Теоретичні основи управління матеріальними запасами підприємств / П. В. Круш, Ю. В. Орлюк // Економічний вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2017. – № 14. – С. 239-245. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.14.2017.108775>.
10. Margareta, L. The application of activity based costing (ABC) system in calculating the cost of goods sold (COGS) AT PT.XZY / L. Margareta // *JURNAL EKSEKUTIF*. – 2017. – № 9(2).
11. Ярмола, В. С. Розробка мобільного додатку з геолокацією обліку витрат / В. С. Ярмола, В. П. Майданюк, О. Н. Романюк // Інформаційні технології і автоматизація – 2023 : Матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції, Одеса, 19-20 жовтня 2023 р. – Одеса : Видавництво ОНТУ, 2023. – С. 299-301.
12. Бегаль, І. Рейтинг банківських додатків. Чи є конкуренти у моно? Чи зміг «Ощад» обійти «Райф» та ОТП? Яке місце у ТОП-10 посідає «Приват»? Дослідження асоціації ЄМА [Електронний ресурс] / Ірина Бегаль // *Forbes.ua*. – Режим доступу: <https://forbes.ua/money/rejting-bankivskikh-dodatkov-chi-e-konkurenti-u-mono-chi-zmig-oshchad-obiyti-rayf-ta-otp-yake-mistse-u-top-10-posidae-privat-doslidzhennya-asotsiatsii-ema-10052023-13576>.

### References

1. Uksib Online: dodatok v Google Play [Uksib Online: Application on Google Play]. (n.d.). <https://play.google.com/store/search?q=uksib+online&c=apps>.
2. Fishka: dodatok v Google Play [Fishka: Application on Google Play]. (n.d.). <https://play.google.com/store/search?q=fishka&c=apps&hl=ru&gl=US>.
3. Kitchenpal: dodatok v Google Play [ICUisto: Application on Google Play]. (n.d.). <https://play.google.com/store/apps/details?id=fr.icuisto.icuisto>.
4. Raiffeisen Online Ukraina: dodatok v Google Play [Raiffeisen Online Ukraine: Application on Google Play]. (n.d.). <https://play.google.com/store/apps/details?id=ua.aval.dbo.client.android>.
5. Pantrist: dodatok v Google Play [Pantrist: Application on Google Play]. (n.d.). <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.nicolueg.pantrist>.
6. Chumachenko, M.G. (Ed.). (2001). *Ekonomichnyi analiz [Economic Analysis]*. KNEU.
7. Kozolup, P.D., & Lyubchak, V.O. (2023). *Ekonomichnyi analiz [Review of methods and tools for the development of personal asset accounting information service]*. *Informatsiini tekhnolohii ta suspiilstvo – Information Technologies and Society*, 3(9).

8. Merkulov, M.M., Shyryaeva, L.V., & Huralska, V.V. (2020). Choosing a model for forming inventory management system at the enterprise [Vybir modeli formuvannia systemy upravlinnia zapasamy na pidp-ryemstvi]. *Scientific Bulletin of the International Humanitarian University – Naukovyi visnyk Mizhnarodnoho humanitarnoho universytetu*, 46(13). <https://doi.org/10.32841/2413-2675/2020-46-11>.

9. Krush, P.V., & Orlyuk, Yu.V. (2017). Teoretychni osnovy upravlinnia materialnymy zapasamy pidp-ryemstv [Theoretical foundations of inventory management at enterprises]. *Ekonomichnyi visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy “Kyivskiy politekhnichnyi instytut” – Economic Bulletin of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”*, (14). <https://doi.org/10.20535/2307-5651.14.2017.108775>.

10. Margaretta, L. (2017). The Application Of Activity Based Costing (Abc) System In Calculating The Cost Of Goods Sold (Cogs) At Pt.Xzy. *Jurnal Eksekutif*, 9(2).

11. Yarmola, V.S., Maidaniuk, V.P., Romaniuk, O.N. (2023). Rozrobka mobilnoho dodatku z heo- lokatsiieiu obliku vytrat [Development of a mobile application with geolocation for expense tracking]. *Proceedings of the Informatsiini tekhnolohii i avtomatyzatsiia – 2023: XVI Mizhnarodnoi naukovo- praktychna konferentsii XVI International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Automation - 2023"* (pp. 299-301).

12. Reitynh bankivskykh dodatviv. Chy ye konkurenty u mono? Chy zmih «Oshchad» obiity «Raif» ta OTP? Yake mistse u TOP-10 posidaie «Pryvat»? Doslidzhennia asotsiatsii YeMA [Rating of banking applications. Does mono have competitors? Was "Oshchad" able to bypass "Rife" and OTP? What place does "Privat" occupy in the TOP-10? Research of the EMA association]. (n.d.). <https://forbes.ua/money/rejting-bankivskikh-dodatviv-chi-e-konkurenti-u-mono-chi-zm>.

Отримано 04.03.2024

UDC 004.896

**Pavlo Kozolup<sup>1</sup>, Liubchak Volodymyr<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD Student, Department of Computer Science  
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

**E-mail:** [pavlo.kozolup@student.sumdu.edu.ua](mailto:pavlo.kozolup@student.sumdu.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-1303-3424>

<sup>2</sup>PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor,

Head of the Cybersecurity Department, Sumy State University (Sumy, Ukraine)

**E-mail:** [v.liubchak@dcs.sumdu.edu.ua](mailto:v.liubchak@dcs.sumdu.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7335-6716>

**SCOPUS Author ID:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55654127800>. **ResearcherID:** IVV-0145-2023

## FUNCTIONAL MODEL AND ALGORITHM FOR THE DEVELOPMENT OF AN INVENTORY AND PROCUREMENT INFORMATION SERVICE

*The research is dedicated to developing an innovative information service to optimize the procurement and inventory management process. The primary focus is on individual user needs, ensuring convenience and cost-effectiveness in everyday purchases. The work involves analyzing existing methods for calculating the optimal procurement period for goods, taking into account personal preferences and the time spent on the purchasing process. It emphasizes the necessity of an individual approach to optimizing the procurement process based on the user's personal characteristics, relying on the time they spend on using the product fully. The proposed algorithm is based on a detailed analysis of personal purchasing habits and order history, considering factors influencing the frequency of purchases for each user. By utilizing data from previous purchases, the algorithm adapts to changes in consumer demand and provides optimal periods for future purchases. Additionally, it can forecast user needs and automatically generate orders accordingly. In the context of the application, implementing this algorithm significantly simplifies and optimizes the purchasing process for each user. Such a service promotes convenience and efficiency in everyday life, helping users utilize their time and resources rationally. In summary, the developed information service addresses current consumer problems, promoting the convenience and efficiency of their purchases. Its individualized approach and ability to adapt to changes make it an essential tool for improving the quality of life for users in the modern world.*

**Keywords:** Information service; inventory management; procurement period; user model; individual customization; order automation.

Fig.: 2. References: 12.



**Світлана Леонідівна Рзаєва<sup>1</sup>, Дарина Дмитрівна Чернишова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення та кібербезпеки  
Державний торговельно-економічний університет (Київ, Україна)

**E-mail:** [rzaevasl@knute.edu.ua](mailto:rzaevasl@knute.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7589-2045>. **Scopus Author ID:** 57217293623

<sup>2</sup>асистент кафедри інженерії програмного забезпечення та кібербезпеки

Державний торговельно-економічний університет (Київ, Україна)

**E-mail:** [d.chernyshova@knute.edu.ua](mailto:d.chernyshova@knute.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2914-8020>

**ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНА СИСТЕМА  
ДЛЯ ГЕНДЕРНО-НЕЙТРАЛЬНОГО ВІДБОРУ КАДРІВ  
ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

*У статті подано концепцію архітектури інформаційно-аналітичної системи для моніторингу гендерної рівності, яка передбачає комплексний підхід до збору, аналізу та моніторингу даних про персонал, з особливим акцентом на гендерні аспекти. Також запропоновано використання математичної моделі коефіцієнтів інформативності ознак образу кандидата на вакансію з урахуванням гендерної рівності. Усе це сприятиме зменшенню ймовірності ухвалення упереджених рішень на етапі найму персоналу та створенню більш справедливого середовища в академічному закладі.*

**Ключові слова:** інформаційно-аналітична система; гендерна рівність; гендерна нейтральність; коефіцієнт інформативності ознак; кандидат на вакансію.

*Рис.: 2. Бібл.: 10.*

**Актуальність теми дослідження.** Дотримання принципів гендерної рівності у сфері вищої освіти становить складну проблему як на глобальному, так і на національному рівнях, охоплюючи як розвинені держави, так і країни, що розвиваються. Незважаючи на те, що університети розглядаються як простір гендерної нейтральності, де чоловіки та жінки мають рівні права й можливості, дослідження показують значну складність ситуації. На структурному рівні це проявляється в перевазі чоловіків на керівних посадах.

Моніторинг ситуації стосовно дотримання гендерної рівності закладами вищої освіти може бути ефективно проведений за допомогою інформаційно-аналітичних систем (ІАС). Ці системи можуть функціонувати як самостійні програмні продукти або бути інтегрованими в системи кадрового обліку університетів. Аналогічні підходи були розглянуті в попередніх дослідженнях, але вони не врахували показники гендерної рівності під час відбору персоналу. У цьому контексті наше дослідження зосереджується на аналізі дотримання гендерної рівності у процесі набору кандидатів на вакансії та розробці методики обчислення коефіцієнта інформативності ознак образу кандидата на вакансію з дотриманням гендерної толерантності до кандидатів на вакантні посади закладу вищої освіти, що робить це дослідження актуальним у сучасному контексті.

**Постановка проблеми.** Законодавство країн Європейського Союзу (ЄС), Сполучених Штатів Америки та інших розвинених націй забороняє роботодавцям дискримінувати претендентів або працівників за расовими, гендерними, релігійними, національними, віковими, інвалідністю або генетичними ознаками. Багато університетів у цих країнах активно працюють над тим, щоб привернути більше жінок до освітніх посад, використовуючи стратегії університетської політики та діяльність студентських організацій.

У сучасному світі, незалежно від галузі бізнесу, освіти чи будь-якої іншої – обсяги інформації постійно зростають. Досягнення успіху залежить від ефективного використання цієї інформації. Інформаційно-аналітична система для моніторингу гендерної рівності (ІАСМГР) може відігравати важливу роль у цьому процесі, що й породило зацікавлення в дослідженні цієї теми. У цьому контексті критерій гендерної нейтральності розглядається як складова оцінки індексу гендерної рівності для науково-педагогічних працівників у сфері вищої освіти. Його засновано на принципі розпізнавання образів з урахуванням гендерної нейтральності під час добору претендентів на вакантні посади.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дотримання принципів гендерної рівності у сфері вищої освіти – це глобальна і складна проблема. Причому не лише держав, що розвиваються, а й розвинених держав. Університети в усьому світі сприймаються як гендерно-нейтральний світ. У такому світі в чоловіків і жінок, здавалося б, мають бути рівні права і привілеї. Однак, як випливає з численних досліджень [1-9], реальність набагато складніша. На структурному рівні в університетах це проявляється в переважанні чоловіків на керівних посадах. Також це стосується і сфер із кращими ресурсами, умовами праці та можливостями для кар'єрного зростання.

Зауважимо, що моніторинг поточної ситуації щодо дотримання гендерної рівності в університетах, може бути досить ефективно здійснений на базі інформаційно аналітичних систем (ІАС). Такі ІАС можуть функціонувати як самостійний програмний продукт. А можуть на рівні окремих університетів бути інтегрованими в системи кадрового обліку (СКО) співробітників університету. Схожу роботу було наведено в [10], де автори виклали своє бачення розв'язання задачі розроблення подібної ІАСМГР для Болонського університету. Однак у цій роботі не було враховано приховані показники гендерної нерівності під час прийняття на роботу співробітників. Саме тому, в основній частині нашого дослідження, детально зупинимося на питаннях дотримання гендерної рівності (нейтральності) під час підбору кандидатів на вакантні посади і розробки математичної моделі коефіцієнта інформативності ознак образу кандидата на вакансію з дотриманням гендерної толерантності. Останнє робить тематику цього дослідження актуальною.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Вказаний вище аналіз останніх досліджень і публікацій не розглядалися питання дотримання гендерної рівності, тобто забезпечення рівних можливостей для всіх кандидатів під час відбору на вакантні посади в академічній установі з урахуванням гендерної толерантності.

**Метою статті** є дослідження властивостей впровадження інформаційно-аналітичної системи моніторингу гендерної рівності для підтримки принципів гендерної толерантності та розроблення математичної моделі обчислення коефіцієнта інформативності ознак образу кандидата на вакансію з дотриманням гендерної толерантності до кандидатів на вакантні посади в академічних установах.

**Виклад основного матеріалу.** У сучасному світі гендерна рівність визнається однією з ключових складових соціальної справедливості та сталого розвитку. Незважаючи на значний прогрес у напрямку досягнення гендерної рівності в багатьох сферах життя, багато країн зіштовхуються зі складністю відстеження та оцінки стану рівності між чоловіками та жінками у різних аспектах суспільства. Однак інформаційні технології можуть відігравати ключову роль у спрощенні цього процесу. Інформаційно-аналітична система моніторингу гендерної рівності серед викладачів університету призначена для аналізу рівності статей серед персоналу закладу вищої освіти, має вагому значущість у межах сучасного академічного процесу.

Архітектура інформаційно-аналітичної системи моніторингу гендерної рівності є важливим інструментом для збору, аналізу та візуалізації даних про стан гендерної рівності. Ця система може включати в себе різноманітні компоненти, від баз даних та аналітичних інструментів до вебінтерфейсів для доступу до інформації.

Архітектура інформаційно-аналітичної системи моніторингу гендерної рівності, показана на рис. 1, апріорі міститиме етапи збирання та оброблення даних, вилучення і завантаження. А також має бути реалізовано механізм накопичення інформації та подальшого її подання у ВД. Подання даних, отриманих під час аналітики, можна представити, наприклад, через вебпортал.

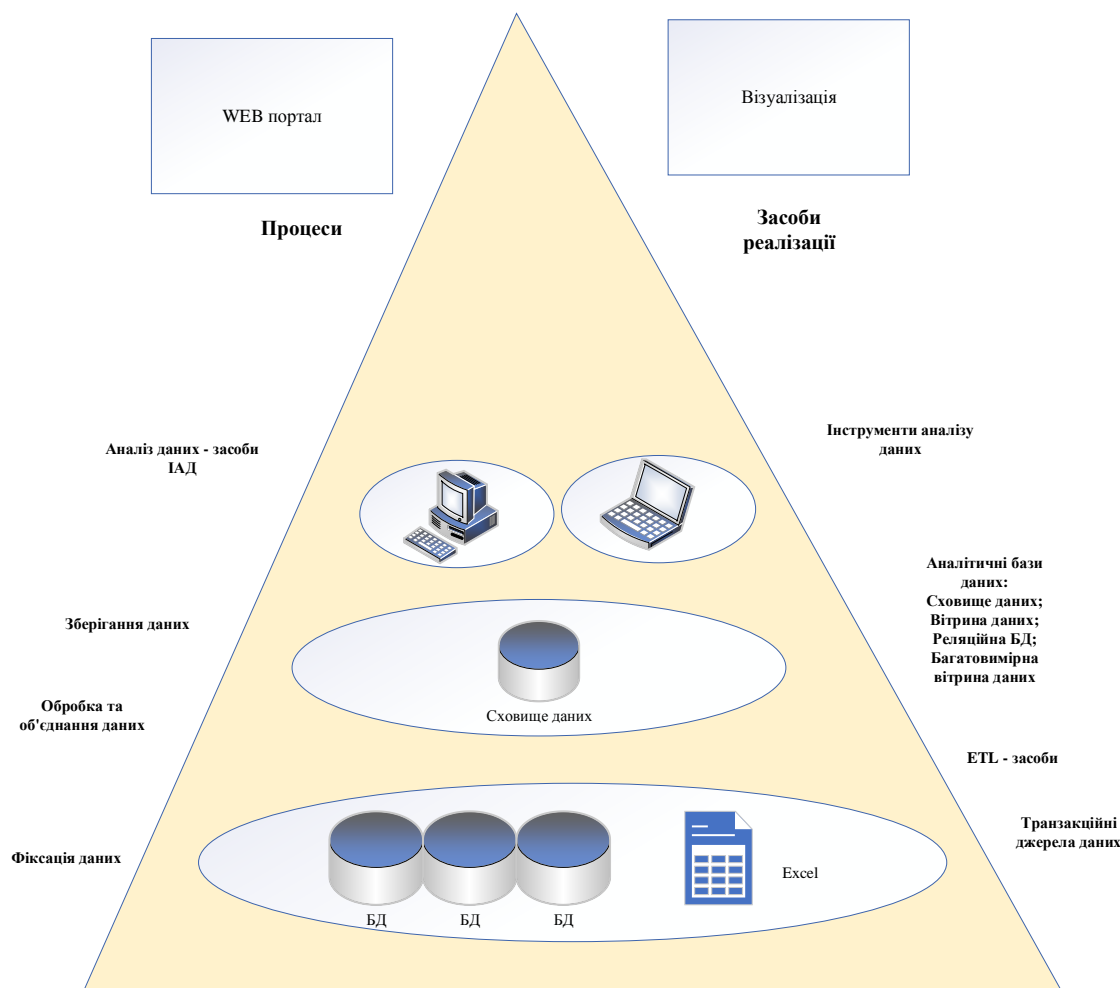


Рис. 1. Концептуальна архітектура ІАСМГР

Розглянемо наявні рівні архітектури ІАСМГР та типові інструменти, які застосовуються на кожному рівні.

Нижній (перший) рівень архітектури ІАСМГР включає у свою структуру транзакційні джерела даних, які мають назву OLTP-системи або транзакційними базами даних (ТБД). ТБД являють собою фундаментальні джерела даних, які орієнтовані на щоденний запис результатів повсякденної діяльності закладу освіти та мають швидко опрацьовувати часто змінюванні дані. Прикладом послугують бази даних (БД), які використовуються для обліку навчальних занять, успішності здобувачів тощо. Це свідчить про тісний взаємозв'язок між даними та програмними засобами, які здійснюють операції управління транзакціями.

Транзакційні бази даних ефективно обробляють щоденні дані, але вони не надають інформації про загальний стан установи. Тому ТБД не підходять для всебічного аналізу показників, що входять до індексу гендерної рівності (ІГР). Проте транзакційні джерела даних використовуються як базова структура архітектури ІАСМГР. Планується, що ІАСМГР буде розроблено на базі існуючих систем збору та попереднього оброблення даних, включаючи транзакційні дані, отримані, зокрема, від інформаційних систем кадрового обліку.

Другий рівень архітектури ІАСМГР використовує ETL-інструменти, які призначені для збирання даних із різних ТБД, їх трансформації, консолідації та завантаження в цільові аналітичні бази даних, такі як сховища даних (СД) і вітрини даних (ВД). На етапі трансформації здійснюється виправлення надмірності даних, виконання необхідних обчислень і агрегацій. Вказаний процес повинен відповідати встановленому регламенту.

Третій рівень архітектури ІАСМГР містить СД (Data Warehouse), що функціонують як централізовані джерела інформації для зберігання та обробки даних. Ці сховища інтегрують інформацію з різних транзакційних систем та надають можливість її аналізу за допомогою сучасних засобів обробки даних. Відповідно до Б. Інмона [1], сховище даних є предметно-орієнтованою, інтегрованою, скоригованою та тимчасово залежною колекцією даних, спрямованою на підтримку управлінських рішень. Особливості сховища даних полягають у рідкісному внесенні змін до даних, періодичному оновленні та використанні єдиного підходу до їхньої ідентифікації та зберігання. СД виконує ключову роль в ІАСМГР, надаючи необхідні інформаційні дані для деталізованого аналізу, збереженої в них, інформації.

Для розв'язання завдання визначення ІГР серед викладачів університету з використанням СД, ми можемо застосувати різні методи аналізу даних, такі як агрегація, фільтрація, обчислення статистичних показників і візуалізація результатів.

Нижче наведено невеликий фрагмент прикладу коду для такого аналізу:

```
import pandas as pd
# Завантаження даних зі сховища даних
data = pd.read_csv("university_data.csv")
# Припустимо, що у вас є файл із даними про викладачів університету
# Фільтрація даних для отримання інформації про викладачів певної статі (наприклад, чоловічої та жіночої)
male_teachers = data[data['gender'] == 'male']
female_teachers = data[data['gender'] == 'female']
# Обчислення кількості викладачів кожної статі
male_count = len(male_teachers)
female_count = len(female_teachers)
# Обчислення індексу гендерної рівності (наприклад, Gender Parity Index)
gender_equality_index = female_count / male_count
print("Кількість чоловічих викладачів:", male_count)
print("Кількість жіночих викладачів:", female_count)
print("Індекс гендерної рівності:", gender_equality_index)
```

Цей приклад коду демонструє завантаження даних про викладачів університету з файлу, фільтрацію даних за статтю, обчислення кількості викладачів кожної статі та обчислення ІГР, на основі отриманих даних.

Якщо на цьому рівні ІАСМГР необхідно виконати агрегацію, фільтрацію, обчислення статистичних показників і візуалізацію результатів, то код дещо ускладниться. Коментарі в коді дають змогу зрозуміти суть реалізованих операцій:

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
# Завантаження даних зі СД
data = pd.read_csv("university_data.csv")
# Припустимо, що в нас є файл із даними про викладачів університету
# Фільтрація даних для отримання інформації про викладачів певної статі (наприклад, чоловіки та жінки)
male_teachers = data[data['gender'] == 'male']
female_teachers = data[data['gender'] == 'female']
# Розрахунок кількості викладачів кожної статі
male_count = len(male_teachers)
female_count = len(female_teachers)
# Обчислення середньої заробітної плати чоловіків і жінок викладачів
male_salary_mean = male_teachers['salary'].mean()
female_salary_mean = female_teachers['salary'].mean()
# Візуалізуємо розподіли заробітної плати викладачів кожної статі
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.hist(male_teachers['salary'], bins=20, alpha=0.5, label='Чоловіки')
plt.hist(female_teachers['salary'], bins=20, alpha=0.5, label='Жінки')
```

```
plt.xlabel('Заробітна плата')
plt.ylabel('Частота')
plt.title('Розподіл заробітної плати викладачів за статтю')
plt.legend()
plt.show()
# Виведення статистичних показників
print("Кількість чоловіків викладачів:", male_count)
print("Кількість жінок викладачів:", female_count)
print("Середня заробітна плата чоловіків-викладачів:", male_salary_mean)
print("Середня заробітна плата жінок-викладачів:", female_salary_mean)
```

Зрозуміло, це лише проста ілюстрація принципу роботи ІАСМГР на цьому рівні.

Четвертий рівень концептуальної архітектури інформаційно-аналітичної системи моніторингу гендерної рівності включає в себе ВД (data marts), призначені для цільового ділового аналізу. Зазвичай вони будуються на базі даних організаційних систем або можуть бути створені безпосередньо з даних, що надходять від транзакційних систем. Залежно від методу зберігання, вітрини даних можуть бути організовані у вигляді реляційних або багатовимірних структур. Реляційні вітрини даних будуються на основі реляційних баз даних за схемою «зірка», у той час як багатовимірні вітрини даних моделюються як OLAP-структури (Online Analytical Processing), де дані представлені у вигляді вимірів і показників.

Вітрини даних забезпечують зручний доступ до інформації для кінцевих користувачів, включно з аналітиками та менеджерами, які не є професійними програмістами. Вони полегшують аналіз даних і підтримують ухвалення рішень в організації. На відміну від ТБД, які використовуються операторами для опрацювання первинної інформації, вітрини даних спрямовані на забезпечення потреб користувачів в аналізі та ухваленні рішень. Використання вітрини даних у поєднанні із сучасними інструментами аналізу даних дає змогу перетворити дані на корисну інформацію, необхідну для ефективного прийняття рішень.

Розглянемо невеликий приклад опису багатовимірної вітрини даних (OLAP) для розв'язуваного завдання моніторингу гендерної рівності (або гендерної нейтральності) серед викладачів університету. Приклад наведено для коду мовою SQL. Припускаємо, що є дві таблиці: «Викладачі» та «Заробітна плата», що містять відповідно інформацію про викладачів та їхні заробітні плати. Тоді код для вітрини даних матиме такий вигляд:

- створення багатовимірної вітрини даних (OLAP) для аналізу гендерної рівності серед науково-педагогічних працівників;
- створення тимчасової таблиці для зберігання даних про кількість науково-педагогічних працівників відносно статі.

```
CREATE TABLE GenderCounts (
  Стать VARCHAR(10),
  TotalCount INT);
-- Заповнення тимчасової таблиці даними про кількість викладачів за статтю
INSERT INTO GenderCounts (Gender, TotalCount)
SELECT Gender, COUNT(*) AS TotalCount
ВІД професорів
GROUP BY Gender;
-- Створення багатовимірної вітрини даних (OLAP) з використанням оператора PIVOT для агрегації
даних
SELECT
  Стать,
  SUM(CASE WHEN Salary >= 50000 THEN 1 ELSE 0 END) AS HighSalaryCount,
  SUM(CASE WHEN Salary < 50000 THEN 1 ELSE 0 END) AS LowSalaryCount,
  SUM(TotalCount) AS TotalProfessors
FROM (
  SELECT
```

```
p.Gender,  
s.Зарплата  
ВІД професорів р  
INNER JOIN Salaries s ON p.ProfessorID = s.ProfessorID) AS GenderSalaries  
GROUP BY Gender;
```

У наведеному прикладі на початку створюється тимчасова таблиця GenderCounts, у якій зберігається інформація про кількість викладачів, розподілених за статевою приналежністю. Далі використовується оператор PIVOT для агрегації даних про кількісні показники зарплат викладачів, відповідно до статевої належності. У результаті формується таблиця з інформацією про загальну кількість викладачів, кількість викладачів кожної статі, кількість викладачів з високими й низькими заробітними платами. Отже, цей приклад демонструє використання багатовимірної вітрини даних для аналізу гендерної рівності серед науково-педагогічних працівників ЗВО та дає змогу ефективно проводити аналітику даних з урахуванням різних аспектів, таких як стать і заробітна плата.

На п'ятому рівні архітектури передбачається використання сучасних програмних засобів, що відомі як інструменти інтелектуального аналізу даних, або ВІ-інструменти. Дані інструменти дозволяють здійснювати комплексний аналіз інформації, обробляти великі обсяги даних, формулювати аналітичні висновки та приймати обґрунтовані рішення, а також передбачати та управляти ризиками. Ці інструменти також надають кінцевим користувачам можливість доступу до інформації, її візуалізації, а також можливість проведення багатовимірного аналізу та створення звітів без необхідності залучення програмістів.

Вхідні дані для ділового аналізу включають не тільки «сирі» дані з транзакційних систем, а й попередньо оброблені дані з СД або ВД. Вітрини даних забезпечують зручний доступ до інформації для кінцевих користувачів, включно з аналітиками та менеджерами, які не є професійними програмістами. Вони полегшують аналіз даних і підтримують ухвалення рішень в організації. На відміну від ТБД, які використовуються операторами для опрацювання первинної інформації, вітрини даних спрямовані на забезпечення потреб користувачів в аналізі та ухваленні рішень. Використання вітрини даних у поєднанні з сучасними інструментами аналізу даних дає змогу перетворити дані на корисну інформацію, необхідну для ефективного прийняття рішень.

Останній рівень архітектури інформаційно-аналітичної системи моніторингу гендерної рівності університету знаходяться сучасні програмні засоби (ПЗ), відомі як інструменти інтелектуального аналізу даних (Business Intelligence Tools – ІАД), або ВІ-інструменти. Інструменти ІАД дають змогу реалізовувати комплексний аналіз інформації, працювати з великими обсягами даних, робити аналітичні висновки та ухвалювати обґрунтовані рішення, а також прогнозувати й управляти ризиками, що особливо важливо для керівництва університету. Інструменти ІАД надають кінцевим користувачам доступ до інформації, її візуалізації, а також можливість проведення багатовимірного аналізу та створення звітів без участі програмістів.

Вхідні дані для ділового аналізу включають не тільки «сирі» дані з транзакційних систем, а й попередньо оброблені дані з СД або ВД.

Введення критерію гендерної нейтральності, при підборі науково-педагогічних працівників на посади у структурні підрозділи закладу вищої освіти, має ряд доцільних причин, а саме: просування в освітню діяльність принцип гендерної нейтральності. Це пов'язано з тим, що введення даного аспекту сприяє та підтримує створення рівних можливостей не тільки для представників обох статей, але й гендерно нетривіальних осіб (осіб «з не визначеною статтю»), при прийнятті їх на вакантні посади. Це важливо для забезпечення справедливого та збалансованого представництва в університетській спільноті всіх представників гендерної спільноти. Інша причина полягає в підвищенні не тільки різноманітності, але

й інклюзивності. Оскільки враховуючи гендерне розмаїття під час найму науково-педагогічного складу, ЗВО створює інклюзивне середовище, що продукує толерантність та взаєморозуміння серед різних груп університетського співтовариства.

Критерій гендерної нейтральності являє собою елемент критерію оцінювання індексу гендерної рівності для науково-педагогічних працівників вищої освіти та, як частина системи керування персоналом, використовується в інформаційно-аналітичній системі автоматизованого методу ідентифікації претендентів на актуальні вакансії. Тобто засновано на ідеї розпізнавання образів з урахуванням гендерної нейтральності під час відбору кандидатів на вакансію.

Для підвищення результативності алгоритму розпізнавання, при аналізі резюме претендента, вводиться коефіцієнт інформативності показника образу кандидата на вакантну посаду. Математично це можна представити за допомогою коефіцієнтів ваг, які відображатимуть вагомість кожної ознаки в процесі відбору кандидатів на посаду.

Є декілька способів визначення ваг, наприклад, експертна оцінка, машинне навчання або аналіз даних. Зупинимось на першому способі – експертній оцінці. Оскільки у формуванні вимог щодо професійних навиків кандидата беруть участь ректор, проректори, декани, завідувачі кафедр та інших структурних підрозділів, пов'язаних з організацією наукової та науково-педагогічної діяльності. Експертна думка вказаних фахівців важлива під час оцінювання значущості ознак, тому що дані експерти мають глибокі знання щодо вимог, якими має володіти кандидат для успішної роботи на конкретній посаді. Використання експертної оцінки дає змогу легко адаптувати модель відбору під конкретні потреби університету. Ваги ознак можуть легко змінюватися або переглядатися відповідно до зміни вимог для вакансій.

Експертна оцінка також дає можливість враховувати унікальні риси та культурний контекст університету, що стає важливим фактором під час відбору кандидатів, та дає змогу поліпшити якість відбору кандидатів, оскільки ваги ознак відображатимуть їхню важливість для успішної роботи на даній посаді. Тобто використання експертного оцінювання для визначення ваг ознак образу кандидата на вакансію значно підвищує ефективність і адаптивність в інформаційно-аналітичній системі підбору кандидатів на вакантні посади, з урахуванням принципу гендерної нейтральності.

Математичний вираз коефіцієнта інформативності ознак образу кандидата на вакансію має наступний вигляд:

$$IZ_p = \frac{\sum_{\substack{(sp'_a, NP_{pa}) \in MC^{AL}(KL) \\ p_a \in NP_{pa}}} vop_{(sp'_a, NP_{pa})}}{\sum_{(sp'_a, NP_{pa}) \in MC^{AL}(KL)} vop_{(sp'_a, NP_{pa})}}, \quad (1)$$

де  $p_a$  – значення ознаки образу кандидата на вакансію;

$vop_{(sp'_a, NP_{pa})}$  – функція значущості ознак образу кандидата на вакансію для експертів;

$NP_{pa}$  – набір ознак образу кандидата на вакансію з урахуванням дотримання принципу гендерної нейтральності при розпізнаванні образу кандидата;

$sp'_a$  – об'єкт із базової вибірки ознак образу кандидата на вакансію;

$KL$  – клас вакансії (науково-педагогічний персонал, адміністрація тощо);

$MC^{AL}(KL)$  – алгоритм розпізнавання образу кандидата на вакансію залежно від класу.

При відборі кандидатів на вакансію з урахуванням необхідності дотримання гендерної рівності можуть бути використані різні інформативні ознаки для множини, які допоможуть ІАСМГР оцінити відповідність кандидата вимогам вакансії та принципам гендерної нейтральності. Нижче наведено невелику кількість прикладів для ознак образу кандидата на вакансію з урахуванням дотримання принципу гендерної нейтральності при розпізнаванні образу кандидата (коефіцієнт  $NP_{p_a}$ ).

Професійні навички та досвід роботи. Оцінка професійних навичок та досвіду роботи кандидата в контексті вимог вакансії, враховуючи знання спеціалізованих технічних навичок.

Освіта та кваліфікація. Рівень освіти та кваліфікації кандидата, у тому числі наявність наукового ступеня, сертифікатів та дипломів, відповідність ліцензійним вимогам та інші умови вакансії.

Професійні досягнення та публікації. Оцінка професійних досягнень кандидата, його наукових досліджень, публікацій, участі в конференціях та наукових проектах.

Комунікативні навички. Оцінка комунікативних навичок кандидата, його здатність ефективно спілкуватися з колегами, студентами та іншими учасниками університетської спільноти.

Особистісні якості. Аналіз особистісних якостей кандидата, таких як толерантність, адаптивність, емпатія та інші, які можуть бути важливими для роботи в університетському середовищі.

Результати інтерв'ю та рекомендації. Оцінка результатів співбесіди з кандидатом, його мотивації, ціннісних орієнтацій та рекомендацій від попередніх роботодавців або закладів вищої освіти.

Професійні цілі та плани. Вивчення професійних цілей та планів кандидата, його готовності та здатності до розвитку та зростання в університетському середовищі.

При цьому важливо враховувати, що оцінка кандидатів повинна проводитись на основі їх професійних якостей та здібностей, а не на основі їхньої гендерної приналежності. Однак важливо також враховувати та дотримуватись принципів гендерної рівності, щоб забезпечити рівні можливості для всіх кандидатів.

Припускаємо, що кожна з ознак  $\{s_1, \dots, s_m\}$  можна подати в певному діапазоні вимірів:  $(p_a, a = 1, n)$  із множини діапазонів ознак для кожної ознаки, тобто отримуємо  $sp'_a$ . Наприклад, припустимо, у нас є кандидат на позицію викладача з інформаційних технологій в університеті. Ми можемо представити його професійні навички та досвід роботи з використанням такої шкали:

Досвід роботи. Цю ознаку можна представити у вигляді кількості років, які кандидат працював у галузі інформаційних технологій. Наприклад, кандидат має 7 років досвіду роботи у сфері ІТ.

Рівень освіти, ознака може бути представлена у вигляді категорій освіти, таких як «бакалавр», «магістр», «доктор наук». Наприклад, кандидат має ступінь магістра з інформаційних технологій.

Спеціалізовані навички, ознака може бути представлена у вигляді списку конкретних навичок і технологій, якими володіє кандидат. Наприклад, кандидат володіє мовами програмування і знайомий з базами даних.

Навчальні курси та сертифікати, дана ознака може бути представлена у вигляді переліку навчальних курсів і сертифікатів, які кандидат успішно завершив. Наприклад, кандидат пройшов курси з Mobile-розробки та отримав сертифікат;



Таким чином, професійні навички та досвід роботи кандидата можуть бути представлені з використанням різних категорій або шкал оцінки, які відображають їхній рівень підготовки.

Функція значущості ознак образу кандидата може мати різні вигляди залежно від конкретних критеріїв, які застосовуються експертами для оцінки кандидата на вакансію. Зазвичай, така функція враховує різні аспекти, які важливі для певної посади, і може бути математично виражена через вагові коефіцієнти, які визначають важливість кожної ознаки.

$$\text{вор}_{(sp'_a, NP_{pa})} = \sum_{i=1}^n w_i f_i(sp'_a, NP_{pa}),$$

де  $w_i$  –вагові коефіцієнти, що визначають значущість кожної ознаки;

$f_i(sp'_a, NP_{pa})$  – функція, що оцінює конкретні ознаки образу кандидата;

$n$  – кількість ознак.

Кожен ваговий коефіцієнт  $w_i$  визначається на основі експертних оцінок

Існує чимало причин, через які потрібно використовувати різні алгоритми. розпі-

знання образу кандидата на вакансію залежно від класу вакансії  $MC^{AL}(KL)$ .

По-перше, для різних класів вакансій можуть бути доступні різні типи даних. Наприклад, дані про освіту, досвід викладання та наукову діяльність можуть підійти для найму професорів, тоді як дані про управління проектами та досвід керівництва можуть бути корисними для найму ректора.

По-друге, існують різні критерії оцінки успішності кандидата на різних посадах. Наприклад, професор може зосередитися на оцінюванні студентів та академічній успішності, тоді як проректор може зосередитися на фінансових показниках і репутації університету. Посади різних рівнів можуть належати до різних сфер застосування та контекстів. Наприклад, викладацька посада може відрізнятися від адміністративної чи дослідницької.

По-третє, різні посади вимагають різних навичок, досвіду та якостей. Наприклад, посада викладача вимагає певних педагогічних навичок і кваліфікацій, тоді як посада декана вимагає управлінського досвіду та лідерських якостей. Тому алгоритми розпізнавання повинні враховувати специфічні вимоги кожної посади.

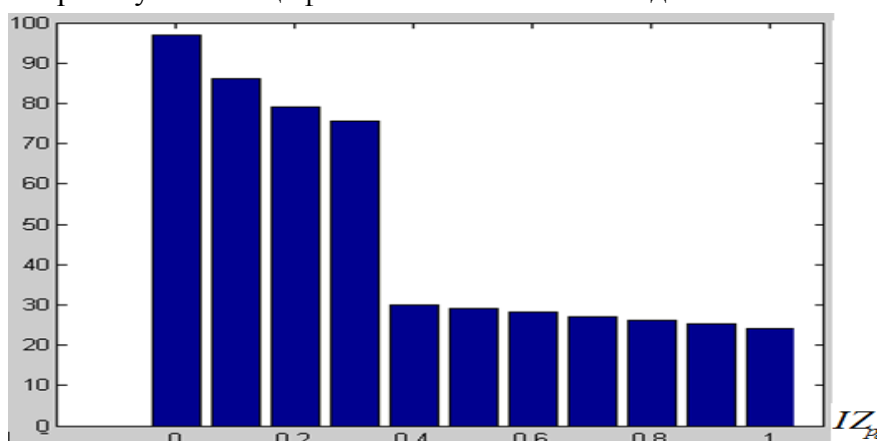


Рис. 2. Розподіл інформативності ознак з дотриманням принципу гендерної нейтральності під час розпізнавання образу кандидата на вакантну посаду

На рис. 2 на шкалі абсцис від 0 до 1 змінюється коефіцієнт інформативності ознак образу кандидата на вакансію, де 0 вказує на неважливість ознаки для експертів, а 1 – на її високу значущість. Отже, коефіцієнт інформативності відображає дану значущість.

При обранні ознак, з урахуванням гендерної нейтральності, їхня вага має бути розподілена рівномірно для всіх кандидатів, незалежно від їхньої статі, що підтверджує використання діапазону від 0 до 1. Різні класи вакансій можуть мати різні критерії оцінювання, що також може позначитися на значенні коефіцієнта інформативності, оскільки знадобиться процедура нормалізації. Отже, діапазон від 0 до 1 (або від 0 до 100) забезпечує гнучкість та універсальність при визначенні коефіцієнтів інформативності ознак образу кандидата на вакансію з урахуванням усіх перелічених вище факторів.

**Висновки.** Отже, у результаті проведеного дослідження було встановлено, що при застосуванні коефіцієнта інформативності ознак образу кандидата в інформаційно-аналітичній системі при підборі претендента на вакантну посаду забезпечує мінімізацію упередженості, оскільки навіть при дотриманні принципу гендерної нейтральності можуть виникати упереджені рішення, що ґрунтуються на незбалансованому розподілі ознак претендентів, відповідно це позначиться на ІГР; виявляє аналогічні упередженості, поліпшує якість процедури відбору кадрів для закладу вищої освіти, враховуючи фактор гендерної нейтральності; зменшує рівень помилок під час підбору кандидатур, створюючи справедливую і надійну систему підбору персоналу; здійснює адаптацію до умов і вимог, що змінюються, дотримуючи принципи рівності та інклюзивності, що є важливим аспектом створення справедливого та різноманітного університетського середовища й позитивно вплине на ІГР.

#### Список використаних джерел

1. Jacobs, J. A. Gender inequality and higher education / J. A. Jacobs // *Annual review of sociology*. – 1996. – 22(1). – С. 153-185.
2. Peterson, H. The gender mix policy—addressing gender inequality in higher education management / H. Peterson // *Journal of Higher Education Policy and Management*. – 2011. – 33(6). – С. 619-628.
3. Miryala, R. Work-life balance amongst teachers / R. Miryala, & N. Chiluka // *The IUP Journal of Organizational Behavior*. – 2012. – № 11(1). – С. 37-50.
4. Punia, V. Quality of work-life balance among teachers in higher education institutions / V. Punia, M. Kamboj // *Learning Community—An International Journal of Educational and Social Development*. – 2013. – № 4(3). – С. 197-208.
5. Silva, J. P. D. Understudied school teachers' work/life balance and everyday life typologies / J. P. D. Silva, F. M. Fischer // *Chronobiology International*. – 2020. – № 37(9-10). – С. 1513-1515.
6. Johari, J. Autonomy, workload, work-life balance and job performance among teachers / J. Johari, F. Y. Tan, Z. I. T. Zulkarnain // *International Journal of Educational Management*. – 2018. – № 32(1). – С. 107-120.
7. Hafeez, U. Impact of work-life balance on job satisfaction among school teachers of 21st century / U. Hafeez, W. Akbar // *Australian Journal of Business and Management Research*. – 2018. – № 4(11). – С. 25-37.
8. Nayeem, M. A. Work-life balance among teachers of technical institutions / M. A. Nayeem, M. R. Tripathy // *Indian Journal of Industrial Relations*. – 2012. – № (47)4. – С. 724-736.
9. Yıldırım, B. The Relationship Between Principles' Leadership Practices and Teachers' Work-Life Balance / B. Yıldırım // *International Online Journal of Educational Sciences*. – 2017. – № 9(3). – С. 755-767.
10. UGII—university gender inequality index. a proposal from the university of Bologna / G. P. Mignoli, B. P. Siboni, P. Rignanese, C. Valentini, T. G. Toschi et al. // *Technical report, Center for Open Science*. – 2018.

#### References

1. Jacobs, J. A. (1996). Gender inequality and higher education. *Annual review of sociology*, 22(1), 153-185.
2. Peterson, H. (2011). The gender mix policy—addressing gender inequality in higher education management. *Journal of Higher Education Policy and Management*, 33(6), 619-628.
3. Miryala, R., & Chiluka, N. (2012). Work-life balance amongst teachers. *The IUP Journal of Organizational Behavior*, 11(1), 37-50.

4. Punia, V., & Kamboj, M. (2013). Quality of work-life balance among teachers in higher education institutions. *Learning Community-An International Journal of Educational and Social Development*, 4(3), 197-208.
5. Silva, J. P. D., & Fischer, F. M. (2020). Understudied school teachers' work/life balance and everyday life typologies. *Chronobiology International*, 37(9-10), 1513-1515.
6. Johari, J., Tan, F. Y., & Zulkarnain, Z. I. T. (2018). Autonomy, workload, work-life balance and job performance among teachers. *International Journal of Educational Management*, 32(1), 107-120.
7. Hafeez, U., & Akbar, W. (2015). Impact of work-life balance on job satisfaction among school teachers of 21st century. *Australian Journal of Business and Management Research*, 4(11), 25-37.
8. Nayeem, M. A., & Tripathy, M. R. (2012). Work-life balance among teachers of technical institutions. *Indian Journal of Industrial Relations*, 724-736.
9. Yıldırım, B. (2017). The Relationship Between Principles' Leadership Practices and Teachers' Work-Life Balance. *International Online Journal of Educational Sciences*, 9(3), 755-767.
10. Mignoli, G. P., Siboni, B., Rignanese, P., Valentini, C., & Toschi, T. G. (2018). UGII—university gender inequality index. a proposal from the university of Bologna.

Отримано 14.05.2024

UDC 004.896.32:316.6:001.8

**Svitlana Rzaieva<sup>1</sup>, Daryna Chernyshova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Software Engineering and Cybersecurity  
State University of Trade and Economics (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [rzaevasl@knute.edu.ua](mailto:rzaevasl@knute.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7589-2045>. **Scopus Author ID:** [57217293623](https://orcid.org/57217293623)

<sup>2</sup>Assistant Professor of the Department of Software Engineering and Cybersecurity  
State University of Trade and Economics (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [d.chernyshova@knute.edu.ua](mailto:d.chernyshova@knute.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2914-8020>

## INFORMATION AND ANALYTICAL SYSTEM FOR GENDER-NEUTRAL SELECTION OF PERSONNEL IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

*Compliance with the principles of gender equality in higher education is a complex issue at both the global and national levels, covering both developed and developing countries. Monitoring of the situation with gender equality by higher education institutions can be effectively conducted with the help of information and analytical systems (IAS).*

*This study focuses on the analysis of gender equality in the process of recruiting candidates for vacancies and the development of a methodology for calculating the coefficient of information content of the candidate's image with gender tolerance for candidates for vacant positions in higher education institutions, which makes this study relevant in the modern context.*

*The purpose of the article is to study the properties of implementing an information and analytical system for monitoring gender equality to support the principles of gender tolerance and to develop a mathematical model for calculating the coefficient of information content of the candidate's image with respect to gender tolerance for candidates for vacant positions in academic institutions.*

*The article presents the architecture of the Information and Analytical System for Monitoring Gender Equality (IASMGE), which includes data mining tools. These tools make it possible to implement a comprehensive analysis of information, work with large volumes of data, draw analytical conclusions and make informed decisions, as well as predict and manage risks.*

*The study considers the criterion of gender neutrality, which acts as an element of the criterion for assessing the gender equality index for research and teaching staff of higher education and, as part of the personnel management system, is used in the information and analytical system of the automated method of identifying applicants for current vacancies. To increase the efficiency of the recognition algorithm, when analyzing an applicant's CV, the coefficient of information content of the candidate's image is introduced. Mathematically, this can be represented by means of weighting coefficients that will reflect the importance of each feature in the process of selecting candidates for a position.*

*It has been established that when applying the coefficient of informativeness of the features of the candidate's image in the information-analytical system when selecting a candidate for a vacant position, minimization of bias is ensured, since even if the principle of gender neutrality is observed, biased decisions based on an unbalanced distribution of the features of candidates may arise, which will affect the gender equality index, improve the quality of the selection procedure for a higher education institution, reduce the level of errors in the selection of candidates, and reduce the number of errors during the selection of candidates, create a fair and reliable system of personnel selection.*

**Keywords:** information-analytical system; gender equality; gender neutrality; coefficient of informativeness of features; candidate for a vacancy.

*Fig.: 2. References: 10.*

**Антон Миколайович Іскрижицький<sup>1</sup>, Артем Олександрович Задорожній<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>аспірант, здобувач наукового ступеня доктор філософії за спеціальністю 122

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** [a.iskryzhytskyi@gmail.com](mailto:a.iskryzhytskyi@gmail.com) **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-4153-2075>

<sup>2</sup> кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії,

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** [zaotroy@gmail.com](mailto:zaotroy@gmail.com) **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3424-7293>

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАЯВНИХ МЕТОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ЗБЕРІГАННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ ПУБЛІЧНИХ ДАНИХ

*Стаття надає всебічний огляд існуючих технологій, включаючи блокчейн та IPFS, детально аналізуючи їхні переваги, недоліки та потенційні сценарії використання для зберігання та обробки публічних даних у децентралізований спосіб. Розглянуто наявні дослідження в цій сфері, які демонструють ефективність децентралізованих рішень у порівнянні з традиційними централізованими системами зберігання даних. У статті детально обговорюються потенційні виклики та обмеження, пов'язані з децентралізованими системами зберігання даних. Зокрема, розглянуто питання сумісності з існуючими інформаційними системами, проблеми виконання операцій у розподіленому середовищі, а також аспекти прийняття цих технологій на ринку. Особливо виділено питання безпеки та конфіденційності, критично важливі при роботі з публічними даними. Стаття містить аналіз перспектив розвитку та можливих напрямків подальших досліджень у цій галузі, що можуть сприяти вдосконаленню та впровадженню децентралізованих технологій для зберігання даних.*

**Ключові слова:** публічні дані; IPFS; блокчейн; аутентифікація; децентралізовані системи.

*Рис.: 4. Бібл.: 38.*

**Актуальність теми дослідження.** Стаття є оглядово-інформаційною. На сьогодні для України постають питання надійного зберігання даних, забезпечення безперервного доступу та безпеки даних, зокрема, публічних даних та відкритих державних реєстрів відповідно до закону про доступ до публічної інформації [1]. Створюються різні типи державних відкритих і закритих реєстрів, які дозволяють інтеграцію зовнішнім споживачам та стороннім організаціям [2]. Це дозволяє отримувати статистичні та інші дані, які необхідні для побудови державної стратегії розвитку та стратегій приватних та державних організацій. Для забезпечення стабільної роботи таких реєстрів та захисту і підтвердження автентичності публічних даних доцільно застосовувати розподілені системи зберігання та адміністрування, такі як IPFS, блокчейн та різні їх імплементації.

**Постановка проблеми.** На сьогодні для зберігання та обробки публічної інформації здебільшого використовуються централізовані рішення, які мають недоліки, такі як вразливість до атак, централізовані точки відмови, обмежена масштабованість та потенційні проблеми з приватністю даних. Водночас децентралізовані рішення набирають популярності, і доцільно вивчити їх з точки зору науки та наукового підходу. Важливо визначити, які децентралізовані рішення є корисними та здатні підвищити характеристики надійності, безпеки, доступності та ефективності для зберігання даних, а які – ні.

**Мета дослідження.** Метою цієї оглядової статті є всебічний аналіз існуючих методів та технологій для децентралізованого зберігання та адміністрування публічних даних, зокрема, визначення їх основних характеристик, переваг та обмежень. Також передбачається оцінка потенційного впливу цих технологій на безпеку, приватність та доступність публічних даних, а також обговорення можливостей для подальшого розвитку та вдосконалення в цій галузі.

**Виклад основного матеріалу.**

**Опис ключових понять і термінології.** Глибоке розуміння принципів та основ децентралізованих технологій є необхідним для адекватного аналізу та оцінки їх застосування в контексті зберігання та адміністрування публічних даних. У цьому розділі будуть викладені та розглянуті ключові концепції, які становлять фундамент децентралізованих систем, включаючи їхні характеристики, принципи роботи та потенційні сфери застосування.

У цій сфері ключове місце посідають розподілені файлові системи та блокчейн-технології, що лягають в основу розвитку суміжних технологій. Зокрема, розподілені хеш-таблиці (DHT) використовуються для підвищення ефективності зберігання та доступу до даних, тоді як розумні контракти та консенсусні алгоритми є невід'ємними складовими блокчейн-систем, забезпечуючи надійність, безпеку та прозорість у процесах обробки та зберігання даних.

**Розподілені системи. Однорангові мережі.** Розподілена система – це система, у якій апаратні або програмні компоненти розташовані на мережевих комп'ютерах, спілкуються та координують свої дії лише за допомогою передачі повідомлень [3, с. 1]. Розподілені системи та однорангові мережі створювалися як відповідь на постійно зростаючу кількість навантаження - як для зберігання великих об'ємів даних, так і для обчислення задач. Так, однорангові мережі дозволяють залучати ресурси всіх користувачів мережі, що призводить до збільшення ресурсомісткості мережі в міру зростання кількості користувачів [3, с. 47]. Загальна схема будови однорангової мережі зображена на рис. 1.

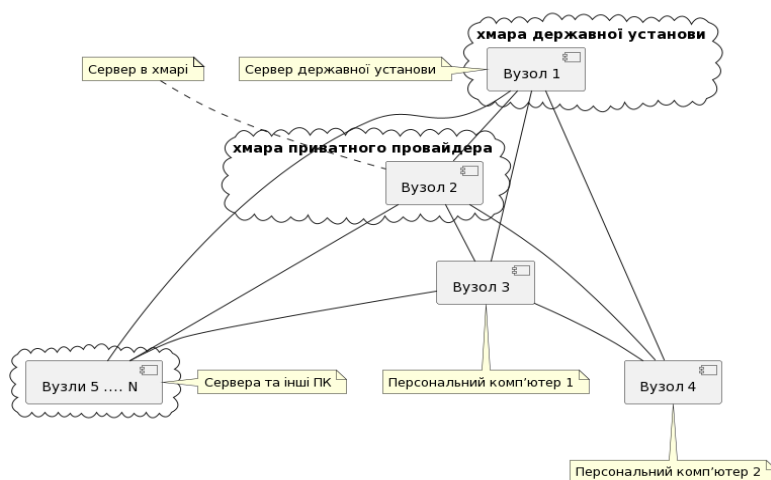


Рис. 1. Приклад однорангової мережі

**Розподілені файлові системи. IPFS.** Розподілені файлові системи – це системи, що використовуються для дозволу багатьом користувачам мати доступ та зберігати файли в спільній файловій системі через мережі [4]. Або більш розгорнуто-розподілена файлова система є додатком на базі архітектури клієнт/сервер, що забезпечує доступ та обробку даних, збережених на кількох серверах, і реагує на клієнта, як і у випадку даних, збережених у локальній системі. Процес полягає в тому, що клієнт отримує копію файлу, яка кешується в локальній системі. Цей тип файлової системи організує файли з індивідуальних серверів у глобальну директорію, тому здається, що доступ до файлу віддалено не залежить від його місцезнаходження, але все ж залишається ідентичним з погляду клієнта. Розподілені файлові системи мають механізми для уникнення конфліктів та намагаються поділитися найсвіжішою версією даних, коли цього вимагає клієнт [5].

Прикладом таких системи є IPFS (англ. *InterPlanetary File System*, міжпланетна файлова система) – глобальна однорангова файлова система з версіями, яка пропонує новаторську парадигму у сфері розподіленого зберігання даних, базуючись на принципах децентралізації та реєр-to-реєр мережевих архітектур [6; 7]. Ця технологія вирізняється з-поміж інших своєю поширеністю, наявністю численних клієнтських застосунків, активним розвитком та відкритим доступом до коду, що публікується на GitHub. Ці характеристики сприяють її популярності та забезпечують широкі можливості для модифікації та адаптації в різних контекстах використання. Останні дослідження в галузі продуктивності, безпеки та надійності імплементації розподіленої файлової системи виявили певні ключові характеристики, які відіграють вирішальну роль в інтеграції системи IPFS у те-

хнічні рішення, пов'язані з децентралізованим зберіганням та адмініструванням публічних даних. Так, наприклад, у дослідженні «Transparency Analysis of Distributed File Systems» [4] було виявлено такі особливості IPFS як:

1. Відсутність механізму базового контролю доступу в системі IPFS веде до того, що будь-які дані, які розповсюджуються через мережу, стають загальнодоступними й підлягають поширенню серед учасників мережі. Це створює обмеження у можливостях видалення або обмеження доступу до даних, оскільки, попри те, що видалення даних можливе з вузлів, які перебувають під контролем користувача, інші учасники мережі, володіючи непідконтрольними вузлами, можуть зберігати копії даних на своїх пристроях. Таким чином, одноразово розповсюджені через IPFS дані можуть залишатися в мережі навіть після спроб їх видалення з певних вузлів [4, с. 40].

2. Низька продуктивність IPFS, спостережена при високому рівні реплікації даних у мережі під час операцій запису. Цей феномен свідчить про те, що збільшення кількості реплік вузлів, задіяних у процесі зберігання, може значно уповільнити загальну продуктивність системи, особливо під час проведення операцій запису даних [4, с. 40].

3. Однією з особливостей IPFS є потенційна вразливість до атак типу DDOS, схожих на атаку slowloris. Зловмисники можуть створити власні вузли в мережі та навмисно сповільнювати доступ до популярних файлів, значно знижуючи загальну швидкість завантаження для користувачів. Це створює важливий аспект безпеки та надійності для IPFS, оскільки така поведінка може підірвати довіру до системи та її ефективність [4, с. 44].

У контексті зберігання публічних даних, ключовими з виокремлених характеристик є здатність до реплікації даних та їх розміщення на зовнішніх вузлах, які не контролюються первинним джерелом. Це має значний вплив на відмовостійкість та надійність системи децентралізованого зберігання та адміністрування публічних даних, забезпечуючи стабільність роботи у випадку проблем з серверним обладнанням первинного джерела, таких як хакерські атаки або блекаути (рис. 2). Надійність та стабільність системи вважається більш важливим параметром, ніж продуктивність запису. Натомість відсутність механізму базового контролю доступу та вразливість до атак, описаних у пункті 3, вимагає додаткового дослідження та можливої компенсації за допомогою інших шарів системи, у які може бути інтегрований IPFS як технологія для дистрибутивного зберігання файлів.



Рис. 2. IPFS під час хакерської атаки та відключень світла

**Блокчейн системи. Механізми консенсусу.** Блокчейн можна визначити як незмінну розподілену цифрову книгу послідовних записів, яка захищена за допомогою вдосконаленої криптографії, тиражується серед однорангових вузлів у одноранговій мережі та використовує механізм консенсусу для узгодження журналу транзакцій [8, с. 3]. Залежно від механізму консенсусу розрізняють публічні блокчейни та блокчейни з контрольованим доступом. Останні своєю чергою поділяють на консорціумні та повністю приватні (рис. 3) [9].

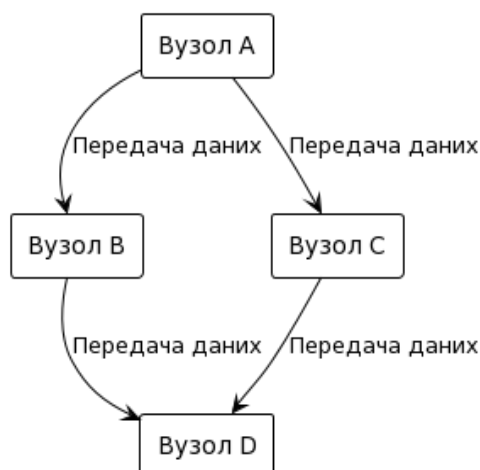


Рис. 3. Публічна однорангова блокчейн мережа

Виділяють чотири основні ознаки, за якими консорціумні блокчейни відрізняються від публічних [10]:

*Ідентифікація.* У публічних блокчейнах приєднання до мережі анонімні, особи учасників транзакції не можна перевірити. У консорціумному блокчейні для проведення транзакцій учасники спочатку повинні авторизуватися, тому їх особу можна встановити.

*Вибір вузлів.* У публічному блокчейні вузлом мережі може стати будь-який комп'ютер. Внаслідок цього надійність системи зростає зі збільшенням кількості вузлів, але одночасно зростає і складність досягнення консенсусу, оскільки потрібна згода від більшості обслуговуючих вузлів. У консорціумному блокчейні вузлами можуть стати лише авторизовані машини. Оскільки валідатори відомі, а їх кількість буде порівняно невеликою, досягти консенсусу легше. Це полегшує зміну правил, скасування транзакцій або інші зміни в блокчейні. Однак така підвищена гнучкість може бути недоліком, якщо метою блокчейну є абсолютна незмінність, щоб уникнути будь-яких форм маніпулювання даними.

*Консенсус.* У випадку публічних блокчейнів, участь у механізмі консенсусу можуть брати всі вузли. У випадку консорціумних блокчейнів лише вибрані вузли можуть виступати валідаторами в механізмі консенсусу, а їх кількість можна контролювати, тож механізм консенсусу виявляється дешевшим та простішим, порівняно з публічним блокчейном. За рахунок меншої кількості вузлів, блоки додаватимуться з більшою швидкістю.

*Прозорість транзакцій.* Публічні блокчейни є повністю прозорими, оскільки будь-хто може ознайомитися з вмістом блоків. Водночас це може створювати проблеми, якщо вміст блоків пов'язаний з конфіденційною або чутливою інформацією. У консорціумних блокчейнах розробники можуть приховати вміст блоків та зробити його доступним лише для певних користувачів, яких стосується певна транзакція, таким чином вирішуючи проблему конфіденційності.

Приватні блокчейни, по суті, є централізованими системами, оскільки вони використовують модель єдиної сутності з високим рівнем довіри, доповнюючи її певним ступенем криптографічної перевірки [10].

Незважаючи на те, що найбільш популярним та відомими нині є публічні блокчейни, які забезпечують функціонування різних криптовалют, у контексті систем зберігання та адміністрування публічних даних цікавішими є блокчейни з контрольованим доступом [8, с. 3] (рис. 4) або гібридні варіанти [11].

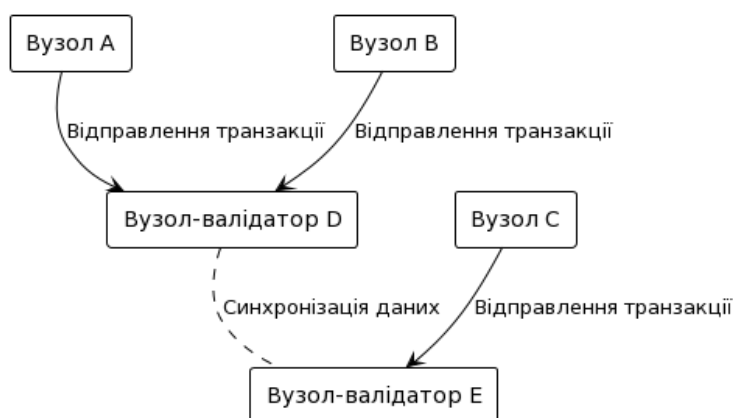


Рис. 4. Блокчейн мережа з контрольованим доступом

Для досягнення згоди між вузлами блокчейн мережі щодо валідності транзакцій та порядку їх додавання до блокчейну використовуються спеціальні протоколи, які називаються механізмами консенсусу. До найбільш типових механізмів консенсусу належать Proof of Work (PoW), Proof of Stake (PoS), Delegated Proof of Stake (DPoS), and Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT). Розглянемо їх детальніше.

Proof of Work (PoW, доказ роботи). Висловлюючись коротко, PoW — це криптографічне підтвердження нульового знання, у якому одна сторона доводить іншим, що певна кількість зусиль (енергії) була витрачена на певне надскладне обчислювальне завдання. Ключовою особливістю концепції PoW є те, що незалежні сторони можуть перевірити ці витрати з мінімальними зусиллями. PoW є найбільш поширеним механізмом криптовалютного ринку [12]. Важливою перевагою системи є її безпечність: для втручання в систему порушнику необхідно витратити надзвичайно велику кількість енергії. Деякі автори стверджують, що цей механізм потенційно вразливий до атаки 51 %, однак, за деякими розрахунками, ресурсні витрати такої атаки для зловмисників будуть більші ніж завдана шкода та отримані прибутки [13]. Найбільш важливим недоліком механізму Proof of Work є надзвичайно високе споживання електроенергії: усі вузли блокчейну витрачають енергію для розв'язання складних математичних задач, однак, лише вузол, який розв'язує задачу першим, може додати новий блок до системи й отримати винагороду. Також гостро постає проблема масштабування, оскільки зі зростанням мережі зростає і кількість ресурсів для додавання нових блоків [14].

Більш ефективним механізмом є Proof of Stake (PoS, Доказ частки) [15]. Суть механізму полягає в тому, що для створення блоків алгоритм на основі певних критеріїв вибирає осіб, яких називають валідаторами. Вони обираються рандомно, імовірність обрання вузла валідатором зростає пропорційно до частки токенів та віку суб'єкта в системі. Захист системи ґрунтується на тому припущенні, що суб'єкти, які мають частку в системі, зацікавлені у її захисті, оскільки із послабленням безпеки системи їхня частка втрачає вартість [16]. Проте цей механізм є вразливим до Nothing-at-Stake проблеми.

Proof of Stake та Proof of Work є найбільш ефективними механізмами для блокчейнів з нульовою довірою учасників і дозволяють проводити повністю анонімні транзакції [14].

Варіацією цього ж механізму є Delegated Proof-of-Stake (DPoS, делегований доказ частки), у якому вибрані вузли, яких називають виробниками блоків або свідками, по черзі генерують блоки мережі та отримують певну винагороду. Власники часток пропорційно до своїх часток голосують за вузли, які будуть виробниками. Вони також можуть звільнити виробників, які погано виконують свою роботу, та призначити нових, що стимулює виробників стежити за своєю репутацією [17]. Оскільки кількість виробників блоків обмежена (зазвичай від 20 до 100), цей механізм краще масштабується, ніж Proof of



Stake та Proof of Work, має вищу пропускну здатність за кількістю транзакцій за одиницю часу та потребує суттєво менших затрат для додавання нових блоків, однак, обмежена кількість делегатів відкриває вразливість до атаки 51 % [8]. Також серед недоліків зазначають його нижчу децентралізацію, порівняно з механізмами Proof of Stake та Proof of Work, втім для консорціумних або приватних блокчейнів цей недолік є несуттєвим [18].

Ще одним подібним по суті, але менш децентралізованими по факту механізмом є Proof-of-Importance (PoI, доказ значущості), у якому кожному вузлу присвоюється певна оцінка важливості, яка демонструє його значення для сукупної цінності системи. Вузли, що мають вищі оцінки важливості, з більшою імовірністю отримують право генерувати або збирати блоки. Оскільки вхідними даними для визначення важливості вузла є кількість транзакцій за останні 30 днів, накопичена цінність та взаємозв'язки з іншими вузлами блокчейну, більш активні вузли отримують винагороду за рахунок менш активних, таким чином концентруючи вплив на собі та знижуючи децентралізацію [8].

Також механізми консенсусу можуть використовувати як доказ фізичні носії. Proof-of-Space (PoSpace, доказ простору) – алгоритм, заснований на дисковому просторі: основним ресурсом для доказу є простір жорстких дисків учасників блокчейну, яке резервується під спеціальні функції блокчейну, наприклад, заповнення хеш-кодами для подальшої валідації блоків.

Багато механізмів у чистому вигляді є малоприматними для використання у публічних блокчейнах, однак можуть бути корисними у приватних.

Proof-of-Authority (PoA, доказ авторитету) – алгоритм консенсусу, заснований на авторитеті валідаторів. У ньому валідатори як доказ використовують власну репутацію. Валідаторів обирають учасники мережі шляхом голосування, і зазвичай кількість валідаторів обмежена. Відсутність винагородження валідаторів та ризик централізації робить цей механізм більш ефективним для використання у приватних блокчейнах, в яких проблема децентралізації не актуальною.

Practical Byzantine Fault Tolerance (Практична візантійська відмовостійкість) – був розроблений для вирішення проблем, пов'язаних із механізмом Byzantine fault tolerance. На відміну від останнього, цей механізм не вимагає синхронної взаємодії учасників, тому є більш практичним. Консенсус досягається у випадку, коли більшість вузлів голосують за приєднання блоку. Вузли в системі розподілені послідовно, один вузол є провідним, інші – вторинними. Провідний вузол відповідає за сортування запитів та їх послідовну відправку вторинним вузлам. У випадку відмови первинного вузла, його місце посідає вторинний [19]. Зазвичай, системи з використанням Practical Byzantine Fault Tolerance використовують менш як 20 попередньо вибраних вузлів перевірки, оскільки кількість повідомлень за експонентою зростає зі збільшенням кількості вузлів. Алгоритм є досить ефективним, але в основному використовується в приватних блокчейнах. Оскільки для ефективної роботи системи необхідно, щоб кількість небезпечних вузлів не перевищила або не дорівнювала  $1/3$  від всіх вузлів системи, цей алгоритм може використовуватися лише в умовах присутності часткової довіри.

В цілому, проблеми масштабування, децентралізації та безпеки присутні у всіх механізмах консенсусу, формуючи «трилему» блокчейну, оскільки неможливо одночасно забезпечити максимальну ефективність за трьома показниками: безпека, децентралізація та швидкість (придатність до масштабування). У випадку, якщо підтвердження транзакції вимагається від всіх вузлів, страждає швидкість; в умовах призначення валідаторів страждає децентралізація; використання мультичейнів вирішує проблеми масштабування та забезпечує децентралізацію, однак, знижує безпечність системи [20]. Таким чином, вибір алгоритмів консенсусу повинен здійснюватися з урахуванням потреб та пріоритетів організації.

**Смартконтракти в блокчейн системах.** Смартконтракт – це програма, яка може використовуватися в екосистемі блокчейну для механічного узгодження, виконання та забезпечення виконання умов юридичної угоди [21]. Концепцію смартконтракту вперше запропонував Нік Сабо, який визначив її як комп'ютеризований протокол транзакцій контракту [22, с. 15-18]. По суті, смартконтракти – це контейнери коду, які інкапсулюють і відтворюють умови реальних контрактів у цифровій сфері. Тобто вони є юридичною угодою між двома чи більше сторонами, кожна з яких зобов'язується виконувати свої зобов'язання. Хоча така угода має бути забезпечена законом, смартконтракти заміняють надійних третіх сторін або посередників між договірними сторонами завдяки автоматичному поширенню коду та його перевірки вузлами мережі в децентралізованому блокчейні [23]. Крім того, вони дозволяють здійснювати транзакції між ненадійними сторонами без необхідності прямого контакту між сторонами, довіри до третіх сторін і комісійних витрат на посередників [24], таким чином дозволяючи укладання ділових угод в середовищі нульової довіри [10]. Потрапивши в блокчейн, смартконтракти знаходяться за певною адресою, не контролюються жодним власником і не можуть бути видалені.

Смартконтракт виконується в такій послідовності:

1. Смартконтракт програмується та компілюється в байт-код компілятором.
2. Договір розгортається як правочин.
3. Майнер перевіряє видобуту транзакцію.
4. Транзакція прийнята в блокчейн, і контракту присвоєно адресу.
5. Щоб скористатися контрактом, користувачі надсилають транзакції на адресу контракту, вказуючи, яку функцію вони хочуть викликати.
6. Після перевірки транзакцій і майнінгу кожен вузол у мережі виконує функцію смартконтракту.

Смартконтракти написані в стилі, подібному до написання класу в об'єктноорієнтованому програмуванні.

Слід, втім, зазначити, що деякі дослідники права вважають незмінність та однозначність смартконтрактів потенційно проблематичними, оскільки полісемія трактування традиційних контрактів може служити не технічним недоліком, але цілеспрямованою особливістю, що підтримує їхню соціальну функцію та забезпечує гнучкість у вирішенні правових питань [10].

**SSI, DID, Аутентифікація та підтвердження автентичності даних.** Концепція SSI (самосуверенної ідентичності) була розроблена Крістофером Алленом (2016) як вираження особистого цифрового суверенітету. Він використовував його для опису заснованої на принципах структури, яка створить децентралізовану систему орієнтованих на користувача, самокерованих, сумісних цифрових ідентифікаторів [25]. Головна ідея SSI полягає у переданні сутностям контролю над своїми особистими даними з можливістю вибірково розкривати атрибути ідентифікації та зберігати конфіденційність, цілісність і достовірність даних, не покладаючи цю відповідальність на традиційні органи влади [26; 27].

У цій моделі присутні три діючих сутності: власник ідентифікаційної інформації – той, кому належать облікові дані, емітент – сутність, відповідальна за видачу власникам документів, які підтверджують облікові дані (verifiable credentials) та верифікатор – сутність, що використовує надані облікові документи для автентифікації та перевірки представленої особи. Власники конфіденційної інформації зберігають документи, що підтверджують дані у цифрових гаманцях. Така модель дозволяє сутностям безпечно обмінюватися обліковими даними з верифікаторами, встановлюючи довіру та полегшуючи широкий спектр цифрових взаємодій без необхідності централізованих посередників. Система SSI мінімізує довіру до третіх сторін і використовує криптографічні технології, розподілені книги та стандартизовані протоколи для забезпечення безпеки, конфіденційності та сумісності ідентифікаційних даних [29].

Для забезпечення унікальності посилання на учасників SSI використовуються стандартизовані Консорціумом Всесвітньої мережі (W3C) децентралізовані ідентифікатори (DID). DID здатні розв'язуватися у відповідні документи, які містять інформацію, асоційовану з конкретним ідентифікатором, такі як криптографічні ключі та пакети автентифікації. Крім того, документ може містити службові кінцеві точки, які описують, як досягти суб'єкта DID та встановити зв'язок. Створення документів забезпечують системні компоненти, які називаються DID резолверами.

Для зберігання DID та надання необхідних даних для генерації DID документів, використовуються реєстри даних, що підлягають верифікації (Verifiable data registry, VDR). Ці реєстри можуть бути реалізовані в різних формах: розподілені книги, децентралізовані файлові системи, бази даних, однорангові мережі тощо. Довіра до системи може ґрунтуватися або на надійності технології, або на довірі до власника системи.

Взаємодія осіб один з одним та з обліковою книгою відбувається через програмні об'єкти, які називаються агентами. Зазвичай агент отримує доступ до цифрового гаманця для зберігання, отримання та виконання криптографічних операцій з ідентифікаційними даними. Агент SSI здатний підписувати, шифрувати та пересилати повідомлення, пов'язані з обліковими даними та встановленням з'єднань між агентами. Ці дії можуть виконуватися або агентом, автоматично, або користувачем, вручну. Роль агента полягає в тому, щоб захищати цифровий гаманець з даними так, щоб тільки власник гаманця мав до нього доступ.

У SSI облікові дані розглядаються як набір заяв із цифровим підписом емітента, де кожна претензія (claim) є твердженням стосовно суб'єкта (користувача). Верифіковані облікові дані (VC, verifiable claims) – це захищені від підробки облікові дані, які можна перевірити криптографічно. З метою забезпечення можливості перенесення даних та постійності ідентифікації суб'єктів були створені різні стандарти облікових даних, такі як W3C VC, AnonCreds і стандарти ISO mDL, кожен з яких підтримує різні криптографічні докази. Ці формати мають спільну мету: дозволити емітентам пакетувати заяви щодо організацій та запечатувати облікові дані за допомогою криптографії. Заяви можуть включати або облікові дані, які надають суб'єкту ідентифікації права доступу чи привілеї, або перевірку інформації, такої як посилання на документи, що посвідчують особу, професійні сертифікати, кредитну історію або будь-які інші дані чи інформацію. За допомогою криптографічних підписів верифікатори можуть оцінити цілісність облікових даних на основі відкритих ключів емітента [29].

Щоб перевірити будь-які облікові дані, верифікатор робить запит на підтвердження власнику (пруверу), запитуючи певні атрибути та предикати. Деякі з них обов'язково підлягають перевірці (наприклад, номер соціального страхування, вік тощо), а деякі можуть бути підтверджені самим власником особи (наприклад, ім'я, псевдонім або номер телефону). Під час перевірки встановлюється, чи збігаються ключі підписів з ключами особи, яка їх підписує [30].

SSI технологія може бути надзвичайно корисною у сфері аутентифікації/авторизації в різних системах. Наприклад, було запропоновано схему використання, у якій постачальник послуг (Service Provider) виступає одночасно емітентом та верифікатором. Постачальник послуг видає користувачеві сертифікат, що може бути верифікованим, який потім зберігається в його гаманці. Під час доступу до послуги користувач пред'являє сертифікат постачальнику послуги. Якщо сертифікат перевіряється успішно - користувач проходить аутентифікацію [31].

Хоча технологія SSI знаходиться в процесі розвитку, серед потенційних сфер її використання називають систему охорони здоров'я, фінансові установи [31], торгівлю [32], інтернет речей, урядові системи, зокрема, виборчі системи голосування [33].

Серед потенційних небезпек використання SSI зазначають необхідність високої грамотності користувачів стосовно питань безпеки, оскільки їх концепція передбачає те, що користувачі несуть повну відповідальність за розкриття власної конфіденційної інформації. Також поки що не з'ясованим лишається питання сумісності децентралізації контролю над особистими даними з геополітичними реаліями та юридичними вимогами [34]. Ще одним важливим проблемним аспектом цієї технології є неможливість відновлення втрачених ключів до цифрових гаманців, що призводить до незворотної втрати власником доступу до даних та можливостей управління ними.

**Розгляд недосліджених частин загальної проблеми та подальший розвиток.** Децентралізовані мережі мають значний потенціал у сфері державного управління та адміністрування завдяки їх постійності, стійкості та прозорості. Зокрема, у випадку блокчейну науковці [35] звертають увагу на такі його потенційно корисні особливості/можливості:

1. Токенізація: права на виконання дій з активом можуть бути перетворені в елементи даних, які можна передавати, або токени в блокчейнах.

2. Самозабезпечення та формалізація правил: смартконтракти дозволяють спільнотам користувачів кодувати правила таким чином, що вони однозначно розуміються машинами та виконуються самостійно.

3. Автономна автоматизація: після введення інформації децентралізовані автономні організації (DAO) можуть взаємодіяти між собою.

4. Підвищення прозорості: операційні процеси та пов'язані дані стають відкритими й не можуть бути змінені постфактум.

5. Децентралізація управління інфраструктурою: блокчейни дозволяють децентралізовану розробку правил для управління мережею.

6. Кодифікація довіри: блокчейн дозволяє не залучати треті сторони для перевірки угод.

Завдяки зазначеним можливостям впровадження систем на основі блокчейну та IPFS може бути корисним у як мінімум у таких сферах: ведення публічних записів і державної документації, завдяки збільшенню їх прозорості; операції з нерухомістю, завдяки зменшенню кількості посередників укладання угод; державні закупівлі – використання блокчейн систем потенційно обмежує можливості для корупції, лобювання та махінації із залученням третіх сторін; видача документів про освіту, оскільки потенційно може вирішити питання зарахування верифікації цих документів між країнами. Слід зазначити, що на сьогодні вже здійснювалося впровадження пілотних блокчейн проєктів у зазначених сферах в Іспанії, Грузії, США, Південній Кореї, Гані, Україні (OpenMarket). Однак дані щодо їхньої ефективності виявилися суперечливими. Зокрема, постали проблеми недостатньої прозорості створених блокчейнів, надмірної децентралізації, неточності вхідних даних, неможливості вираження деяких величин дискретними значеннями (у сфері впорядкування земельних ділянок), гальмування процесів цифровізації даних [11; 36; 37]. Тому актуальним є пошук оптимальної організації систем з погляду централізації/децентралізації, а також визначення інших проблемних аспектів.

Для визначення найбільш продуктивних способів застосування децентралізованих систем для управління даними корисно також звертати увагу на їх застосування у неприбутковому секторі. Зокрема, набули популярності благодійні пожертви в криптовалюті. Особливо яскраво це спостерігали на початку російського вторгнення в Україну [38]. Використання блокчейн технологій благодійними організаціями може сприяти зростанню довіри, прозорості витрат та фандрейзингу, демонстрації ефективної витрати коштів (власне, також і оптимізації витрат) і, як наслідок, готовності донорів робити пожертви та зростанню ефективності роботи організацій. Дослідити ефективність блокчейн технологій для роботи громадських організацій можна через впровадження пілотних проєктів. Так, IBM з колегами після урагану «Харві» в Техасі запропонувала архітектуру на основі

proof of concept для створення інфраструктури надання допомоги при стихійних лихах. Ця інфраструктура забезпечує зменшення паперової роботи, підвищує довіру до уряду та допомоги [11]. Відповідно, необхідною та перспективною задачею є розробка, впровадження та оцінювання ефективності пілотних проєктів на основі блокчейну для децентралізованого зберігання та адміністрування публічних даних.

**Висновки.** Нині є очевидною необхідність розробки надійних і безпечних систем управління даними у сфері зберігання публічних даних. Оскільки в сучасну цифрову епоху обсяг і значення загальнодоступних даних продовжують зростати, потреба в ефективному управлінні та забезпеченні безпеки та прозорості стає дедалі гострішою. Децентралізовані системи, такі як блокчейн і IPFS є перспективними шляхами вирішення цих проблем, не лише забезпечуючи надійне зберігання даних, але і знижуючи ризики несанкціонованого доступу та підвищуючи стійкість системи до збоїв. Серед проблемних аспектів використання цих технологій слід зазначити питання сумісності, продуктивності, ефективності та аспект сприйняття їх ринком. Тим не менш, зазначені технології мають потенціал до революціонування практики управління даними, сприяючи більшій прозорості, підзвітності та ефективності надання державних послуг, тож розробка децентралізованих систем управління даними є перспективним об'єктом інвестування для зацікавлених сторін в державному та приватному секторах.

#### Список використаних джерел

1. Про доступ до публічної інформації [Електронний ресурс]: Закон України від 13 січня 2011 р. № 2939-VI. – Режим доступу: [https://minjust.gov.ua/m/str\\_35409](https://minjust.gov.ua/m/str_35409).
2. Національні інформаційні системи [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://nais.gov.ua/register>.
3. Distributed Systems: Concepts and Design / G. Coulouris, J. Dollimore, T. Kindberg, G. Blair. – 5th Edition. – 2011. – 1067 p.
4. Wennergren, O. Transparency analysis of distributed file systems: With a focus on interplanetary file system: Bachelor Degree Project in Information Technology / O. Wennergren, M. Vidhall, J. Sörensen. – University of Scovde, 2021. – 83 p.
5. De, Suman. Comparative Study on Distributed File Systems / Suman De1, Megha Panjwan // Studies in Computational Intelligence. – 2021. – Vol. 956. – P. 41-51. DOI: 10.1007/978-3-030-68291-0\_5
6. Welcome to the IPFS docs. IPFS docs: web-site. – Access mode: <https://docs.ipfs.tech>.
7. Kubo: IPFS Implementation in GO. GitHub: web-site. – Access mode: <https://github.com/ipfs/kubo>.
8. Gamage, H. T. M. A Survey on Blockchain Technology Concepts, Applications, and Issues / H. T. M. Gamage, H. D. Weerasinghe, N. G. J. Dias // SN Computer Science. – 2020. – № 1(2). DOI:10.1007/s42979-020-00123-0.
9. Buterin, V. On Public and Private Blockchains. 2015. Ethereum foundation Blog: web-site. – Access mode: <https://blog.ethereum.org/2015/08/07/on-public-and-private-blockchains>.
10. Eenmaa-Dimitrieva, H. Creating markets in no-trust environments: The law and economics of smart contracts / H. Eenmaa-Dimitrieva, M. J. Schmidt-Kessen // Computer Law & Security Review. – 2018. – Vol. 35. – № 1. – P. 69-88. DOI: 10.1016/j.clsr.2018.09.003.
11. Alston, E. Introduction to the special issue: Blockchains and public administration / E. Alston, I. Murtazashvili, M. B. Weiss // Chinese Public Administration Review. – 2024. – Vol. 15(1). – Pp. 3-10. DOI: 10.1177/15396754241228530.
12. Milunovich, G. Assessing the Connectedness between Proof of Work and Proof of Stake/Other Digital Coins / G. Milunovich // Economics Letters. – 2022 – Vol. 211. DOI: 10.2139/ssrn.3970813.
13. Untangling blockchain: A data processing view of blockchain systems / T.T.A. Dinh, R. Liu, M. Zhang, G. Chen, B.C. Ooi, J. Wang // IEEE transactions on knowledge and data engineering. – 2018. – Vol. 30(7). – P. 1366-1385.
14. Bergman, S. Permissioned blockchains and distributed databases: A performance study / S. Bergman, M. Asplund, S. Nadjm-Tehrani // Concurrency and Computation: Practice and Experience. – 2020. – Vol. 32(12). – Article. E 5227.

15. Saleh, F. Blockchain Without Waste: Proof-of-Stake / F. Saleh // *Review of Financial Studies*. 2021. – Vol. 34. – P. 1156-1190.
16. Bentov I, Gabizon A, Mizrahi A. Cryptocurrencies without proof of work / I. Bentov, A. Gabizon, A. Mizrahi // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2016. – Article: 9604. – P. 142–57. DOI: 10.1007/978-3-662-53357-4\_10.
17. A new election algorithm for DPos consensus mechanism in blockchain / Luo Y. Chen Y. Chen Q. Liang Q. // *7th International Conference on Digital Home (ICDH), Piscataway*. – 2018. – P. 116–120.
18. Blockchain for applications of clinical trials: Taxonomy, challenges, and future directions / L. Hang, C. Chen, L. Zhang, J. Yang // *IET Community*. – 2022. – Vol. 16. – P. 2371-2393. DOI: 10.1049/cmu2.12488.
19. Castro, M. Practical byzantine fault tolerance / M. Castro, B. Liskov // *Proceedings of the symposium on operating system design and implementation*. – 1999. – Vol. 20. – Pp. 398–461.
20. Parashar, D., Sharma, M., Sharma, V., Nand, P. Approaching Solutions to Blockchain Security Trilemma and Consensus Mechanisms / D. Parashar, M. Sharma, V. Sharma, P. Nand // *4th International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICAC3N): Greater Noida, India, 2022*. – Pp. 2030-2036, DOI: 10.1109/ICAC3N56670.2022.100745224.
21. Rouhani, S. Security, performance, and applications of smart contracts: A systematic survey / S. Rouhani, R. Deters // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 50759-50779.
22. Mohanta, B. K. An Overview of Smart Contract and Use Cases in Blockchain Technology / B. K. Mohanta, S. S. Panda, D. Jena // *9th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies, ICCCNT*. 2018. – Pp. 15-18.
23. Taherdoost, H. Smart Contracts in Blockchain Technology: A Critical Review / H. Taherdoost // *Information*. – 2023. – Vol. 14. – № 2. – P. 117. DOI: 10.3390/info14020117.
24. Swan, M. *Blockchain: Blueprint for a New Economy* / Melanie Swan. – O'Reilly Media, Inc.: Sebastopol, CA, USA, 2015. – 152c.
25. Allen, C. The path to self-sovereign identity [Blog post] / C. Allen // *Life With Alacrity*. – 2016. – April 25). URL: <https://www.lifewithalacrity.com/2016/04/the-path-to-self-sovereign-identity.html#dfref-1212>.
26. Renieris E. SSI? What we really need is full data portability [Blog post] / E. Renieris // *Women in Identity*. – 2020. URL: <https://womeninidentity.org/2020/03/31/data-portability>.
27. Herian, R. Blockchain, GDPR, and fantasies of data sovereignty / R. Herian // *Law, Innovation and Technology*. – 2020. – Vol. 12(1). – P. 156-174. DOI: 10.1080/17579961.2020.1727094.
28. Satybaldy, A. A Taxonomy of Challenges for Self-Sovereign Identity Systems / A. Satybaldy, M. S. Ferdous, M. A. Nowostawski // *IEEE Access*. – 2024. – Vol. 12. – Pp. 16151-16177. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3357940.
29. Bhattacharya, M. P. Enhancing the Security and Privacy of Self-Sovereign Identities on Hyperledger Indy Blockchain / M. P. Bhattacharya, P. Zavarsky, S. Butakov // *International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*. – 2020. DOI:10.1109/isncc49221.2020.9297357.
30. Ferdous, M. S. Ssi4web: A self-sovereign identity (ssi) framework for the web / M. S. Ferdous, A. Ionita, W. Prinz // *Blockchain and Applications, 4th International Congress: Springer*. 2023. – Pp. 366–379.
31. Keil, J. Self-sovereign identity: Use cases, level of maturity, and adoption [Electronic resource] / J. Keil. – 2022. Infopulse: web-site. – Access mode: <https://www.infopulse.com/blog/self-sovereign-identityuse-cases-adoption>.
32. Tobin A. The inevitable rise of self-sovereign identity. A white paper from the Sovrin Foundation [Electronic resource] / A. Tobin, D. Reed. – 2018. – Access mode: <https://sovrin.org/wp-content/uploads/2018/03/The-Inevitable-Rise-of-Self-Sovereign-Identity.pdf>.
33. CBInsights. How blockchain could secure elections. 2018. – Access mode: <https://www.cbinsights.com/research/report/blockchain-election-security>.
34. Giannopoulou, A. Self-sovereign identity / A. Giannopoulou, F. Wang // *Internet Policy Review*. – 2021. – Vol. 10. – № 2. DOI: 10.14763/2021.2.155035.
35. Rozas, D. Analysis of the potentials of blockchain for the governance of global digital commons / D. Rozas, A. Tenorio-Fornés, S. Hassan // *Frontiers in Blockchain*. – 2021. – Vol. 4. – Pp. 577-680. DOI: 10.3389/fbloc.2021.577680.

36. Kenetey, G. Budgetary control and the adoption of consortium blockchain monitoring system in the Ghanaian local government / G. Kenetey, B. Popesko // *International Journal of Public Sector Management*. – 2024. – Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. DOI: 10.1108/IJPSM-07-2023-0212.

37. Proskurovska, Anetta. The blockchain challenge for Sweden's housing and mortgage markets / Anetta Proskurovska, Sabine Dörry // *Environment and Planning A: Economy and Space*. – 2022. – Vol. 54. – P. 1569-1585. DOI: 10.1177/0308518X221116896.

38. Chen, W. Is cryptoaltruism transforming the nonprofit sector? Lessons from the Ukrainian nonprofits during the Russia-Ukraine war / W. Chen, I. Murtazashvili // *Chinese Public Administration Review*. – 2024. – Vol. 15(1). DOI: 10.1177/15396754231222575.

### References

1. Pro dostup do publichnoi informatsii [On access to public information], Law of Ukraine № 2939-VI (13, 2022). from [https://minjust.gov.ua/m/str\\_35409](https://minjust.gov.ua/m/str_35409).

2. Natsionalni informatsiiny systemy [National Informational Systems]. <https://nais.gov.ua/register>.

3. Coulouris, G., Dollimore, J., Kindberg, T., & Blair, G. (2011). *Distributed Systems: Concepts and Design* (5th ed.). Addison-Wesley.

4. Wennergren, O., Vidhall, M., & Sörensen, J. (2021). Transparency analysis of distributed file systems: With a focus on interplanetary file system. *Bachelor Degree Project in Information Technology*. University of Scovde.

5. De, S., & Panjwani, M. (2021). A Comparative Study on Distributed File Systems. *Studies in Computational Intelligence*, 956, 41-51. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-68291-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68291-0_5).

6. Protocol Labs. (n.d.). Welcome to the IPFS docs. <https://docs.ipfs.tech>.

7. IPFS. (n.d.). *Kubo: IPFS Implementation in GO*. <https://github.com/ipfs/kubo>.

8. Gamage, H. T. M., Weerasinghe, H. D., & Dias, N. G. J. (2020). A Survey on Blockchain Technology Concepts, Applications, and Issues. *SN Computer Science*, 1(2), 3. <https://doi.org/10.1007/s42979-020-00123-0>.

9. Buterin, V. (2015). On Public and Private Blockchains. Ethereum Foundation Blog. <https://blog.ethereum.org/2015/08/07/on-public-and-private-blockchains>.

10. Eenmaa-Dimitrieva, H., & Schmidt-Kessen, M. J. (2018). Creating markets in no-trust environments: The law and economics of smart contracts. *Computer Law & Security Review*, 35(1), 69-88. <https://doi.org/10.1016/j.clsr.2018.09.003>.

11. Alston, E., Murtazashvili, I., & Weiss, M. B. (2024). Introduction to the special issue: Blockchains and public administration. *Chinese Public Administration Review*, 15(1), 3-10. <https://doi.org/10.1177/15396754241228530>.

12. Milunovich, G. (2022). Assessing the Connectedness between Proof of Work and Proof of Stake/Other Digital Coins. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3970813>.

13. Dinh, T. T. A., Liu, R., Zhang, M., Chen, G., Ooi, B. C., & Wang, J. (2018). Untangling blockchain: A data processing view of blockchain systems. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 30(7), 1366–1385.

14. Bergman, S., Asplund, M., & Nadjm-Tehrani, S. (2020). Permissioned blockchains and distributed databases: A performance study. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 32(12), Article e5227.

15. Saleh, F. (2021). Blockchain Without Waste: Proof-of-Stake. *Review of Financial Studies*, 34, 1156-1190.

16. Bentov, I., Gabizon, A., & Mizrahi, A. (2016). Cryptocurrencies without proof of work. *Lecture Notes in Computer Science*, 9604, 142–157. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-53357-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-662-53357-4_10).

17. Luo, Y., Chen, Y., Chen, Q., & Liang, Q. (2018). A new election algorithm for DPoS consensus mechanism in blockchain. In *2018 7th International Conference on Digital Home (ICDH)* (pp. 116–120). IEEE.

18. Hang, L., Chen, C., Zhang, L., & Yang, J. (2022). Blockchain for applications of clinical trials: Taxonomy, challenges, and future directions. *IET Communications*, 16, 2371–2393. <https://doi.org/10.1049/cmu2.12488>.

19. Castro, M., & Liskov, B. (1999). Practical Byzantine fault tolerance. *Proceedings of the symposium on operating system design and implementation*, 20, 398–461.
20. Parashar, D., Sharma, M., Sharma, V., & Nand, P. (2022). Approaching Solutions to Blockchain Security Trilemma and Consensus Mechanisms. In *4th International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICAC3N)* (pp. 2030-2036). <https://doi.org/10.1109/ICAC3N56670.2022.100745224>.
21. Rouhani, S., & Deters, R. (2019). Security, performance, and applications of smart contracts: A systematic survey. *IEEE Access*, 7, 50759–50779.
22. Mohanta, B. K., Panda, S. S., & Jena, D. (2018). An Overview of Smart Contract and Use Cases in Blockchain Technology. In *9th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT 2018)* (pp. 15–18).
23. Taherdoost, H. (2023). Smart Contracts in Blockchain Technology: A Critical Review. *Information*, 14(2), 117. <https://doi.org/10.3390/info14020117>
24. Swan, M. (2015). *Blockchain: Blueprint for a New Economy*. O'Reilly Media, Inc.
25. Allen, C. (2016, April 25). The path to self-sovereign identity. *Life With Alacrity*. <https://www.lifewithalacrity.com/2016/04/the-path-to-self-sovereign-identity.html#dfref-1212>.
26. Renieris, E. (2020). SSI? What we really need is full data portability [Blog post]. *Women in Identity*. <https://womeninidentity.org/2020/03/31/data-portability>.
27. Herian, R. (2020). Blockchain, GDPR, and fantasies of data sovereignty. *Law, Innovation and Technology*, 12(1), 156–174. <https://doi.org/10.1080/17579961.2020.1727094>.
28. Satybaldy, A., Ferdous, M. S., & Nowostawski, M. (2024). A Taxonomy of Challenges for Self-Sovereign Identity Systems. *IEEE Access*, 12, 16151-16177 <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3357940>.
29. Bhattacharya, M.P., Zavarisky, P., & Butakov, S. (2020). Enhancing the Security and Privacy of Self-Sovereign Identities on Hyperledger Indy Blockchain. *International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*. <https://doi.org/10.1109/isncc49221.2020.9297357>.
30. Ferdous, M. S., Ionita, A., & Prinz, W. (2023). Ssi4web: A self-sovereign identity (ssi) framework for the web. *Blockchain and Applications*, 4th International Congress. Springer (pp. 366–379).
31. Keil, J. (2022). Self-sovereign identity: Use cases, level of maturity, and adoption. *Infopulse*. <https://www.infopulse.com/blog/self-sovereign-identityuse-cases-adoption>.
32. Tobin, A., & Reed, D. (2018). The inevitable rise of self-sovereign identity. A white paper from the Sovrin Foundation. <https://sovrin.org/wp-content/uploads/2018/03/The-Inevitable-Rise-of-Self-Sovereign-Identity.pdf>.
33. CBInsights. (2018). How blockchain could secure elections. <https://www.cbinsights.com/research/report/blockchain-election-security>.
34. Giannopoulou, A., & Wang, F. (2021). Self-sovereign identity. *Internet Policy Review*, 10(2). <https://doi.org/10.14763/2021.2.155035>.
35. Rozas, D., Tenorio-Fornés, A., & Hassan, S. (2021). Analysis of the potentials of blockchain for the governance of global digital commons. *Frontiers in Blockchain*, 4, Article 577680. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2021.577680>.
36. Kenetey, G., & Popesko, B. (2024). Budgetary control and the adoption of consortium blockchain monitoring system in the Ghanaian local government. *International Journal of Public Sector Management*. <https://doi.org/10.1108/IJPSM-07-2023-0212>.
37. Proskurovska, A., & Dörry, S. (2022). The blockchain challenge for Sweden's housing and mortgage markets. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 54. <https://doi.org/10.1177/0308518X221116896>.
38. Chen, W., & Murtazashvili, I. (2024). *Is cryptoaltruism transforming the nonprofit sector? Lessons from the Ukrainian nonprofits during the Russia-Ukraine war*. *Chinese Public Administration Review*. <https://doi.org/10.1177/15396754231222575>.

Отримано 22.05.2024



*Anton Iskryzhytskii<sup>1</sup>, Artem Zadorozhnyi<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>PhD student, recipient of the Doctor of Philosophy degree in specialty 122  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [a.iskryzhytskyi@gmail.com](mailto:a.iskryzhytskyi@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-4153-2075>

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Technology and Software Engineering.,  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [zaotroy@gmail.com](mailto:zaotroy@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3424-7293>

## STUDY OF AVAILABLE METHODS AND TECHNOLOGIES FOR DECENTRALIZED STORING AND ADMINISTRATION OF PUBLIC DATA

*The article is an overview and information. In the modern digital world, where the storing and processing of large volumes of data are becoming increasingly relevant, reliable and secure data management is of great importance. The problem of effective management, security, and transparency of public data can be addressed through decentralized systems such as blockchain and IPFS (InterPlanetary File System), that are able to ensure reliable storing, reduce risks of unauthorized access, and increase system fault tolerance. In public registries, which store socially significant data, it is necessary to ensure continuous access and the integration with third-party services databases, increasing consumer trust in the authenticity of the data. This article provides a comprehensive review of various existing technologies, including blockchain and IPFS, their advantages, disadvantages, and potential application for decentralized storing and processing public data, based on existing research in this area. The article examines how blockchain contributes to the security, transparency, and immutability of data, and considers IPFS as an innovative method of data storage, differing from traditional centralized systems. Various aspects of decentralization are analyzed, including its impact on the efficiency and scalability of data storage systems. The article also covers the importance of authentication and authorization in decentralized systems, considering different approaches and protocols that can be used to ensure security and control access to data. Potential challenges and limitations based on previously published research related to decentralized data storage systems, including the problems of their compatibility, performance, and market acceptance, are discussed. Finally, the article discussing future development of these technologies and their potential impact on society and business.*

**Keywords:** Public Data; IPFS; Blockchain; Authentication; Decentralized Systems.

*Fig.: 4. References: 38.*

**Владислав Сергійович Зетченко<sup>1</sup>, Артем Олександрович Задорожній<sup>2</sup>**<sup>1</sup>аспірант кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** [zetchenkovlads@gmail.com](mailto:zetchenkovlads@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0002-9925-8628>. **ResearcherID:** [ITW-2651-2023](https://orcid.org/0009-0002-9925-8628)<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** [zaotroy@gmail.com](mailto:zaotroy@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3424-7293>. **ResearcherID:** [F-6358-2016](https://orcid.org/0000-0002-3424-7293)**ОПТИМІЗАЦІЯ МАРШРУТУ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ  
ЗА ДОПОМОГОЮ АЛГОРИТМУ А\***

Стаття присвячена актуальній проблемі оптимізації маршрутів громадського транспорту у великих містах з використанням алгоритму А\*. Зазначено зростання популяції та вимог до транспортної інфраструктури, що підкреслює важливість забезпечення оптимальних маршрутів для зменшення транспортних заторів та викидів шкідливих речовин. У статті проаналізовано останні дослідження в цій сфері, які використовують різні алгоритми, такі як генетичні алгоритми, метаевристичні методи та штучні нейронні мережі. Представлена у статті інформація має оглядовий характер.

Наведені статистичні дані дорожнього руху за період з 2023 по 2024 рр.

**Ключові слова:** оптимізація маршрутів; громадський транспорт; алгоритм А\*.

Рис.: 3. Табл.: 2. Бібл.: 10.

**Актуальність теми дослідження.** Оптимізація маршрутів громадського транспорту є актуальною проблемою в сучасному світі, де великі міста стикаються зі збільшенням популяції та зростаючими вимогами до ефективності та доступності транспортної інфраструктури. Забезпечення оптимальних маршрутів може покращити рух транспорту, зменшити час подорожі та витрати палива, а також зменшити транспортні затори та викиди шкідливих речовин в атмосферу. У зв'язку з цим дослідження у сфері оптимізації маршрутів громадського транспорту є дуже актуальними.

**Постановка проблеми.** Головною проблемою, яка стоїть перед владою і транспортними компаніями, є забезпечення оптимальних маршрутів для громадського транспорту з урахуванням різноманітних факторів, таких як трафік, попит на перевезення та обмеження інфраструктури. Ця проблема стає ще складнішою у великих містах зі складною мережею транспортних маршрутів та великою кількістю пасажирів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останніми роками було проведено багато досліджень у сфері оптимізації маршрутів громадського транспорту за допомогою різних алгоритмів та підходів. Деякі дослідження фокусувалися на використанні генетичних алгоритмів, інші – на метаевристичних методах, таких як алгоритми мурашиної колонії або віджучення, а також на застосуванні штучних нейронних мереж. Ці дослідження надали цінний внесок у розуміння проблеми та розвиток ефективних методів оптимізації.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Незважаючи на значний прогрес у цій області, існують деякі аспекти, які залишаються недослідженими або потребують подальшого дослідження. Наприклад, більш глибоке вивчення взаємодії між різними видами транспорту та врахування їх взаємодії при оптимізації маршрутів. Також важливо дослідити вплив різних стратегій планування маршрутів на загальну ефективність системи громадського транспорту.

**Мета статті.** Метою цієї статті є систематизація та огляд сучасного стану досліджень у галузі оптимізації маршрутів громадського транспорту з використанням алгоритму А\*. Вона має на меті зрозуміти й підкреслити значення використання цього алгоритму в контексті вдосконалення систем громадського транспорту для більш ефективного та зручного пересування мешканців міст.

**Виклад основного матеріалу.**

*Порівняльний аналіз.* Алгоритм  $A^*$  є популярним методом для пошуку оптимальних маршрутів у графах, таких як дорожні мережі чи ігрові карти [1]. Він поєднує переваги жадібного пошуку та пошуку за першим найкращим шляхом, використовуючи евристичну функцію для оцінки вартості шляху. У цьому розділі порівнюються  $A^*$  з кількома схожими алгоритмами оптимізації маршрутів.

*Алгоритм Дейкстри.* Алгоритм Дейкстри призначений для пошуку найкоротшого шляху від початкової вершини до всіх інших вершин у графі з не негативними вагами ребер.

Переваги:

- Гарантовано знаходить найкоротший шлях.
- Працює для всіх графів із не негативними вагами ребер.

Недоліки:

- Працює повільніше, ніж  $A^*$ , якщо використовувати без евристики, оскільки розглядає всі можливі шляхи.
- Не використовує додаткову інформацію про цільову вершину.

Порівняння з  $A^*$ :  $A^*$  більш ефективний завдяки використанню евристичної функції, яка направляє пошук в бік цілі.

Алгоритм Дейкстри є окремим випадком  $A^*$ , коли евристична функція завжди дорівнює нулю. Це означає, що  $A^*$  при нульовій евристиці працює як Дейкстра, але з додатковими перевагами можливості адаптуватися до конкретних цілей завдяки евристичній оцінці.

*Жадібний пошук за першим найкращим шляхом.* Жадібний пошук за першим найкращим шляхом використовує лише евристичну функцію для вибору наступної вершини для дослідження, ігноруючи вартість шляху, пройденого до неї.

Переваги:

- Часто працює швидше, ніж  $A^*$ , оскільки досліджує менше вершин.
- Простий у реалізації та зрозумілий.

Недоліки:

- Не гарантує знаходження оптимального шляху.
- Може застрягти в локальних мінімумах, якщо евристика не є оптимістичною.

Порівняння з  $A^*$ :  $A^*$  завжди гарантує знаходження найкоротшого шляху, якщо евристика допустима (не переоцінює реальну відстань до цілі).

Жадібний пошук за першим найкращим шляхом не враховує пройдену відстань, тоді як  $A^*$  враховує як пройдену відстань, так і очікувану відстань до цілі, що робить його більш надійним для знаходження оптимальних маршрутів.

*Пошук у ширину.* Пошук у ширину є методом обходу графа, де кожен вузол досліджується рівномірно на всіх рівнях до знаходження цілі.

Переваги:

- Гарантує знаходження найкоротшого шляху в графах без ваги або з однаковою вагою ребер.
- Простий у реалізації.

Недоліки:

- Не підходить для графів з різною вагою ребер.
- Вимагає значних обчислювальних ресурсів та пам'яті для великих графів.

Порівняння з  $A^*$ :  $A^*$  ефективніший у графах з різною вагою ребер завдяки використанню евристичної функції.

Пошук у ширину може бути неефективним для великих графів, тоді як  $A^*$  може значно скоротити кількість досліджуваних вершин завдяки евристиці.

Отже, на цьому етапі вже можна зробити висновок про те, що Алгоритм  $A^*$  є потужним і універсальним інструментом для пошуку оптимальних маршрутів, який об'єднує переваги декількох інших алгоритмів завдяки використанню евристичної функції. Порівняння з алгоритмами Дейкстри, жадібного пошуку за першим найкращим шляхом та пошуку у ширину показує, що  $A^*$  є ефективнішим і надійнішим у багатьох випадках, особливо коли використовується правильна евристика.

*Опис алгоритму.* Алгоритм  $A^*$  використовують для знаходження найкоротшого шляху між двома точками в графі [2]. У контексті систем громадського транспорту, використання алгоритму  $A^*$  може виглядати таким чином:

Представлення графу:

- Визначення вершин та ребер: Граф моделюється, при цьому кожна зупинка чи станція представляє вершину, а маршрути між ними - ребра.
- Вага ребер: Кожному ребру графа присвоюється вага, яка може відображати час подорожі, вартість квитка або інші критерії, що впливають на вибір маршруту.

Початок та кінець маршруту:

- Вибір початкової та кінцевої точок: Користувач визначає, з якої зупинки він починає подорож і куди він хоче прибути.

Запуск алгоритму  $A^*$ :

- Ініціалізація алгоритму: Початкова вершина вважається поточною, а решта вершин відомі лише як потенційні.
- Розрахунок маршруту: Алгоритм  $A^*$  визначає найкоротший шлях між початковою та кінцевою точками, оцінюючи вагу кожної вершини з урахуванням ваг ребер та евристичної функції.
- Оновлення поточної вершини: Алгоритм обирає наступну вершину для розгляду, оновлює оцінки ваг для сусідніх вершин та продовжує процес досягнення кінцевої точки або досягнення кінця графа.

Вибір оптимального маршруту:

- Відновлення маршруту: після досягнення кінцевої точки або закінчення роботи алгоритму, відновлюється найкоротший шлях, який стає оптимальним маршрутом для подорожі.
- Врахування обмежень: додаткові обмеження, такі як пересадки або певні маршрути, можуть бути враховані для вибору найбільш відповідного маршруту для користувача.

Підрахунок часу та вартості:

- Обчислення часу подорожі: оцінка часу, який займе подорож за обраним маршрутом.
- Обчислення вартості: оцінка вартості квитка або проїзду за обраним маршрутом.

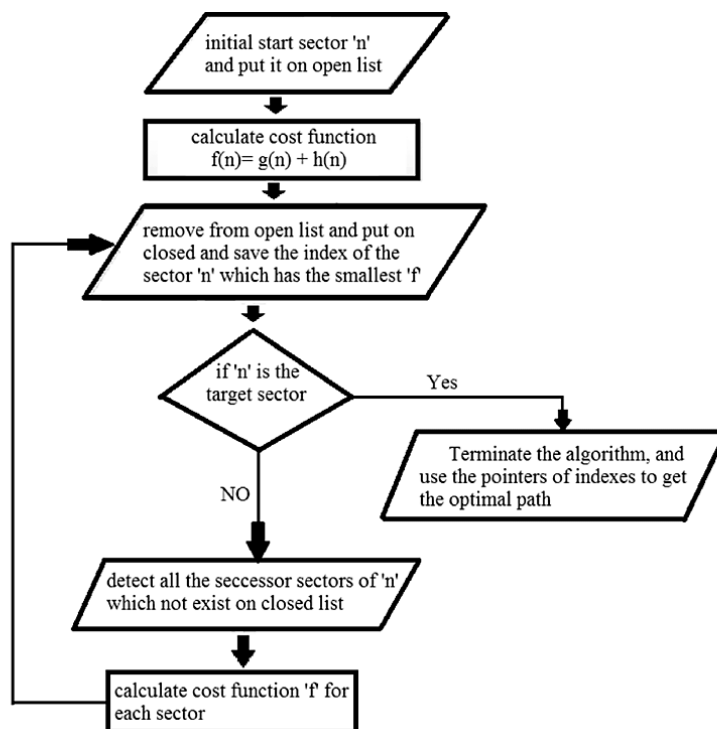
Відображення маршруту:

- Представлення на мапі: оптимальний маршрут може бути відображений на мапі або у спеціалізованому додатку, щоб користувач міг легко зорієнтуватися під час подорожі.

Таким чином,  $A^*$  використовується в реальних системах громадського транспорту для планування оптимальних маршрутів та навігації [3]. Наприклад, у системах онлайн-карт, мобільних додатках для навігації та системах керування маршрутами автобусів та метро [4]. Використання алгоритму дає змогу забезпечити швидке та ефективне планування маршрутів, зменшити час подорожі та покращити загальний досвід користувачів транспорту.

Блок-схема алгоритму  $A^*$  представлена на рис. 1.

Загалом, він є одним із найефективніших методів знаходження найкоротшого шляху у графі з вагами. Він поєднує в собі елементи жадібного та інформованого пошуку, що робить його ефективним для застосування у задачах оптимізації маршрутів громадського транспорту.

Рис. 1. Блок-схема алгоритму  $A^*$ 

Джерело: розроблено авторами.

**Ефективність.** Алгоритм використовується в системах громадського транспорту з метою забезпечення оптимальних маршрутів для пасажирів [5]. Це важливо з огляду на ефективність та швидкість знаходження найкоротшого шляху в графі міста. Використання  $A^*$  дозволяє зменшити час обчислень та забезпечити оптимальні результати, що робить його привабливим вибором для реалізації в системах масового транспорту. Крім того, цей алгоритм має властивість знаходити найкоротший шлях, що забезпечує ефективність та надійність маршрутів. Враховуючи складність міської інфраструктури та різноманітні умови пересування, ефективне планування маршрутів з використанням алгоритму  $A^*$  є важливим елементом для покращення якості послуг громадського транспорту.

**Оптимальність.**  $A^*$  відомий своєю оптимальністю у знаходженні найкоротших шляхів у графах з вагами.

Основним компонентом, який забезпечує оптимальність, є евристична функція або «попередній оцінювач», який дає оцінку вартості подорожі від поточної вершини до кінцевої. Ця функція дозволяє алгоритму пришвидшити пошук шляху, обмежуючи кількість розглянутих вершин. Зазвичай вона використовується для оцінювання вартості подорожі без врахування ваг ребер, тобто вона дає нижню межу вартості подорожі від поточної вершини до кінцевої.

Оптимальність алгоритму  $A^*$  підтверджується математичною теорією та емпіричними дослідженнями. Його ефективність і надійність роблять його популярним інструментом для планування маршрутів у різних областях, включаючи громадський транспорт, логістику та штучний інтелект. Відмінна здатність алгоритму знаходити найкоротший шлях у графах з вагами робить його невід'ємним компонентом для вирішення багатьох проблем, де важлива оптимізація маршрутів і ресурсів.

Важливою властивістю оптимальності є гарантоване знаходження найкоротшого шляху при дотриманні відповідних умов. Це робить його ідеальним інструментом для оптимізації маршрутів громадського транспорту, де ефективність та економічність мають велике значення. Він дозволяє забезпечити мінімальні часи подорожі та мінімальні витрати ресурсів, що є критичними факторами для підвищення якості послуг транспортних систем.

*Гнучкість.* Гнучкість алгоритму  $A^*$  полягає у його можливості адаптуватися до різних умов і вимог, що робить його ефективним інструментом для оптимізації маршрутів громадського транспорту. Основні аспекти гнучкості алгоритму  $A^*$  включають:

*Евристична функція:* Алгоритм  $A^*$  дозволяє використовувати різні евристичні функції для оцінки відстані між поточним вузлом і цільовим вузлом [6]. Це дозволяє адаптувати алгоритм до різних умов і вимог, таких як різні транспортні мережі або варіанти планування маршрутів.

*Вага ребер:* В алгоритмі  $A^*$  можна використовувати різні ваги ребер для врахування різних факторів, таких як час подорожі, вартість квитків або комфортність маршруту. Це дозволяє враховувати різноманітні критерії оптимізації при плануванні маршрутів.

*Адаптивність до змін:* Алгоритм  $A^*$  може ефективно працювати в умовах зміни параметрів графа, таких як зміна трафіку або розміщення пасажирів. Він може швидко адаптуватися до нових умов і знаходити оптимальні маршрути навіть у динамічному середовищі.

Гнучкість алгоритму  $A^*$  робить його потужним інструментом для оптимізації маршрутів громадського транспорту, дозволяючи ефективно враховувати різноманітні умови та вимоги систем транспорту.

*Масштабованість.* Масштабованість алгоритму  $A^*$  – це його здатність ефективно працювати зі збільшенням розміру вхідних даних, зокрема графів транспортних мереж. Однією з ключових переваг цього алгоритму є те, що він може застосовуватися до великих графів без значного збільшення часу обчислень.

Масштабованість досягається завдяки ефективному використанню пам'яті та оптимізації обходу графа. Алгоритм використовує структури даних, такі як пріоритетні черги та хеш-таблиці, для швидкого доступу до вершин графа та їх ваг. Це дозволяє зменшити час пошуку шляху і пам'яті, потрібної для зберігання інформації про граф.

Ще однією важливою характеристикою масштабованості алгоритму  $A^*$  є його здатність працювати з графами різної складності. Він може ефективно враховувати різні фактори, такі як кількість вершин і ребер, ступінь зв'язності та розмір області пошуку. Це дозволяє використовувати його для планування маршрутів у великих містах зі складною транспортною інфраструктурою, де кількість вершин може бути дуже великою.

Це робить  $A^*$  потужним інструментом для рішення різноманітних завдань планування маршрутів у великих транспортних системах. Алгоритм забезпечує ефективне врахування великої кількості даних і може працювати з графами будь-якої складності, що робить його важливим інструментом для розв'язання реальних проблем транспортного планування.

*Опис даних.* Для прикладу, в дослідженні використовується набір даних у форматі GeoJSON, який містить інформацію про зупинки громадського транспорту у місті Йорк [7]. Кожний об'єкт у наборі даних є географічним записом зупинки (на рис. 2 подана візуалізація даного набору даних).

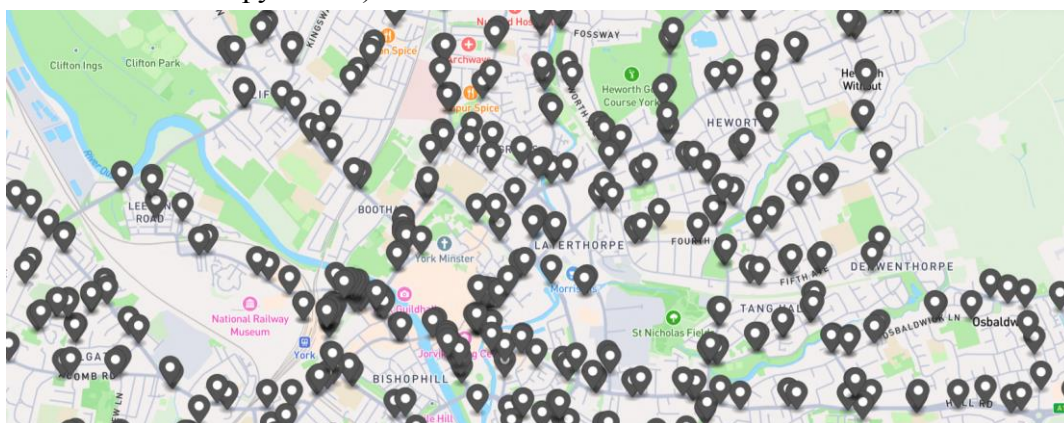


Рис. 2. Візуалізація вихідного набору даних

Джерело: розроблено авторами.

Задача полягає в тому, щоб знайти найкоротші маршрути для покриття всіх зупинок. Наступним кроком є побудова графу, в якому кожен вузол буде являти собою зупинку, а ребра будуть визначати можливі шляхи між зупинками [8].

*Побудова графу.* Для зчитування даних у форматі GeoJSON та обробки їх було використано засоби мови Python (повний лістинг програмного коду представлено на рис. 3).

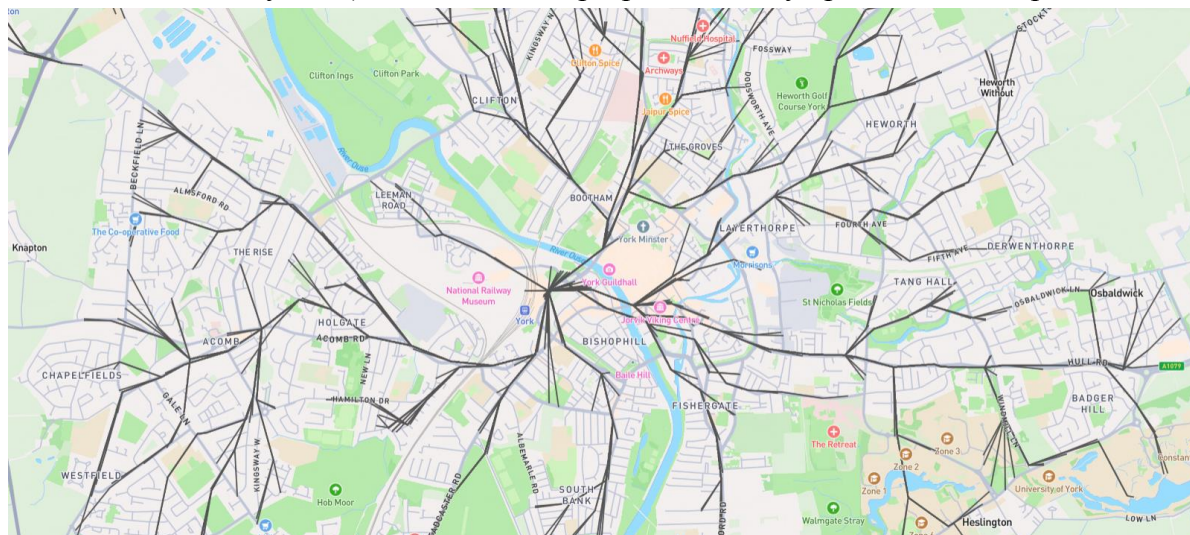


Рис. 3. Візуалізація маршрутів A\*

Джерело: розроблено авторами.

Лістинг програмного коду побудови графа:

```
# Зчитування даних з файлу GeoJSON
with open('stops.geojson', 'r') as file:
    data = json.load(file)

# Створення пустого графу
graph = {}

# Проходження через кожну зупинку
for stop in data['features']:
    stop_id = stop['properties']['stop_id'] # Ідентифікатор
    coordinates = tuple(stop['geometry']['coordinates']) # Координати
    graph[stop_id] = {'coordinates': coordinates, 'neighbors': {}} # Додавання зупинки до графу

# Пошук зв'язків між зупинками
for stop1_id, stop1_data in graph.items():
    for stop2_id, stop2_data in graph.items():
        if stop1_id != stop2_id:
            distance = geodesic(stop1_data['coordinates'], stop2_data['coordinates']).kilometers
            if distance < 0.5: # Приклад: встановлюємо максимальну відстань між зупинками
                graph[stop1_id]['neighbors'][stop2_id] = distance # Додавання зв'язку до графу

# Збереження графу
with open('graph.json', 'w') as file:
    json.dump(graph, file, indent = 2)
```

Після завантаження та обробки даних з набору даних, перший крок у роботі з алгоритмом A\* полягав у створенні графу. Кожна зупинка громадського транспорту була розглянута як окремий вузол у цьому графі. Цей процес вимагав перегляду кожного запису у наборі даних, отримання інформації про кожну зупинку та її координати, і подальше додавання цієї інформації у вигляді вузлів до графа [9].

Після створення вузлів було важливо встановити ребра, які представляли можливі зв'язки між зупинками громадського транспорту. Цей процес включав аналіз відстані між кожною парою зупинок та врахування максимальної відстані, яка вказувала на те, чи можна створити ребро між двома вузлами. Ця максимальна відстань відіграла ключову роль у формуванні структури графа, допомагаючи забезпечити оптимальне відображення зв'язків між зупинками та покриття всіх можливих маршрутів громадського транспорту.

*Реалізація алгоритму A\**. Для визначення оцінки відстані між двома зупинками була використана евристична функція: евклідова відстань між координатами цих зупинок. Це дозволило нам ефективно оцінювати найкоротший шлях між ними.

Лістинг реалізації алгоритму A\* включав в себе використання евристичної функції для кожної пари зупинок, що дозволило шукати оптимальні маршрути у транспортній мережі з врахуванням їх географічного розташування.

Лістинг реалізації алгоритму A\*:

```
# Реалізація алгоритму A*
def astar(graph, start, goal):
    # Ініціалізація відкритого та закритого списків
    open_set = []
    heappush(open_set, (0, start))
    came_from = {}
    g_score = {start: 0}
    f_score = {start: heuristic(graph, start, goal)} # Оцінка шляху від початку до кінця через цю вершину до кінця через цю вершину

    while open_set:
        _, current = heappop(open_set)
        if current == goal:
            return reconstruct_path(came_from, current)

        open_set.remove(current)
        if current in graph:
            for neighbor in graph[current]['neighbors']:
                tentative_g_score = g_score[current] + graph[current]['neighbors'][neighbor]
                if neighbor not in g_score or tentative_g_score < g_score[neighbor]:
                    checkCondition(neighbor, current) # Приклад: перевірка додаткової умови
                    came_from[neighbor] = current
                    g_score[neighbor] = tentative_g_score
                    f_score[neighbor] = g_score[neighbor] + heuristic(graph, neighbor, goal)
                    heappush(open_set, (f_score[neighbor], neighbor))

    return None # Якщо неможливо знайти шлях

# Евристична функція для оцінки відстані між вершинами (в даному випадку, використовуємо евклідову відстань)
def heuristic(graph, node1, node2):
    if str(node1) in graph and str(node2) in graph:
        coord1 = graph[str(node1)]["coordinates"]
        coord2 = graph[str(node2)]["coordinates"]
        return math.sqrt((coord1[0] - coord2[0]) ** 2 + (coord1[1] - coord2[1]) ** 2)
    else:
        # Якщо одна з вершин відсутня у графі, повертаємо дуже велике значення, щоб не впливати на алгоритм
        return float('inf')

# Приклад: функція перевірки умови
def checkCondition(stop_1, stop_2)
```



Для оптимізації алгоритму була застосована пріоритетна черга (heapq): використання пріоритетної черги для відкритого списку дозволяє ефективно керувати елементами з найменшою оцінкою ( $f\_score$ ), зменшуючи споживання пам'яті та прискорюючи доступ до необхідних елементів.

Необхідно звернути увагу на функцію checkCondition, так як вона виступає механізмом додаткової користувацької валідації, тобто може враховувати додаткові фактори, такі як напрямок руху (наприклад, в багатьох містах є вулиці з одностороннім рухом), який ніяк не зв'язаний із близькістю зупинок, а також обмеження щодо висоти або маси транспортного засобу (що є важливим, наприклад, для автобусів).

Отриманні результати були збережені у форматі GeoJSON і представлені на рис. 3. *Аналіз результатів.* Дослідження було спрямоване на забезпечення покриття всіх зупинок громадського транспорту маршрутами з мінімальною кількістю повторень, використовуючи алгоритм  $A^*$ . Загалом у графі містилося 1254 зупинки, які потребували ефективного планування для створення оптимальних маршрутів.

Результати роботи з пам'яттю системи:

- $rmem = 59977728$ : Резидентний розмір набору, кількість пам'яті, яку зараз використовує процес в оперативній пам'яті (59,977,728 байт або приблизно 59,98 МБ).
- $vms = 47349760$ : Віртуальний розмір пам'яті, загальний обсяг віртуального адресного простору, зарезервованій для процесу (47,349,760 байт або приблизно 47,35 МБ).
- $n\_p\_f = 39213$ : Кількість випадків помилок сторінок, які виникають, коли програма звертається до сторінки пам'яті, яка наразі не знаходиться в оперативній пам'яті.
- $peak\_paged = 208992$ : Піковий розмір кешу пам'яті, максимальна кількість кешованої пам'яті, яку використовував процес (208,992 байта).
- $peak\_nonpaged = 45600$ : Піковий розмір некешованого кешу пам'яті, максимальна кількість некешованої пам'яті, яку використовував процес (45,600 байт).

Нижче наведено дані (табл. 1), які характеризують результати роботи алгоритмів з ресурсами системи.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика ефективності аналогів  $A^*$ , %

Алгоритм	$rmem$	$vms$	$n\_p\_f$	$peak\_paged$	$peak\_nonpaged$
Алгоритм Дейкстри	+0,33	-0,51	+2,07	+5,91	+37,10
Жадібний пошук	-0,89	-0,78	-1,05	+1,12	+3,17
Пошук в ширину	+1,89	+1,13	+19,41	+13,47	+78,63

Аналізуючи дані результати слід зазначити, що жадібний пошук хоч і впорався з задачею найшвидше, проте не зміг знайти оптимальний шлях (кількість отриманих маршрутів кратно перевищує результати інших алгоритмів. Також необхідно зазначити, що кількість маршрутів, яку знайшли інші представлені алгоритми, рівна). Беручи до уваги результати роботи алгоритмів, можна зробити висновок про те, що  $A^*$  поступається лише в ефективності користування віртуального адресного простору.

Основною метою було забезпечення покриття всіх зупинок маршрутами. Використовуючи алгоритм  $A^*$ , вдалося побудувати 891 маршрут, що охоплюють усі 1254 зупинки при використанні параметра максимальної відстані між зупинками зі значенням 500 метрів. З цих маршрутів 465 мають менше ніж 10 зупинок. Це свідчить про існування певних кластерів зупинок, ступінь віддаленості яких не дозволяє об'єднати їх у більші маршрути. Повне покриття всіх зупинок свідчить про ефективність алгоритму та правильність розрахунків, проведених у процесі планування.

Завдяки алгоритму  $A^*$  вдалося досягти мінімальної кількості повторень маршрутів. Аналіз кількості маршрутів та зупинок у кожному маршруті показав, що алгоритм знайшов оптимальні шляхи для покриття всіх зупинок. Було виявлено, що 465 маршрутів ма-

ють менш як 10 зупинок, тоді як інші маршрути розподіляються на різні відстані та кількість зупинок. Це вказує на те, що алгоритм ефективно розподілив маршрути, враховуючи віддаленість та зв'язність між зупинками.

Слід зазначити, що кількість маршрутів оборотно-пропорційна до встановленого параметра – максимальна відстань між зупинками, який використовувався при побудові графа.

Таблиця 2 – Результати розрахунків

Максимальна відстань	Кількість маршрутів
0,5 км	891
1 км	386
2 км	174
5 км	71
10 км	49

Нині в місті Йорк функціонує 74 маршрути [10]. Проте ці маршрути оперуються більше ніж десятком різними перевізниками й кожен діє у своєму кластері. Наприклад, перевізники 1–4 займаються виключно приміськими маршрутами. Деякі правила важко описати, проте алгоритм є потужним інструментом, який можна застосовувати точково, або ж модернізувати. Наприклад, у подальшому вдосконаленні системи можна додатково застосувати рекурсію: розділити будь-яке маршрутне покриття на кластери, оптимізувати маршрути в кожному кластері, а потім об'єднати ці кластери в маршрути, розглянувши їх як окремі зупинки.

Результати аналізу надали важливу інформацію для подальшого вдосконалення системи транспортних маршрутів. Було виявлено зупинки з високою кількістю повторень, що може бути корисним для оптимізації маршрутів та зменшення їхньої кількості. Ідентифікація таких зупинок дозволяє розробникам транспортних систем знаходити шляхи для подальшого поліпшення маршрутної мережі, забезпечуючи більш ефективне використання ресурсів та зменшення загального часу в дорозі для пасажирів.

Для виконання цього дослідження було використано кілька важливих методів та алгоритмів. Основним з них був алгоритм  $A^*$ , який відомий своєю ефективністю у пошуку найкоротших шляхів. Евристична функція на основі евклідової відстані дозволила оцінювати відстані між зупинками з високою точністю. Також було застосовано методи аналізу графів для ідентифікації зупинок та їхніх сусідів, що дозволило ефективно будувати маршрути.

**Висновки.** Дослідження алгоритму  $A^*$  у контексті оптимізації маршрутів громадського транспорту виявило його значну ефективність та потенціал для вдосконалення систем транспортних маршрутів. Застосування цього алгоритму дозволило досягти повного покриття всіх зупинок маршрутами з мінімальною кількістю повторень, що відображає його ефективність у знаходженні оптимальних маршрутів та забезпеченні ефективного та економічного транспортного обслуговування.

Важливою перевагою алгоритму  $A^*$  є його оптимальність. Він гарантує знаходження найкоротшого шляху між двома точками у графі з вагами, що робить його ідеальним інструментом для планування маршрутів громадського транспорту. Оптимальність алгоритму забезпечує мінімізацію часу подорожі та оптимізацію витрат ресурсів, що є критичними факторами для підвищення якості обслуговування пасажирів.

Повне покриття усіх зупинок маршрутами є важливим кроком у вдосконаленні транспортних систем. Було побудовано 891 маршрут, охоплюючи усього 1254 зупинки, з яких 465 мають менше ніж 10 зупинок. Це свідчить не лише про ефективність алгоритму, але й про правильність розрахунків та можливість оптимізації маршрутів для покращення обслуговування пасажирів.

Крім цього, використання евристичної функції для оцінки відстані між зупинками дозволило ефективно оцінювати найкоротший шлях між ними. Це сприяло швидкому та ефективному плануванню маршрутів з урахуванням різних умов і обмежень, що забезпечує зручність та задоволення вимог пасажирів.

Отже, дослідження підтверджує успішне вирішення задачі оптимізації маршрутів громадського транспорту за допомогою алгоритму A\*. Його ефективність та гнучкість роблять його важливим інструментом для подальшого вдосконалення систем транспортних маршрутів та забезпечення якісного обслуговування пасажирів.

### Список використаних джерел

1. Джонсон, Д. Алгоритми оптимізації маршрутів / Д. Джонсон. – Кембридж: Массачусетський технологічний інститут, 2005.
2. Christian, B. Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization / Christian Blum Gabriela Ochoa // Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization : materials 14th European Conference, EvoCOP 2014 Granada, Spain, April 23-25, 2014. – Revised Selected Papers.
3. Bo, S. Optimization and Design Method of Feeder Bus System / S. Bo, W. Ming. – Wuhan: Scientific Research Publishing, 2020. – 200 с.
4. Моделювання і оптимізація маршрутів громадського транспорту з використанням алгоритмів штучного інтелекту // Журнал транспортної логістики. – Вроцлав, 2016.
5. Либерман, Л. Оптимізація маршрутів громадського транспорту з використанням алгоритмів інтелектуального аналізу даних / Л. Либерман. – Київ : Київський університет, 2019.
6. Гітіс, М. Моделювання та аналіз маршрутів громадського транспорту / М. Гітіс. – Лондон: Академічне видавництво, 2018.
7. Autobus zaustavljen u Yorku [Electronic resource] // European union. – Accessed mode: <https://data.europa.eu/data/datasets/bus-stops3>.
8. Ruisong, L. Data-Driven Bus Route Optimization Algorithm Under Sudden Interruption of Public Transport / L. Ruisong, W. Ning // Institute of Electrical and Electronics Engineers. – 2022. – № 10. – Pp. 5250-5263.
9. Analysis of modern ways of development of science and scientific discussions : The 10th International scientific and practical conference, Bilbao, ” (November 29 - December 02,2022). – Kansas : Primedia eLaunch LLC, 2022. – 606 p. – Accessed mode: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2022/11/Analysis-of-modern-ways-of-development-of-science-and-scientific-discussions.pdf>.
10. Bus route and timetables – iTravel York [Electronic resource] // iTravel York. – Accessed mode: <https://www.itravelyork.info/buses/bus-routes-and-journey-times/timetables>.

### References

1. Johnson, D. (2005). *Route optimization algorithms*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
2. Christian, B., Gabriela, O. (2014). *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*. Granada: Revised Selected Papers.
3. Bo, S., Ming, W. (2020). *Optimization and Design Method of Feeder Bus System*. Wuhan: Scientific Research Publishing.
4. Modeling and optimization of public transport routes using artificial intelligence algorithms. (2016). *Journal of Transport Logistics*.
5. Liberman, L. (2019). *Optimization of public transport routes using algorithms of intelligent data analysis*. Kyiv: Kyiv University.
6. Hitis, M. (2018). *Modeling and analysis of public transport routes*. London: Academic Press.
7. European union. (2024). *Bus stops in the city of York*. <https://data.europa.eu/data/datasets/bus-stops3>.
8. Ruisong, L., Ning W. (2022). Data-Driven Bus Route Optimization Algorithm Under Sudden Interruption of Public Transport. *Institute of Electrical and Electronics Engineers, 10, 5250-5263*.
9. International Science Group. (2022). *Analysis of modern ways of development of science and scientific discussions*. Kansas: Primedia eLaunch LLC.
10. Itravelyork. (2024). *Bus routes and timetables*. <https://www.itravelyork.info/buses/bus-routes-and-journey-times/timetables>.

Отримано 04.06.2024

**Vladyslav Zetchenko<sup>1</sup>, Artem Zadorozhnyi<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD Student of the Department of Information Technologies and Software Engineering  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** zetchenkovlads@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0002-9925-8628>. **ResearcherID:** ITW-2651-2023

<sup>2</sup> PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Technologies and Software Engineering  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** zaotroy@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3424-7293>. **ResearcherID:** F-6358-2016

**PUBLIC TRANSPORT ROUTE OPTIMIZATION USING THE A\* ALGORITHM**

*The article is focused on the actual problem of optimizing public transport routes in large cities using the A\* algorithm. In the context of a growing population and ever-increasing requirements for the efficiency and availability of transport infrastructure, ensuring optimal routes is crucial to reducing traffic congestion, shortening travel times and minimizing emissions.*

*The paper reviews recent advances in the field, including various approaches to route optimization, such as genetic algorithms, metaheuristic methods, and applications of artificial neural networks. Special attention is paid to the informative review, which allows to systematize the current state of research and to determine the direction of further research in this important direction.*

*The purpose of the article is an in-depth analysis and systematization of the role of the A\* algorithm in improving public transport systems. Based on the collected information, its effectiveness compared to other methods and its potential for improving infrastructure in large cities are considered.*

*Special attention is paid to the overview analysis, which allows to understand the current state and prospects for the development of this key field of scientific research.*

*The article not only presents a comprehensive overview of modern achievements, but also sets itself the task of promoting the A\* algorithm as a key tool for optimizing public transport routes, contributing to the increase in efficiency and convenience for residents of large cities.*

*Traffic statistics for the period from 2023 to 2024 are provided.*

**Key words:** route optimization; public transport; A\* algorithm.

**Figures:** 3. **Tables:** 2. **References:** 10.

**Геннадій Павлович Болотов<sup>1</sup>, Анатолій Леонідович Приступа<sup>2</sup>,  
Сергій Анатолійович Степенко<sup>3</sup>, Владислав Русланович Пархомець<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології зварювання та будівництва  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: bolotovgp@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>  
ResearcherID: H-5304-2014. SCOPUS Author ID: 6506157907

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент,  
завідувач кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [anatoliy.prystupa@stu.cn.ua](mailto:anatoliy.prystupa@stu.cn.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9412-2698>  
ResearcherID: F-5507-2014. SCOPUS Author ID: 57190807222

<sup>3</sup> кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник,  
доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [serhii.stepenko@stu.cn.ua](mailto:serhii.stepenko@stu.cn.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7702-6776>  
ResearcherID: F-1018-2014. SCOPUS Author ID: 55570068000

<sup>4</sup>лаборант кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (м. Чернігів, Україна)  
E-mail: [vlad.parkhom.ts@gmail.com](mailto:vlad.parkhom.ts@gmail.com)

## **ОБҐРУНТУВАННЯ ТИПУ МУЛЬТИКОПТЕРНОГО ДРОНУ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ У СКЛАДІ МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМ**

*Стаття має оглядовий характер, та містить коротку характеристику автономних та FPV дронів на прикладі найбільш поширених варіантів, які зараз використовуються у Російсько-Українській війні. На основі проведеного аналізу відзначено особливості кожного типу дронів, що дозволяє аргументовано обрати варіант дрона, який найбільше підходить для перехоплення ворожих безпілотних літальних апаратів у складі мультиагентної системи.*

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат; технічні характеристики; система енергозабезпечення; акумуляторна батарея.

Рис.: 3. Бібл.: 17.

**Актуальність теми дослідження.** Тема цієї статі нині є дуже актуальною, бо зараз Україна перебуває у стані війни з Росією, і безпілотні літальні апарати (БПЛА), які часто називають дронами, набули вагомого значення під час виконання різних польових та розвідувальних завдань, адже вони дають змогу, безпечно, зібрати потрібні дані чи вразити певну ціль.

**Постановка проблеми.** З метою вибору оптимального типу, конструкції та параметрів дрона для використання в мультиагентних системах як дрона-детектора та дрона-перехоплювача ворожого БПЛА важливим завданням є проведення критичного огляду БПЛА різного призначення, аналіз їх технічних характеристик та визначення особливостей. Це полегшить та пришвидшить процес розробки нових безпілотних апаратів, чи методів боротьби проти них, а також дасть краще розуміння принципів роботи різних, у тому числі й ворожих, дронів, їхніх призначень та параметрів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Попередні спроби систематизувати інформацію в основному мали загальний характер [1-2]. Також із підвищенням популярності саме FPV дронів, багато джерел висвітлюють саме цей тип БПЛА. Вони намагаються простою для розуміння мовою, без детальних поглиблень у тему, розповісти про різні аспекти будовання та керування дронами. Також є спроби поглибитись у комунікаційну частину БПЛА, а саме радіозв'язок [3-4], де вже більш детально описуються різні способи зв'язку між оператором та дроном, їхні переваги та недоліки.

**Мета статті.** Метою цієї статті є огляд та аналіз параметрів існуючих дронів різного призначення з метою обрання оптимального варіанту БПЛА для використання в мультиагентній системі перехоплення ворожих дронів типу Shahed, розгляд характеристик як конкретних серійних зразків, так і дронів власної розробки.

**Виклад основного матеріалу.** До початку розробки нових дронів, чи методу боротьби проти них, потрібно провести аналіз вже ухвалених рішень та детально розібратися у їх можливостях. Для цього розглянемо й дослідимо структуру безпосередньо безпілотного апарату та дізнаємось його характеристики.

Почнемо із серії автономних БПЛА Shahed, а саме, моделі Shahed 131 та Shahed 136 (рис. 1), оскільки вони частіше атакують інфраструктурні та військові об’єкти в глибині нашої країни й захист саме від них є найбільш актуальною проблемою.



а – Shahed 131; б – Shahed 136 [7]

**Shahed 131.**

Це дрон, який створений для односторонньої атаки супротивника, та не передбачає повернення назад. Основні характеристики [5-7]:

- Довжина: 2,6 м
- Розмах крил: 2,2 м
- Приблизна маса: 135 кг (разом з паливом)
- Вага боєголовки: 15 кг
- Розташування заряду: у носовій частині
- Максимальний запас ходу: 900 км
- Двигун: внутрішнього згорання роторно-поршневий
- Акумулятор: Літій-іонна батарея 25,9 В 17000 мА·год
- Наведення: Інерційне та GPS
- Запуск: зі спеціальної платформи
- Присутня система ATOL (automatic take-off and landing)
- Модифікований GNSS трансивер
- Присутній блок вимірювання інерції

Детальніше розглянемо такі компоненти, як блок керування польотом, модифікований GNSS трансивер, система ATOL та блок вимірювання інерції.

**Блок керування польотом (FCU – fly control unit).** Це головна частина БПЛА, яка контролює процес польоту безпілотника. Він може підключати лінію прямої видимості (LOS), радіо Iridium SATCOM, можливо самонаведення та попередньо запрограмовані траєкторії польоту.

**Модифікований GNSS трансивер.** Це частина дрона, що відповідає за зв'язок, та дає можливість дрона визначити свої координати у просторі. Сама модифікація трансивера полягає в заміні чорних GNSS антен на білі, які дають можливість працювати у повітряному просторі, де заборонено GNSS.

**Система ATOL.** Ця система встановлюється між GNSS та FCU. Вона додає функціоналу для БПЛА. Ця система має індикацію чотирьох режимів, такі як:

- PGNSS – про цей режим немає інформації у відкритих джерелах.
- DGNSS – це режим, де за допомогою мережі наземних опорних станцій можна підвищити точність визначення позиції БПЛА та допомогти зберегти траєкторію польоту за допомогою GPS координат у зоні де GPS заборонено.
- SGNSS – покращує точність, чутливість вимірів, а також забезпечує нову категорію вимірювань – кут приймання. Завдяки розрізненню напрямків прийняття сигналу можна ідентифікувати, чи ігнорувати джерело сигналу, а також знайти джерело спуфінгу GNSS.
- HDG – це режим утримання напрямку дрона. Він дозволяє при втраті GNSS сигналу продовжити політ до відновлення зв'язку. Це може бути причиною чому даний тип БПЛА наближається до цілі, але не може на 100% влучити у бажану точку. Коли увімкнено даний режим дрон перемикається з GNSS на дані з блоку вимірювання інерції для продовження польоту, у цей час навколишній вітер відхиляє його, бо FCU не може правильно скоригувати траєкторію, що призводить до неточних влучань. Приблизна похибка 5 % від відстані до цілі коли увімкнули HDG режим.

**Блок вимірювання інерції.** Це цифровий комп'ютер повітряних мас, який використовує як статичні датчики, так і трубки Піто, що дозволяє оцінити швидкість літального апарату, його висоту та тенденцію зміни висоти. Його дані використовуються як вхідні у режимі HDG.

Більш детальна інформація щодо цього типу БПЛА представлена в [5].

### **Shahed 136.**

Це дрон, на основі якого було створено Shahed 131. Їх головні відмінності між собою – це більший розмір, більша вага та більша бойова частина у першого, яка може нести заряд до 50 кг, що у декілька разів більше, ніж у другого. Також на цьому дроні стоїть звичайний поршневий двигун внутрішнього згорання, коли в Shahed 131 встановлено роторний.

Основні характеристики цього БПЛА [7; 8]:

- Довжина: 3,5 м
- Розмах крил: 2,5 м
- Приблизна маса: 200 кг (разом з паливом)
- Вага боеголовки: 50 кг
- Розташування заряду: в носовій частині
- Максимальний запас ходу: 2000 км
- Швидкість: 185 км/год
- Двигун: внутрішнього згорання поршневий
- Наведення: Інерційне
- Запуск: зі спеціальної платформи

Ця версія хоч і має більшу бойову частину, натомість немає точних систем наведення на ціль, що призводить до суттєвих похибок при влучанні у ціль. Також за даними джерела [8] реальний запас ходу у Shahed 136 може бути значно менший від заявленого, адже для подолання такої відстані з тим двигуном, що встановлено, потрібно витратити більше палива, ніж вага усього БПЛА, тому реальний запас ходу оцінюють у декілька сотень кілометрів.

Підсумовуючи усе вищезазначене, можна зауважити, що використання дронів типу Shahed 136 та Shahed 131 є доцільним при використанні ройового стилю, коли одночасно запускають багато одиниць, намагаючись зменшити вплив якості збірки їх кількістю, з розрахунком на те, що якась частина зможе долетіти до цілі, та у сукупності зможе покращити середній відсоток влучань. Для підвищення ефективності траєкторії дронів у рою задають різними, що ускладнює роботу мобільних груп щодо їх виявлення та знешкодження.

#### **FPV дрони.**

Цей клас БПЛА відрізняється від автономних Shahed наявністю камери на борту, що дозволяє керувати ним у режимі реального часу, меншими розмірами, вантажопідйомністю та бойовою частиною, а також меншим запасом ходу. Проте ціна таких моделей значно нижча. Це дозволяє створювати такий тип БПЛА, як дрони-камікадзе або дрони для скиду, які можуть дуже точно влучати в ціль за рахунок постійного відеозв'язку з оператором.

Попри невелику ціну та малі габарити, ці безпілотні апарати, в парі з вправним оператором, здатні знищувати важку техніку та влучати у важкодоступні місця. Відмінність у використанні даного типу БПЛА полягає в тому, що дрон-камікадзе доставляє боєприпас до повного влучання в ціль, що призводить до його самознищення, а скидний – може скинути бойовий заряд, повернутися та перезарядитися для наступної атаки.

Оскільки такі дрони знаходяться доволі близько до цілі, є ймовірність, що їх можуть збити або перехопити. Тому обладнання на такі апарати ставлять якісне, але не дуже дороге, що дозволяє також використовувати ройовий стиль із меншими витратами. Одним із представників таких дронів є FPV Revenge, розроблений та виготовлений українською компанією Drone Ukraine.

#### **FPV Revenge 3.**

Це багатофункціональний дрон, який можна використовувати як розвідувальний, для скидання бойових зарядів, чи як дрон-камікадзе. Обладнаний вбудованою камерою, має потужний відеопередавач та двигуни, що дозволяють виконувати багато різних маневрів та наздоганяти ціль, отримуючи команди від оператора у реальному часі. Також має можливість працювати без GPS.

Основні характеристики[11-13]:

- Розмір рами: 10", або 25,4 см
- Номінальна/максимальна вантажопідйомність: 2,5/3,5 кг
- Час роботи без навантаження (БН)/з(ЗН): до 55 хв/до 12 хв
- Максимальна дальність польоту БН/ЗН: 25 км/10 км
- Максимальна швидкість: 110 км/год, або 30,5 м/с
- Максимальна висота підйому: до 2 км
- Частота роботи: 5,8 ГГц чи 1,3 ГГц
- Потужність приймача: 500 мВт
- Потужність відеоканалу: 1600 мВт
- Навігація: GPS 9 покоління
- Камера: 1200 TVL 8 М
- Запуск: із землі.

З особливостей у цього дрону є можливість використання виносної антени до 30 м для додаткового захисту оператора від методів радіопеленгації, коли завдяки сигналу, що видає оператор з пульта керування, можна визначити джерело. Також цей дрон має функцію повернення, яка дозволяє отримати ще один шанс на повторне використання цього БПЛА.

Існує широке коло задач, коли потрібно мати безпілотний апарат, який не буде постійно знаходитися у зоні ризику, матиме краще обладнання, використовуватиметься для тривалих та далеких польотів та отримання якіснішої картинки при розвідці. Тобто, такий БПЛА, головна задача якого, це тривале та ефективне здійснення розвідки з більшою



кількістю можливостей та функцій. На такі дрони цілком виправдано встановлювати дороге та високоточне обладнання, додавати різний функціонал, який зможе покращити роботу оператора. У них висока якість збірки та електронного обладнання, що дозволяє збільшити радіус дії, запас ходу, якість відео, час роботи, зменшити вагу та багато іншого. Гарним представником цього класу є квадрокоптер Mavic 3.

### **Mavic 3.**

Розвідувальний дрон різного призначення, виготовляється китайською компанією DJI, обладнаний двома камерами: Сенсор CMOS 4/3" від Hasselblad, який може забезпечити високу роздільну здатність, динамічний діапазон, а також ефективно подолання шумів в умовах низького освітлення, та модуль з датчиком CMOS 1/2" і телеоб'єктивом, з більшою фокусною відстанню, ніж перший сенсор.

Основні характеристики Mavic 3:

- Вага: 895г (дрон – 559,5 г, батарея – 335,5 г)
- Габарити (Д/Ш/В):
  - у складеному стані: 221/96,3/90,3 мм
  - у розкладеному стані: 347,5/283/107,7 мм
- Передача сигналу:
  - Технологія: O3+(OcuSync 3 Plus)
  - Якість перегляду в реальному часі: пульт ДУ(1080p/30fps, 1080p/60fps)
  - Максимальна дальність: 15 км (FCC), 8 км при (CE)
  - Затримка: 130 мс
  - Максимальний бітрейт завантаження: SDR(5.5 МБ/с), Wi-Fi 6(80 МБ/с)
- Політ:
  - Максимальна висота над рівнем моря: 6 км
  - Максимальний час польоту: 46 хв (без вітру)
  - Максимальний час зависання: 40 хв (без вітру)
  - Максимальна дальність польоту: 30 км
  - Максимальна швидкість:
- підйому: 8 м/с
- спуску: 6 м/с
- польоту (на рівні моря, без вітру): 21 м/с
  - Максимальна швидкість вітру: 12 м/с
- Сенсори:
  - Hasselblad:
    - CMOS: 4/3", 20 Мп
    - Апертура: f/2.8-f/11
    - Кут огляду (FOV): 84°
  - Телекамера:
    - CMOS: 1/2", 12 Мп
    - Апертура: f/4.4
    - Кут огляду (FOV): 15°
- Кріплення камери:
- Стабілізація: трьох осьова моторизована
- Діапазон кутових коливань:  $\pm 0,007^\circ$
- Вбудована пам'ять: 8 ГБ
- Акумулятор:
  - Ємність: 5000 мА·год
  - Напруга: 15,4 В

- Тип батареї: Літій-іонний 4S
- Вага: 335,5 г
- Запуск: із землі.

Також дана модель має всеспрямовану систему бінокулярного зору, доповнену інфрачервоним датчиком у нижній частині, що дозволяє визначати та оминати перешкоди під час польоту, а також будувати оптимальний шлях повернення у точку злету при команді, чи при втраті зв'язку з оператором. Ця система дозволяє уникнути багатьох випадків, коли дрон влітає в перешкоду та виходить з ладу, а також це дозволяє оператору зосередитися на тому, що він бачить [9; 10].

Підбиваючи підсумки, можна сказати, що даний БПЛА найкраще підходить для розвідки, як на відкритій місцевості, завдяки алгоритмам опору вітру, так і в міській місцевості, де є багато перешкод у вигляді стовпів, будинків тощо. А система автоматичного повернення на місце зльоту дозволяє збільшити шанс того, що при втраті зв'язку з дроном він може вціліти, та продовжити виконання своєї задачі. З мінусів це відсутність виваженої антени, що наражає оператора на додаткову небезпеку.

Також недоліком серійних квадрокоптерів можна вважати неможливість або суттєву складність їх використання в автоматичних або напіваавтоматичних системах перехоплення ворожих дронів. Оскільки для цього необхідно інтегрувати в них додаткові системи виявлення, розпізнавання та перехоплення ворожого беспілотного літального апарату. Для цієї мети доцільніше використовувати апарати власної розробки. Так, на кафедрі електроніки автоматики, робототехніки та мехатроніки (ЕАРМ) НУ «Чернігівська політехніка» у межах виконання низки науково-дослідних робіт було розроблено декілька моделей квадрокоптерів (рис. 2), які за основними технічними характеристиками: вантажопідйомність, енергозабезпеченість, час польоту та інші не поступаються серійним БПЛА, які були розглянуті вище [14].



Рис. 2. Квадрокоптери, що розроблено на кафедрі ЕАРМ

а) б)

Джерело: розроблено авторами.

У них легко можна інтегрувати додаткові як програмні, так і апаратні модулі, які необхідні для виявлення та перехоплення ворожих дронів, адаптивні алгоритми керування на основі методів штучного інтелекту. Для пришвидшення їх масового виробництва на перших етапах можна скористатися готовими платформами від китайських виробників (рис. 3), які доступні для придбання.



*Рис. 3. Готова платформа для квадрокоптера*

Джерело: розроблено авторами.

Зазвичай як основне джерело енергії невеликих дронів мультикоптерного типу застосовується акумуляторна батарея з декількох літій-іонних чи літій-полімерних акумуляторів [14]. Нині ці типи акумуляторів мають найкращу інтегральну характеристику за параметрами питома енергоємність та вартість. Причому літій-іонні акумулятори дещо випереджають за питомою енергоємністю літій-полімерні акумулятори. Один елемент таких акумуляторів має номінальну напругу від 3,6 до 3,7 В. У робочому циклі напруга на них змінюється від 2,8 до 4,2 В. Для дронів невеликої загальної маси (одиниці кілограм) зазвичай використовуються акумуляторні збірки з послідовним з'єднанням по 3-5 елементів, тобто схемою від 3s до 5s з загальною номінальною напругою від 10,8 до 18,5 В. У більшості випадків вистачає по одному високострумівому елементу і паралельне включення не використовується або використовується невелика кількість паралельно з'єднаних акумуляторів (у більшості випадків 2-3). Таким чином, загальна схема таких акумуляторних батарей буде від 3s1p (три послідовно з'єднані елементи) до 5s3p (п'ять послідовно з'єднаних елементи та 3 паралельно). Спроба використати для легкого дрона велику батарею, зазвичай, не приводить до збільшення тривалості польоту чи вантажопідйомності, а навпаки, ці показники можуть навіть зменшитись, оскільки основну вагу дрона буде складати акумуляторна батарея. У більш потужних мультикоптерах, загальною масою десятки - сотні кілограм використовуються акумуляторні батареї з більш високою напругою (до 60 В і більше), що дозволяє зменшити значення максимального струму (до десятків ампер), забезпечивши при цьому миттєву потужність споживання двигунами таких дронів тисячі ват. У таких дронах використовують схеми з'єднання елементів батарей 15s6p і більші. Їхня ємність може бути від одиниць до десятків А·год. Для швидкої зарядки таких батарей треба забезпечити протікання великих струмів через зарядні кола, що створює серйозні виклики для розробників зарядних станцій, особливо при бездротовій зарядці, так як це призводить до збільшення маси зарядного пристрою на борту дрона. Бездротові зарядки є сенс використовувати, коли не потрібно дуже швидко заряджати БПЛА або при незначній ємності їх акумуляторних батарей. Для зменшення маси бортового безпроводного зарядного пристрою можна виготовляти приймальні котушки електромагнітної енергії не з міді, а зі спеціальних сплавів легких металів, що дасть вигоду по масі, проте призведе до збільшення габаритів котушки. [16-17].

При перетворенні енергії для живлення внутрішніх вузлів дрона слід застосовувати перспективні перетворювачі електричної енергії з використанням інтелектуальних методів керування [15] та з високою робочою частотою, що може сягати десятків мегагерц. Це стає можливим при використанні як силових елементів перетворювача новітніх високочастотних арсенід галієвих (GaN) транзисторів. Їхнім недоліком можна вважати значно більшу

ціну в порівнянні з поширеними і вже традиційними кремнієвими транзисторами. Підвищення робочої частоти перетворювачів дозволяє зменшити також масу та габарити силових дроселів, трансформаторів та конденсаторів, що використовуються в перетворювачах. А використання GaN транзисторів дозволяє відмовитись від масивної системи охолодження.

**Висновки.** Проаналізувавши декілька типів БПЛА можна зробити висновок, що для виконання задач по виявленню та знешкодженню низькошвидкісної літальної цілі в межах функціонування мультиагентної системи захисту об'єктів критичної інфраструктури, найбільш підходить саме FPV дрон. Недоліки даного типу БПЛА, пов'язані з невеликим запасом ходу та часом роботи можуть бути частково компенсовані використанням інтелектуальних алгоритмів керування електродвигунами та по черговою зміною елементів мультиагентної системи "під час чергування". Це стає можливим з використання польотних контролерів з відкритим кодом. Другий суттєвий недолік таких дронів полягає у необхідності знаходження оператора поблизу цілі, що створює певну затримку, пов'язану з людським фактором. Тому в контексті цього БПЛА, які є елементами мультиагентної системи, повинні використовувати розвинену інформаційно-вимірвальну систему, яка на основі інформації від різних датчиків, використовуючи інтелектуальні алгоритми, на основі методів штучного інтелекту, вироблятиме автоматичне рішення щодо ідентифікації цілі, визначення траєкторії руху, перехоплення та знешкодження ближчим до цілі дроном. На це і будуть спрямовані подальші дослідження в рамках НДР 0123U101819 "Мультиагентна система захисту об'єктів критичної інфраструктури на основі рою мультикоптерних дронів".

#### Список використаних джерел

1. First-person view (FPV) дрони [Електронний ресурс] // People's Project.com. – Режим доступу: <https://www.peoplesproject.com/first-person-view-droni>.
2. MAJ Andrew William Sanders. Drone Swarms. US Army. School of Advanced Military Studies United States Army Command and General Staff College Fort Leavenworth, Kansas, 2017. – 47 p.
3. Що таке FPV і в чому різниця 2.4 ГГц та 5.8 ГГц аналог або Wi-Fi? [Електронний ресурс] // MARODER. – Режим доступу: <https://maroder.com.ua/uk/obzor/chto-takoe-fpv-i-v-chem-raznitsa>.
4. A Review of Counter-UAS Technologies for Cooperative Defensive Teams of Drones. Drones / Vittorio Ugo Castrillo, Angelo Manco, Domenico Pascarella and Gabriella Gigante. – 2022. – № 6 – P. 65.
5. Shahed на нашу голову – детальний технічний звіт про безпілотник іранського виробництва [Електронний ресурс] // ІТС.ua. – Режим доступу: <https://itc.ua/ua/novini/shahed-na-nashu-golovu-detalniy-tehnicnij-zvit-pro-bezpilotnik-iranskogo-virobnitstva>.
6. Менша версія, але так само вбивча: що відомо про дрони-камікадзе Shahed-131 [Електронний ресурс] // Вікна. – Режим доступу: <https://vikna.tv/dlia-tebe/bezpeka/bezpilotnyk-shahed-131-harakterystyky-ta-yak-praczuuye>.
7. Россия массированно атаковала Украину «шахедами»: в чем разница между дронами Shahed 136 и Shahed 131 [Електронний ресурс] // New Voice. – Режим доступу: <https://nv.ua/ukraine/events/shahedy-shahed-136-i-131-v-chem-raznica-harakteristiki-nedostatki-i-infografika-novosti-ukrainy-50327025.html>.
8. Чим відрізняється shahed-131 від shahed-136 [Електронний ресурс] // Nizhyn NEWS. – Режим доступу: <https://nizhyn.in.ua/chim-vidriznyayetsya-shahed-131-vid-shahed-136-4.html>.
9. Обзор основных характеристик Mavic 3 i Mavic 3 Cine [Електронний ресурс] // Wazza Blog. – Режим доступу: <https://blog.wazza.com.ua/drony/obzory-i-sravneniya/obzor-osnovnyh-harakteristik-mavic-3-i-mavic-3-cine>.
10. DJI Mavic 3 [Electronic resource] // DJI Official. – Mode of access: <https://www.dji.com/global/mavic-3/specs>.
11. Квадрокоптер FPV дрон Revenge 3 (1.3 GHz, 2.5 kg, 8400 mah, 10 km) камікадзе [Електронний ресурс] // Bezpeka. club. – Режим доступу: <https://bezpeka.club/product/kvadrokofter-fpv-dron-revenge-3-1-3-ghz-2-5-kg-8400-mah-10-km-kamikadze/>.

12. Квадрокоптер FPV дрон Revenge 3 (7 km, 2 kg, 5.8 GHz) [Електронний ресурс] // Safety. – Режим доступу: <https://safety.kiev.ua/ru/kvadrokopter-fpv-dron-revenge-3-7-km-2-kg-5-8-ghz/>.
13. Квадрокоптер FPV камікадзе Revenge [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://drone.safety.kiev.ua/>.
14. Системи регулювання роботизованих комплексів: монографія / Ю. О. Денисов, В. П. Войтенко, А. С. Ревко. – Івано-Франківськ : НАІР, 2021. – 128 с.
15. Stepwise Pulse-Width Modulation in Quasi-Resonant Pulsed Converters Using Switched Capacitors / A. Revko, R. Yershov, D. Yakosenko, D. Beznosko // IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2018. – Pp. 711-716.
16. Design Background Considerations of the Autonomous Power Supply System for Drones / S. Stepenko, A. Prystupa, A. Revko, V. Kazymyr, A. Rohovenko and Y. Kuts // IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – Kharkiv, Ukraine, 2023. – Pp. 1-4. DOI: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312889
17. Development of energy efficient power supply systems for multicopter drones / V. Kazymyr, A. Revko, A. Prystupa, S. Stepenko, A. Rogovenko // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2023) : тези доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 25–26 травня 2023 р.) : у 2 т. Т. 2. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – С. 215-216.

### References

1. First-person view (FPV) drony. (b.d.). Peoples Project.com. <https://www.peoplesproject.com/first-person-view-droni>.
2. MAJ Andrew William Sanders. Drone Swarms. US Army. School of Advanced Military Studies United States Army Command and General Staff College Fort Leavenworth (2017).
3. Shcho take FPV i v chomu riznytsia 2.4 HHts ta 5.8 HHts analog abo Wi-Fi? [What is FPV and what is the difference between 2.4 GHz and 5.8 GHz analog or Wi-Fi?] (n.d.). MARODER. <https://maroder.com.ua/uk/obzor/chto-takoe-fpv-i-v-chem-raznitsa>.
4. Vittorio Ugo Castrillo, Angelo Manco, Domenico Pascarella and Gabriella Gigante. *A Review of Counter-UAS Technologies for Cooperative Defensive Teams of Drones*. *Drones* 2022, (6), 65.
5. Shahed na nashu holovu – detalnyi tekhnichniy zvit pro bezpilotnyk iranskoho vyrobnytstva [Shahed on our head - a detailed technical report on an Iranian-made drone] (n.d.). ITC.ua. <https://itc.ua/ua/novini/shahed-na-nashu-golovu-detalnij-tehnichnij-zvit-pro-bezpilotnik-iranskogo-virobnitstva>.
6. Mensha versiia, ale tak samo vbyvcha: shcho vidomo pro drony-kamikadze Shahed-131 [A smaller version, but just as deadly: what is known about the Shahed-131 kamikaze drone] (n.d.). Vikna. <https://vikna.tv/dlia-tebe/bezpeka/bezpilotnyk-shahed-131-harakterystyky-ta-yak-praczuuye>.
7. Rossiia massirovano atakovala Ukrainu «shahedami»: v chem raznitca mezhdru dronami Shahed 136 i Shahed 131 [Russia massively attacked Ukraine with Shaheds: what is the difference between Shahed 136 and Shahed 131 drones] (n.d.). New Voice. <https://nv.ua/ukraine/events/shahedy-shahed-136-i-131-v-chem-raznica-harakteristiki-nedostatki-i-infografika-novosti-ukrainy-50327025.html>.
8. Chym vidrizniaietsia shahed-131 vid shahed-136 [What is the difference between shahed-131 and shahed-136] (n.d.). NizhynNEWS. <https://nizhyn.in.ua/chim-vidriznyayetsya-shahed-131-vid-shahed-136-4.html>.
9. Maksim. (2021). Obzor osnovnykh kharakteristik Mavic 3 i Mavic 3 Cine. Wazza Blog [Overview of the main characteristics of Mavic 3 and Mavic 3 Cine]. <https://blog.wazza.com.ua/drony/obzory-i-sravneniya/obzor-osnovnyh-harakteristik-mavic-3-i-mavic-3-cine>.
10. DJI Mavic 3 (n.d.). *DJI Official*. <https://www.dji.com/global/mavic-3/specs>.
11. Квадрокоптер FPV дрон Revenge 3 (1.3 GHz, 2.5 kg, 8400 mah, 10 km) kamikadze [Quadcopter FPV drone Revenge 3 (1.3 GHz, 2.5 kg, 8400 mah, 10 km) kamikaze] (n.d.). *Bezpeka.club*. <https://bezpeka.club/product/kvadrokopter-fpv-dron-revenge-3-1-3-ghz-2-5-kg-8400-mah-10-km-kamikadze>.

12. Kvadrokopter FPV dron Revenge 3 (7 km, 2 kg, 5.8 GHz) [Quadcopter FPV drone Revenge 3 (7 km, 2 kg, 5.8 GHz)] (n.d.). Safety. <https://safety.kiev.ua/ru/kvadrokopter-fpv-dron-revenge-3-7-km-2-kg-5-8-ghz>.
13. Kvadrokopter FPV kamikadze Revenge [Kamikaze Revenge FPV quadcopter] (n.d.). <https://drone.safety.kiev.ua>.
14. Denisov, Yu.O., Voytenko, V.P., Revko, A.S. (2021). Control systems of robotic complexes [Control systems of robotic complexes]. NAIR.
15. Revko, A., Yershov, R., Yakosenko D., Beznosko, D. (2018) Stepwise Pulse-Width Modulation in Quasi-Resonant Pulsed Converters Using Switched Capacitors. *2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* (pp. 711–716).
16. Stepenko, S., Prystupa, A., Revko, A., Kazymyr, V., Rohovenko, A. & Kuts, Y. (2023). Design Background Considerations of the Autonomous Power Supply System for Drones. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)* (pp. 1–4). DOI: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312889.
17. Kazymyr, V., Revko, A., Prystupa, A., Stepenko, S., Rogovenko, A. (2023). Development of energy efficient power supply systems for multicopter drones. *Integrated Quality Assurance of Technological Processes and Systems: Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference* (Vol. 2, pp. 215-216). Chernihiv National Polytechnic University.

Отримано 05.06.2024

UDC 623.746.-519

**Gennadiy Bolotov<sup>1</sup>, Anatoliy Prystupa<sup>2</sup>, Serhiy Stepenko<sup>3</sup>, Vladyslav Parkhomets<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Welding and Construction Technology  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [bolotovgp@stu.cn.ua](mailto:bolotovgp@stu.cn.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>

**ResearcherID:** [H-5304-2014](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917). **SCOPUS Author ID:** [6506157907](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917)

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
Head of the Department of Electrical Engineering and Information and Measurement Technologies  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

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

**ResearcherID:** [F-5507-2014](https://orcid.org/0000-0001-9412-2698). **SCOPUS Author ID:** [57190807222](https://orcid.org/0000-0001-9412-2698)

<sup>3</sup> PhD in Electrical Engineering, Associate Professor, Leading Research Scientist, Associate Professor at the Electrical Engineering, Information and Measurement Technologies Department  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [serhii.stepenko@stu.cn.ua](mailto:serhii.stepenko@stu.cn.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7702-6776>

**ResearcherID:** [F-1018-2014](https://orcid.org/0000-0001-7702-6776). **SCOPUS Author ID:** [55570068000](https://orcid.org/0000-0001-7702-6776)

<sup>4</sup>Laborant of the Department of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**Email:** [vlad.parkhom.ts@gmail.com](mailto:vlad.parkhom.ts@gmail.com)

## JUSTIFICATION OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF OBJECTS OF MULTIAGENT SYSTEMS BASED ON MULTICOPTER DRONES

*In the context of the full-scale Russian invasion and active destruction of critical infrastructure facilities by missiles, guided aerial bombs and kamikaze drones, the task of reliable protection of these facilities is urgent. To solve this problem, various air defence systems, mobile rifle groups, infrastructure defences, electronic warfare systems, etc. are used. However, the high cost of building defences and missiles for air defence, the complex trajectory of enemy objects, which complicates the effective operation of mobile rifle groups, makes the solution to this problem ineffective.*

*To increase the efficiency of critical infrastructure protection, it is proposed to use a multi-agent system based on a swarm of multi-copter drones, which is deployed within a certain object. The agent of this system is planned to use multicopter drones that perform the functions of detecting an enemy object, recognising it, determining its trajectory and movement parameters, and then neutralising it by detonating a cumulative charge in the immediate vicinity of the enemy UAV. To do this, a multi-agent system based on intelligent algorithms must develop an automatic decision on which of the drones should move to intercept the enemy UAV and along which trajectory. In order to effectively implement this hypothesis, it is important to choose the right type of multicopter drone.*

*Previous attempts to systematise information have been largely general in nature. A lot of information is in the public domain.*

*Therefore, this work is aimed at analysing the main parameters of existing drones for various purposes in order to select the optimal UAV for use as part of a multi-agent system.*

*This paper reviews the parameters of the main attack drones of the Russian Federation of the Shahed type, their communication and flight control systems. The article analyses FPV drones, which are proposed to be used as a prototype for the future system. The advantages and disadvantages of different types of small UAVs are noted.*

*Adapted versions of the multi-copter drone design developed by scientists of the National University of Chernihiv Polytechnic are presented, which have advantages over commercial analogues in terms of load capacity, power supply, flight time, etc.*

*Particular attention is paid to the power supply systems for multi-rotor UAVs. The features of rechargeable batteries and current trends in the development of semiconductor energy converters used to power drones are considered.*

*After analysing several types of UAVs, it can be concluded that the FPV drone is the most suitable for performing tasks related to the detection and neutralisation of a low-speed aircraft target within the framework of a multi-agent system for the protection of critical infrastructure. The disadvantages of this type of UAV, associated with a small range and operating time, can be partially compensated for by using intelligent algorithms for controlling electric motors and alternately changing the elements of the multi-agent system 'on duty'. This is made possible by the use of open-source flight controllers. The second significant drawback of such drones is the need for the operator to be close to the target, which creates a certain delay associated with the human factor. Therefore, in this context, UAVs, which are elements of a multi-agent system, should use an advanced information and measurement system that, based on information from various sensors, using intelligent algorithms based on artificial intelligence methods, will make an automatic decision to identify the target, determine the trajectory, intercept and neutralise the drone closer to the target. This will be the focus of further research within the framework of R&D 0123U101819 'Multi-agent system for the protection of critical infrastructure facilities based on a swarm of multi-copter drones'.*

**Keywords:** *Unmanned aerial vehicle; technical characteristics; power supply system; rechargeable battery.*

*Fig.: 3. References: 17.*

**Богдан Миколайович Пархоменко<sup>1</sup>, Андрій Миколайович Акименко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>аспірант кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [bparkhomenko@stu.cn.ua](mailto:bparkhomenko@stu.cn.ua). ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1279-4981>

<sup>2</sup>кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [anakim2@stu.cn.ua](mailto:anakim2@stu.cn.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4594-6559>

## ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОВЕДІНКИ ФІНАНСОВИХ ПОКАЗНИКІВ

Стаття є оглядово-інформаційним викладенням матеріалу з використання моделей машинного навчання для прогнозування фінансових показників з можливістю покращення ухвалення рішень з метою формування збалансованого портфеля акцій. Об'єднання глибокого аналізу з машинним навчанням, використовуючи методи лінійної регресії, дерев рішень, випадкових лісів та платформ автоматичного навчання, є потужним інструментом для передбачення ринкових трендів та стратегічних рухів, а також тестування гіпотез. Особлива увага приділяється аналізу ефективності різних методів машинного навчання в умовах невизначеності та турбулентності ринку. Використання моделей штучного інтелекту, дозволяє враховувати залежності у фінансових даних. На основі проведених досліджень визначаються основні напрями подальших дій у цій сфері, включаючи впровадження інформаційних моделей у практичну діяльність фінансових інститутів.

**Ключові слова:** машинне навчання; фінансова аналітика; інформаційні моделі; ухвалення рішень.

Табл.: 3. Рис.: 1. Бібл.: 9.

**Актуальність теми дослідження.** Моделі машинного навчання для прогнозування фінансових показників та оптимізації формування портфеля акцій є надзвичайно актуальними в умовах сучасних фінансових ринків, які характеризуються високою динамічністю та невизначеністю. Поширені методи аналізу стають не ефективними через збільшення обсягу даних та складності ринкових взаємодій. Інтеграція нових підходів машинного навчання та теорії ігор дозволяє точніше передбачати поведінку ринку і покращити процес прийняття рішень, що є критично важливим для інвесторів та фінансових аналітиків.

Дослідження має широке значення для галузі фінансової аналітики та інвестування. Інформаційні моделі на основі штучного інтелекту підвищують ефективність управління портфелями акцій мінімізуючи ризики та максимізуючи прибуток. В умовах постійних змін на ринках та зростання конкуренції такі інструменти стають незамінними для ухвалення рішень інвестування [1].

Подальше вдосконалення алгоритмів машинного навчання, зокрема глибоких нейронних мереж, відкриває нові можливості для аналізу складних взаємодій у фінансових даних. Дослідження у цій сфері мають значний практичний внесок у покращення процесів управління інвестиціями.

**Постановка проблеми.** У зв'язку зі стрімким розвитком технологій останніх років та зростання кількості даних доступних для обробки виникає критична необхідність розробки ефективних методів для прогнозування фінансових показників, які можна використати у формуванні збалансованого портфеля акцій за допомогою моделей машинного навчання. Традиційні методи аналізу не завжди здатні адекватно враховувати всі доступні фактори, що знижує ефективність управління інвестиціями.

Особливо важливим дослідження є для галузі фінансової аналітики та інвестування. Застосування штучного інтелекту для аналізу фінансових даних та прогнозування ринкових трендів дозволяє підвищити точність та ефективність ухвалення рішень. Це особливо актуально в умовах невизначеності та турбулентності ринку, де точні прогнози можуть забезпечити конкурентну перевагу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** За останні роки була проведена велика кількість досліджень пов'язаних з використанням машинного навчання у сфері прогнозування часових рядів, якими у свою чергу є фінансові дані, що використовуються для



дослідження поведінки цін на акції компаній. Новітні методи глибокого навчання демонструють високу ефективність у передбаченні ринкових трендів та цін активів. Однак ці дослідження також виявляють важливі проблеми, зокрема пов'язані з якістю даних та інтерпретованістю моделей [1]. Значною складністю є також відсутність стабільних моделей, які показували б однакову результативність на різних фінансових даних. Більшість моделей потребує значного додаткового калібрування та оптимізації [2].

Широкої популярності набувають методи, які беруть за основу розроблені алгоритми автоматичного машинного навчання. Такі алгоритми намагаються використати одразу декілька моделей, оптимізувати їх і обрати для подальшої роботи одну з представлених у вхідній конфігурації, що показала найбільшу ефективність. Вони показують більшу продуктивність, оскільки за короткий термін можна протестувати кілька алгоритмів одночасно та обрати найкращий. Такі механізми використовуються в роботі з часовими рядами, де показали більшу ефективність за традиційні методи [3]. Зокрема, такі механізми використовується і у сфері прогнозування фінансових показників, де широко використовуються як допоміжний інструмент ухвалення рішень [4].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Попри досягнення в прогнозуванні фінансових даних за допомогою машинного навчання, є важливі недосліджені грані. Однією з основних проблем є нестабільність моделей, які часто показують різні результати на різних наборах даних. Це створює труднощі для інвесторів, які покладаються на точні прогнози для формування своїх портфелів акцій. Більшість моделей потребує додаткового калібрування та оптимізації, що вимагає значних ресурсів і часу для тестування потенційних гіпотез. Виникає складність підбору моделей.

**Метою статті** є аналіз процесу використання існуючих моделей машинного навчання для прогнозування фінансових показників і створення додаткових параметрів у прийнятті рішень для формування збалансованого портфеля акцій, а також пошук шляхів, які допоможуть перевірити гіпотези прогнозування на якомога більшій кількості моделей для покращення процесу пошуку найкращого результату.

**Виклад основного матеріалу.** Збільшення кількості даних доступних для аналізу спонукає використовувати сучасні методи для їх аналізу та пошуку залежностей. Це стосується також і фінансової сфери, де для ухвалення ефективних рішень критично необхідно використовувати інформаційні моделі, оскільки людина більше не може обробити ефективно весь спектр доступних даних [5]. Машинне навчання відкриває нові можливості для аналізу великих обсягів фінансових даних і формування збалансованих портфелів акцій. Завдяки своїй здатності автоматично виявляти складні шаблони і тренди в даних, моделі машинного навчання дозволяють значно підвищити точність прогнозів і оптимізувати інвестиційні стратегії.

Зазвичай робота з моделями включає в себе декілька важливих етапів [2]. Першим кроком є збір історичних даних за допомогою API, таких як Yahoo Finance або іншого джерела. На цьому етапі важливо зібрати якнайбільше даних. Наступним етапом є попередня обробка даних. Важливою частиною цього кроку є створення додаткових ознак на вже наявних, що полегшує роботу моделей машинного навчання. Після обробки даних переходять до створення моделей прогнозування. Це включає вибір і налаштування різних алгоритмів машинного навчання, таких як лінійна регресія, випадкові ліси, градієнтне підсилювання або глибокі нейронні мережі. Кожна з цих моделей має свої переваги та недоліки, і вибір конкретної моделі залежить від характеристик даних та вимог до точності прогнозу. Останнім етапом є оцінка моделі, що включає перевірку точності прогнозів на тестових даних. Для цього використовують різні метрики оцінювання, такі як середньоквадратична помилка (RMSE) [4]. Оцінка моделі дозволяє виявити її сильні та слабкі сторони й за потреби додати корективи або вибрати іншу модель.

Для проведення базового експерименту з прогнозування поведінки цін акцій та реалізації першого та другого етапів ланцюга можна використати відкриті дані біржових торгів, а також доповнити додатковими показниками. Весь список використаних характеристик наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Ознаки вхідних даних використаних для експериментального прогнозування

Ознаки	Трактування
Date	Дата відповідного торгового дня.
Open	Ціна відкриття. Відображає ціну акції на початок торгового дня.
High	Максимальна ціна. Найвища ціна акції, досягнута протягом торгового дня.
Low	Мінімальна ціна. Найнижча ціна акції, зафіксована протягом торгового дня.
Close	Ціна закриття. Ціна акції на момент закриття торгів.
Volume	Обсяг торгів. Кількість акцій, що були продані або куплені протягом торгового дня.
SMA_20	Проста ковзаюча середня за 20 днів.
SMA_50	Проста ковзаюча середня за 50 днів.
EMA_20	Експоненційна ковзаюча середня за 20 днів.
EMA_50	Експоненційна ковзаюча середня за 50 днів.
RSI	Індекс відносної сили. Вимірює швидкість і зміну цінових рухів.

Джерело: розроблено автором.

Для перевірки одразу декількох моделей машинного навчання та економії ресурсів доцільно використовувати бібліотеки-агрегатори, що надають можливість використати одразу великий набір алгоритмів та перевірити й порівняти їх показники на наборі даних. До таких бібліотек також належить H2O [6]. Для вибору бібліотеки H2O та платформи H2O.ai як основних засобів для машинного навчання було кілька вагомих причин. Передусім H2O.ai надає можливість високопродуктивного розподіленого тренування на великих наборах даних, що є критично важливим для фінансових ринків з їх великими обсягами даних. Крім того, ця платформа підтримує широкий спектр алгоритмів машинного навчання, включаючи лінійну регресію, дерева рішень, випадкові ліси та градієнтне підсилування, що дозволяє порівнювати різні моделі та обирати найкращі для конкретних задач. Також H2O AutoML автоматизує процес вибору, тренування та налаштування моделей, що значно скорочує час, необхідний для отримання високоякісних прогнозів. Це особливо важливо в умовах швидкоплинного фінансового ринку, де швидкість і точність прийняття рішень є вирішальними факторами. Платформа легко інтегрується з мовами програмування R, Python, Java і Scala, що робить її зручною для використання в різних робочих середовищах.

Існують кілька внутрішніх обмежень середовища H2O, які можуть впливати на моделі машинного навчання. Серед них підтримка обмеженого набору алгоритмів, обмеження на розмір даних, можливості паралельного обчислення, автоматизація процесів (AutoML), обмеження інтерпретації моделей, інтеграція з іншими інструментами та потреба в специфічних знаннях. Наприклад, H2O підтримує лише певний набір алгоритмів, що може обмежувати вибір методів для специфічних задач. Обмеження на розмір даних залежать від доступної оперативної пам'яті, а паралельне обчислення може бути менш ефективним на машинах із малою кількістю ядер.

Крім того, автоматизація процесів за допомогою H2O AutoML може обмежити гнучкість користувачів у налаштуванні моделей, а деякі алгоритми, такі як глибокі нейронні мережі, можуть бути складними для інтерпретації.

Однак, в контексті цього дослідження ці обмеження не є релевантними, оскільки основна мета полягає у порівнянні точності різних моделей на заданому наборі даних. Платформа H2O забезпечує всі необхідні можливості для досягнення цієї мети.

Таким чином, вибір H2O.ai був обумовлений її потужними можливостями для обробки великих обсягів даних, підтримкою різноманітних алгоритмів, автоматизацією процесів машинного навчання та легкою інтеграцією з популярними мовами програмування, що робить її оптимальним рішенням для фінансових аналізів і прогнозування. Аби виконати якісне прогнозування, використовуємо одразу декілька різних типів моделей, що надає платформа H2O.

Першим є GLM (Generalized Linear Model) одна з найпростіших і найбільш інтерпретованих моделей машинного навчання [7]. Модель передбачає залежність між цільовою змінною (ціною акції) та однією чи кількома незалежними змінними шляхом побудови лінійного рівняння. GLM використовується для моделювання лінійних відносин між вхідними змінними і цільовою змінною. Вона добре працює з великими обсягами даних і показує стабільні результати.

Другим є GBM (Gradient Boosting Machine) метод ансамблювання, який створює послідовність дерев рішень, де кожне наступне дерево виправляє помилки попереднього [9]. Градієнтне підсилювання дозволяє ефективно враховувати нелінійні залежності в даних і забезпечує високу точність прогнозів [8].

Третім є DRF (Distributed Random Forest), що складається з великої кількості дерев рішень, кожне з яких навчається на випадковому підмножині даних і ознак. Випадкові ліси забезпечують стійкість до перенавчання і можуть обробляти великі обсяги даних з високою швидкістю [9]. Вони добре працюють з різними типами даних та показують стабільні результати.

Останнім методом є ансамблеві моделі (Stacked Ensembles), який поєднує кілька базових моделей для створення більш точного та стабільного прогнозу. Цей підхід ґрунтується на ідеї, що поєднання декількох моделей дозволяє компенсувати їхні індивідуальні недоліки та підвищити загальну оцінку. Ансамбль складається з двох рівнів: базові моделі та метамодель. Базові моделі – це різноманітні алгоритми машинного навчання, які незалежно тренуються на тому ж самому наборі даних. Кожна з цих моделей генерує свій результат. Метамодель навчається на прогнозах базових моделей.

Для оцінки результативності моделей будемо використовувати Root Mean Squared Error (RMSE). Це метрика, яка використовується для оцінки якості прогнозів моделі машинного навчання [4]. RMSE показує середню квадратичну помилку між прогнозованими та фактичними значеннями. Чим менше значення RMSE, тим точніше модель. Розраховується за формулою:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \hat{y}_i - y_i \right)^2},$$

де  $n$  – кількість спостережень,  $\hat{y}_i$  – прогнозоване значення,  $y_i$  – фактичне значення.

Основною причиною такого вибору є те, що в контексті фінансових ринків найбільш важливим критерієм є точність прогнозів, оскільки інвестори та аналітики орієнтуються на мінімізацію помилок у прогнозах для прийняття оптимальних рішень. Перевірка адекватності моделей також є важливим аспектом, але в такому випадку ми зосередилися на RMSE через те, що це критичний параметр для прийняття рішень на фінансових ринках, і RMSE безпосередньо показує, наскільки модель підходить для прогнозування фінансових показників.

У процесі виконання тренування та прогнозування на даних про ціни акцій за допомогою платформи H2O було отримано результати, що показано в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати тренування моделей в ході експерименту

Модель	RMSE
StackedEnsemble_BestOfFamily_1	0,200180
StackedEnsemble_AllModels_1	0,202486
DRF_1	0,205305
GBM_3	0,207178
GBM_2	0,226384
GLM_1	0,254302
GBM_1	0,731782

Джерело: розроблено автором.

Модель StackedEnsemble\_BestOfFamily\_1 показала найнижче значення RMSE (0.200180) на тренувальних даних. Це свідчить про її високу точність. Оскільки ансамблеві моделі комбінують прогнози кількох базових моделей, що дозволяє компенсувати індивідуальні недоліки кожної з них і покращити загальну продуктивність. Модель StackedEnsemble\_AllModels\_1 продемонструвала схожий результат з RMSE 0.202486, що підкреслює ефективність поєднання всіх створених моделей для досягнення стабільного прогнозу.

Модель DRF\_1 (Distributed Random Forest) також показала високі результати з RMSE 0.205305. Випадкові ліси є стійкими до перенавчання завдяки використанню великої кількості дерев рішень, що працюють на випадкових підмножин даних.

Моделі градієнтного підсилення GBM\_3 та GBM\_2 продемонстрували RMSE 0.207178 і 0.226384 відповідно. Градієнтне підсилення є потужним методом ансамблювання, який створює послідовність дерев рішень, де кожне наступне дерево виправляє помилки попереднього.

Модель GLM\_1 (Generalized Linear Model) мала RMSE 0.254302, що є дещо вищим порівняно з іншими моделями, але все ж показало достатньо стабільні результати.

Нарешті, модель GBM\_1 показала найвищий RMSE серед розглянутих моделей (0.731782), що може свідчити про недостатню оптимізацію або перенавчання на тренувальних даних.

Причиною високого RMSE може бути використання технік автоматичного машинного навчання, що ускладнює безпосередньо процес оптимізації кожної моделі індивідуально. Таким чином, у фінальній вибірці можуть потрапляти не результативні моделі. Але в свою чергу це надає можливість перевірити велику кількість алгоритмів одночасно і перевірити, який може підходити краще за інших для вхідних даних.

Виконання прогнозування на тестовій вибірці показало значно інші результати. Вони наведені в табл. 3.

Таблиця 3 - Результати прогнозування на тестовій вибірці

Модель	RMSE
StackedEnsemble_BestOfFamily_1	52,967622
StackedEnsemble_AllModels_1	57,206504
DRF_1	71,404299
GBM_3	73,420568
GBM_2	73,442396
GLM_1	1,852510
GBM_1	85,858264

Джерело: розроблено автором.

На рис. 1 можна побачити результати прогнозування кожної моделі в порівнянні до реальних даних.

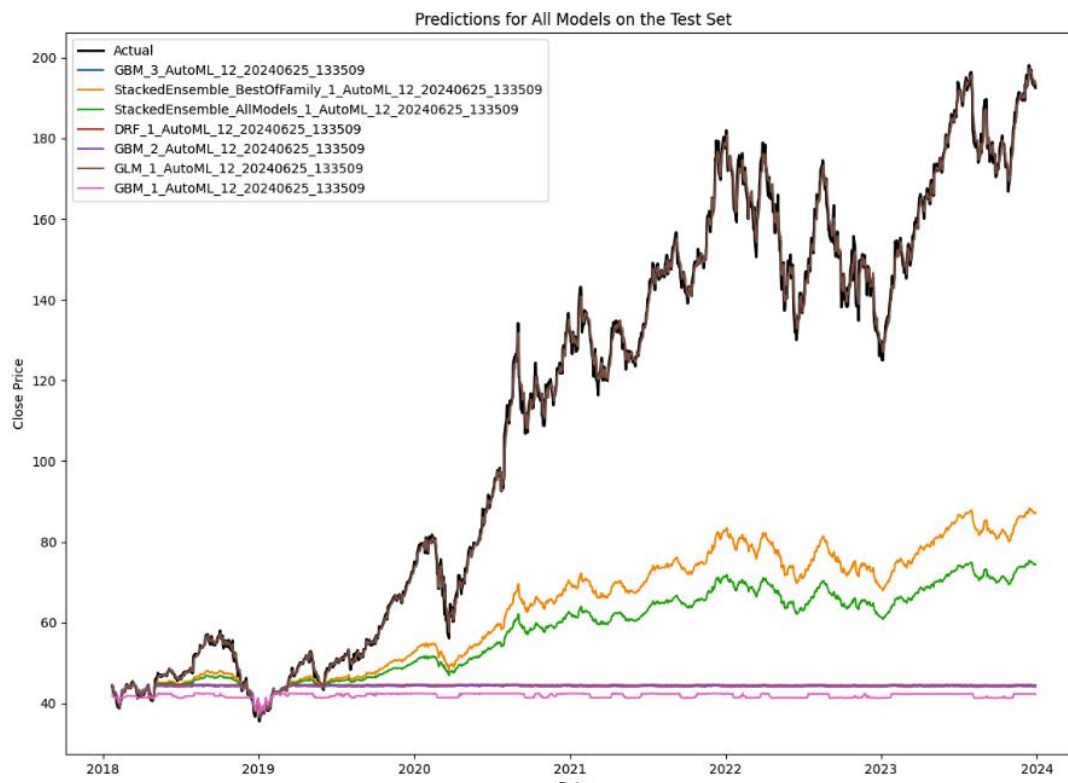


Рис. 1. Результати прогнозу на тестовій вибірці

З отриманих даних можна побачити, що моделі адаптувалися до тренувальних даних, унаслідок чого виникло перенавчання - неможливість працювати з новими даними. Таке часто трапляється при використанні автоматичних платформ, як H2O. У свою чергу це надає можливість одразу виявити проблемні алгоритми й відкинути їх для наступних ітерацій тренувань. У результаті перевірки на тестовій вибірці найкраще показала себе модель GLM\_1, яку в подальшому можна використати аналітикам для формування збалансованих портфелів спираючись на результати прогнозу. Хоча в першій ітерації тестування все ще точність дуже низька, що вказує на потребу в додатковому калібруванні.

**Висновок.** Проведене дослідження показало достатню ефективність використання моделей машинного навчання для прогнозування цін на акції. Ансамблеві моделі, такі як StackedEnsemble\_BestOfFamily\_1 і StackedEnsemble\_AllModels\_1, демонструють найкращі результати на тренувальних даних завдяки здатності поєднувати прогнози декількох базових моделей. Важливими факторами для покращення точності є ретельне калібрування даних та регуляризація моделей. Різниця між результатами на тренувальних і тестових даних свідчить про необхідність додаткових кроків для покращення моделей працювати з новими даними.

Результати найкращих моделей можна використовувати для прийняття рішень у формуванні збалансованого портфеля акцій. Прогнози цін на акції, отримані з використанням цих моделей, можуть допомогти інвесторам визначити оптимальні часові проміжки для купівлі або продажу акцій. Наприклад, прогнози можуть вказати на потенційні точки зростання або падіння вартості акцій, що дозволяє інвесторам вчасно реагувати на ринкові зміни й коригувати свої стратегії.

Загалом, результати підкреслюють важливість інтеграції моделей машинного навчання у процес прийняття фінансових рішень. Використання AutoML, яке автоматизує підбір, тренування та налаштування моделей, дозволяє тестувати якомога більше моделей, що сприяє перевірці гіпотез прогнозування і знаходження оптимальних рішень.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на вдосконалення методів регуляризації, покращення якості даних та розробку нових технічних індикаторів для підвищення точності прогнозів. Використання більшої кількості моделей для перевірки гіпотез та трендів стає можливим завдяки AutoML, що дає змогу порівнювати велику кількість моделей за короткий проміжок часу.

### Список використаних джерел

1. Machine learning in financial forecasting: A U.S. review: Exploring the advancements, challenges, and implications of AI-driven predictions in financial markets / O. Olubusola, N. Zamanjomane Mhlongo, D. binna Daraojimba [et al.] // *World Journal of Advanced Research and Reviews*. – 2024. – № 21.
2. Gaurang, Sonkavde. Forecasting Stock Market Prices Using Machine Learning and Deep Learning Models: A Systematic Review, Performance Analysis and Discussion of Implications / Gaurang Sonkavde, Gaurang Sonkavde, Anupkumar M. Bongale // *Int. J. Financial Stud.* – 2023. – № 11.
3. Ahmad. Alsharif. Review of ML and AutoML Solutions to Forecast Time-Series Data / Ahmad Alsharif, Karan Aggarwal, Sonia Garg // *Archives of Computational Methods in Engineering*. – 2022. – № 29.
4. George, Westergaard. Time Series Forecasting Utilizing Automated Machine Learning (AutoML): A Comparative Analysis Study on Diverse Datasets / George Westergaard, Utku Erden, Omar Abdallah Mateo // *Information*. – 2024. – № 15.
5. Marko, Kureljusic. Forecasting in financial accounting with artificial intelligence – A systematic literature review and future research agenda / Marko Kureljusic, Erik Karger. // *Journal of Applied Accounting Research*. – 2024. – № 25.
6. Intisar, O. Automated Prediction of Crack Propagation Using H2O AutoML / O. Intisar, M. Khan, A. Starr // *Sensors (Basel)*. – 2023.
7. Comparative Analysis of Stock Price Prediction Models: Generalized Linear Model (GLM), Ridge Regression, Lasso Regression, Elasticnet Regression, and Random Forest -A Case Study on Netflix [Electronic resource]. – 2023. – Accessed mode: [https://www.researchgate.net/publication/374950281\\_Comparative\\_Analysis\\_of\\_Stock\\_Price\\_Prediction\\_Models\\_Generalized\\_Linear\\_Model\\_GLM\\_Ridge\\_Regression\\_Lasso\\_Regression\\_Elasticnet\\_Regression\\_and\\_Random\\_Forest\\_-\\_A\\_Case\\_Study\\_on\\_Netflix](https://www.researchgate.net/publication/374950281_Comparative_Analysis_of_Stock_Price_Prediction_Models_Generalized_Linear_Model_GLM_Ridge_Regression_Lasso_Regression_Elasticnet_Regression_and_Random_Forest_-_A_Case_Study_on_Netflix).
8. Tran, K. Machine Learning to Forecast Financial Bubbles in Stock Markets: Evidence from Vietnam / K. Tran, H. Le, C. Lieu // *Int. J. Financial Stud.* – 2023.
9. Sanjiban, S. Random forest, gradient boosted machines and deep neural network for stock price forecasting: a comparative analysis on South Korean companies / S. Sanjiban, R. Chopra, K. Lee // *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*. – 2020.

### References

1. Olubusola, O., Zamanjomane Mhlongo, N., binna Daraojimba, D., & et al. (2024). Machine learning in financial forecasting: A U.S. review: Exploring the advancements, challenges, and implications of AI-driven predictions in financial markets. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21.
2. Sonkavde, G., Sonkavde, G., & Bongale, A. M. (2023). Forecasting stock market prices using machine learning and deep learning models: A systematic review, performance analysis and discussion of implications. *International Journal of Financial Studies*, 11.
3. Alsharif, A., Aggarwal, K., & Garg, S. (2022). Review of ML and AutoML solutions to forecast time-series data. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29.
4. Westergaard, G., Erden, U., & Abdallah Mateo, O. (2024). Time series forecasting utilizing automated machine learning (AutoML): A comparative analysis study on diverse datasets. *Information*, 15.
5. Kureljusic, M., & Karger, E. (2024). Forecasting in financial accounting with artificial intelligence – A systematic literature review and future research agenda. *Journal of Applied Accounting Research*, 25.
6. Intisar, O., Khan, M., & Starr, A. (2023). Automated prediction of crack propagation using H2O AutoML. *Sensors (Basel)*.

7. Comparative analysis of stock price prediction models: Generalized linear model (GLM), ridge regression, lasso regression, elasticnet regression, and random forest - A case study on Netflix. (2023). [https://www.researchgate.net/publication/374950281\\_Comparative\\_Analysis\\_of\\_Stock\\_Price\\_Prediction\\_Models\\_Generalized\\_Linear\\_Model\\_GLM\\_Ridge\\_Regression\\_Lasso\\_Regression\\_Elasticnet\\_Regression\\_and\\_Random\\_Forest\\_-\\_A\\_Case\\_Study\\_on\\_Netflix](https://www.researchgate.net/publication/374950281_Comparative_Analysis_of_Stock_Price_Prediction_Models_Generalized_Linear_Model_GLM_Ridge_Regression_Lasso_Regression_Elasticnet_Regression_and_Random_Forest_-_A_Case_Study_on_Netflix).

8. Tran, K., Le, H., & Lieu, C. (2023). Machine learning to forecast financial bubbles in stock markets: Evidence from Vietnam. *International Journal of Financial Studies*.

9. Sanjiban, S., Chopra, R., & Lee, K. (2020). Random forest, gradient boosted machines and deep neural network for stock price forecasting: A comparative analysis on South Korean companies. *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*.

Отримано 03.06.2024

UDC 004.94

### **Bohdan Parkhomenko<sup>1</sup>, Andrii Akimenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD student of the Department of Information Technology and Software Engineering  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [bparkhomenko@stu.cn.ua](mailto:bparkhomenko@stu.cn.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-1279-4981>

<sup>2</sup>PhD in Physics and Mathematics,

Associate Professor of the Department of Information Technologies and Software Engineering  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [anakim2@stu.cn.ua](mailto:anakim2@stu.cn.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4594-6559>

## **USE OF INFORMATION MODELS TO PREDICT THE BEHAVIOR OF FINANCIAL INDICATORS**

*The article provides an overview of using machine learning models to predict financial indicators, aiming to enhance decision-making for balanced stock portfolios. The study highlights the relevance of this approach due to the dynamic nature of financial markets, where traditional methods fall short. Machine learning techniques like linear regression, decision trees, random forests, and automatic learning platforms, combined with deep learning, are powerful tools for predicting market trends and strategic moves.*

*The research addresses the need for accurate forecasting methods, which is critical for investors and analysts. It evaluates the performance of various machine learning models in market uncertainty, focusing on their ability to capture financial data dependencies. Metrics such as RMSE are used to assess model accuracy.*

*Combining deep learning with machine learning techniques improves prediction capabilities. Ensemble methods, which merge multiple models, particularly enhance accuracy. The study identifies future directions, including refining and integrating models into financial institutions' practices.*

*The study underscores the potential of AI models to transform financial analytics, leading to better decision-making and more balanced, profitable stock portfolios. Implementing these models in financial institutions can significantly improve their ability to navigate market uncertainties and seize opportunities.*

**Keywords:** machine learning; financial analytics; information models; decision-making.

Table: 3. Fig.: 1. References: 9.

## РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-2(36)-181-193

UDC 621.357

**Antonina Pliasovska<sup>1</sup>, Dmytro Ushchapovskiy<sup>2</sup>, Olga Linyucheva<sup>3</sup>,  
Victoria Vorobyova<sup>4</sup>, Tetiana Motronyuk<sup>5</sup>, Georgii Vasyliiev<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>Student, Department of Electrochemical Productions Technology  
National technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic institute” (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [pliasovska.antonina@lil.kpi.ua](mailto:pliasovska.antonina@lil.kpi.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0002-4063-4246>

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Professor Associate, Department of Electrochemical Productions Technology  
National technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic institute” (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [soltidim@gmail.com](mailto:soltidim@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2809-2774>

<sup>3</sup>Doctor in Technical Sciences, Professor, Department of Electrochemical Productions Technology, National technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic institute” (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [o\\_lin@xtf.kpi.ua](mailto:o_lin@xtf.kpi.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4181-5946>

<sup>4</sup>Doctor in Technical Sciences, Professor Associate, Department of Physical Chemistry Technology  
National technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic institute” (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [vorobyovavika1988@gmail.com](mailto:vorobyovavika1988@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7479-9140>

<sup>5</sup>PhD in Technical Sciences, Professor Associate, Department of Electrochemical Productions Technology  
National technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic institute” (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [t.motroniuk@gmail.com](mailto:t.motroniuk@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3717-5934>

<sup>6</sup>Doctor in Technical Sciences, Professor Associate, Department of Electrochemical Productions Technology  
National technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic institute” (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [g.vasyliiev@kpi.ua](mailto:g.vasyliiev@kpi.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4056-5551>

### CURRENT MODE OF ELECTROCHEMICAL 3D PRINTING OF COPPER PARTS

*The peculiarities of the use of copper nitrate electrolytes in local electrodeposition or electrochemical 3D printing systems have been studied. A model of the current mode in electrochemical 3D printing has been proposed. The possibility of obtaining electrochemically 3D printed objects with a profile height up to 100 μm with a compact fine-crystalline metal structure at a current density of 2 A/dm<sup>2</sup> in a copper nitrate electrolyte with a content of 300 g/l and with the simultaneous introduction of gloss-forming additives of the Rubin complex (KIESOW OBERFLÄCHENCHEMIE GmbH & Co) and glycine is shown.*

**Key words:** copper; local electrodeposition; electrochemical 3D printing; nitrate electrolyte; gloss-forming additives; current mode.

*Fig.: 7. Table: 2. References: 22.*

**Relevance of the research.** Electrochemical 3D-printing is a promising direction in electrochemistry from an industrial and scientific point of view [1]. During this process, metal deposition takes place by layer-by-layer formation of the deposit, which leads to unique microstructural properties controlled in the printing process [2; 3]. However, the majority of current research on electrochemical 3D printing technology focuses on nano- and micro-scale objects [2-10], fewer works are devoted to the study of macro-scale objects formation [11-14]. The current mode of electrochemical 3D printing with the relative movement of the working electrode-anode assumes a non-stationary regime. By varying the parameters of the electrolysis pulse mode and studying the influence of the current mode on the morphology of the cathodic metal deposit, electrochemical 3D printing can be optimized [15; 16]. This allows for the establishment of the maximum average current density ( $i_m$ ) required for forming a compact, fine-crystalline metal deposit at the appropriate speed of movement of the electrode-tool and with the selected composition of the electrolyte solution. After all, it is the  $i_m$ , which can be characterized by the ratio of the total current to the working area of the printing surface, and will determine the speed of electrochemical deposition or printing of the object as a whole.



**Problem statement.** The method of obtaining macroscale copper objects [12; 13] by electrochemical 3D printing is in high demand, primarily in radio electronics. For example, electrochemical printing of conductive paths for printed circuit boards allows to eliminate the stages of application of photo- or metal resist during their production. The result is an economically profitable and environmentally promising technology.

**Analysis of recent research and publications.** It is known that nitrate copper electrolytes allow to conduct electrodeposition at higher current densities than sulfate electrolytes, which is due to the higher solubility of copper nitrate compared to sulfate. This caused interest in the use of nitrate electrolytes in electrochemical 3D-printing technology [17]. Electrodeposition of copper from nitrate solutions leads to the formation of hard, sometimes brittle deposits [18-21]. However, in spite of this, if the electrolysis mode is chosen correctly, it is possible to obtain high-quality fine-crystalline deposits, which can also have a bright surface. At the same time, it is also necessary to maintain certain acidity of the solution at the level of pH 1...2. At a pH < 1, the reduction of nitrate ions and hydrogen can occur at the cathode. When the pH > 2, there is a possibility of deposition of the insoluble copper salts, which will cause embrittlement of the copper deposits. Electrodeposition from a nitrate electrolyte with a copper salt content of 300...500 g/dm<sup>3</sup> is carried out at room temperature, with an operating current density of 5...20 A/dm<sup>2</sup>. The deposits obtained from pure nitrate electrolytes are porous and coarse-crystalline. Long-term electrodeposition of the coating leads to CuCl suspensions formation in the solution and causes the appearance of dendrites [21].

**Uninvestigated parts of a common problem.** All the reasons that cause the formation of dendrites, pores, and a rough branched structure are undesirable for obtaining metal objects by the electrochemical 3D-printing method. In order to eliminate dendrite formation and increase the dispersive capacity of diluted nitrate electrolytes, the introduction of organic additives [19, 20] and the use of pulse-reverse electrolysis mode [21] are proposed. However, the application of appropriate techniques for electrochemical 3D printing of macro-scale objects under the condition of a non-stationary current regime requires additional research.

**Research objective.** The purpose of this work is: investigation of the current mode of electrochemical 3D printing in general during the production of macro-scale objects from copper in nitrate electrolytes; investigation of the possibility of modeling the influence of the current regime on the quality of copper deposits.

**Research methodology.**

**Electrolyte preparation.** Electrolytes were prepared by dissolving the corresponding components in distilled water. In order to improve the quality of copper cathodic deposits, chloride ions, glycine, and a complex of Rubin gloss-forming additives (KIESOW OBERFLÄCHENCHEMIE GmbH & Co) [22] were added into the corresponding electrolytes. The compositions of the electrolytes are given in Table 1.

*Table 1 – The composition of the investigated electrolytes*

Component	Number of electrolyte			
	1	2	3	4
Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O	300 g/l	300 g/l	300 g/l	-
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	-	-	-	300 g/l
KCl	0.2 g/l	0.2 g/l	0.2 g/l	-
Glycin	-	0.5 M	0.5 M	-
Rubin *	-	-	+	+
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-	-	-	32 ml/l
HCl	-	-	-	0.2 ml/l

\* Gloss-forming and leveling additives (further - Rubin complex) [22]:

Rubin T200-A (serves as a base for gloss-forming and leveling) – 2 ml/l;

Rubin T200-G (the additive is intended only for assembling a new electrolyte and after cleaning the electrolyte with activated carbon) - 8 ml/l;

Rubin T200-E (increases alignment and provides high bright) – 2 ml/l.

**Methodology of polarization measurements.** In these experiments, a three-electrode standard cell was used to obtain polarization curves. The working electrode was a cylindrical copper electrode embedded in a Teflon tube with a working surface area of  $0.05 \text{ dm}^2$ . The auxiliary electrode was a copper plate, and the reference electrode was a saturated silver chloride electrode. All polarization curves were given in the scale of the saturated silver chloride reference electrode. The curves were recorded in potentiodynamic mode using a PGStat500n potentiostat, with a potential sweep speed of  $2 \text{ mV/s}$ . The digital signal from the potentiostat was transmitted to a personal computer for further recording using appropriate software.

**In order to simulate the current regime** during electrochemical 3D-printing, the electro-deposition of copper deposits was carried out using constant and pulse current modes. For this, a PI-50-1.1 potentiostat was used as a source of direct and pulsed currents. A copper plate of  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  served as a cathode, and copper plates made of copper doped with 0.03% phosphorus with a total area of  $20 \text{ cm}^2$  were used as anodes. Before applying the copper coating, the samples and anodes were degreased and treated in a solution of concentrated nitric acid (1:1). The time of electrolysis was calculated to obtain  $10 \text{ }\mu\text{m}$  deposit thickness. After completion of electrolysis, the samples were thoroughly washed with water and dried with hot air before analyzing the morphology of the cathodic deposits.

**Local electrodeposition and recording of oscillograms.** The process of local electro-deposition (3D printing) was carried out on the set-up, previously described in [11], the scheme of which is shown in Fig. 1. An AISI 321 stainless steel plate was placed at the bottom of the plastic vessel and connected to the negative pole of the current source. Stainless steel was chosen to ensure separation of the printed part from the substrate after deposition. The working electrode was rotated using an electric motor, the speed of rotation was  $1 \text{ s}^{-1}$ . The radius of the printing trajectory along which the working electrode-anode moved was  $4.5 \text{ cm}$ , the width of the metal deposition area along the corresponding trajectory was  $0.5 \text{ cm}$ . The working electrode was a coil of platinized titanium foil connected to the positive pole of the current source. The anode was placed inside the polypropylene capillary and at a height of  $1 \text{ mm}$  above the cathode plate. The research was carried out in the range of values of average deposition current densities ( $i_m$ ) of  $0.5 \dots 4 \text{ A/dm}^2$ . The duration of printing was  $3,8 \text{ hours}$ . The estimated profile height of the printed objects was about  $100 \text{ }\mu\text{m}$ . After the electrodeposition was completed, the current was turned off, the solution was drained from the vessel. The resulting object in the form of a ring was washed with distilled water, removed from the substrate, and the quality of the metal deposit was examined by optical methods.

In order to record oscillograms of changes in the potential of the cathode over time at a point on the trajectory of the working electrode of the anode, a measuring electric circuit was additionally assembled (Fig. 1). The relevant circuit consisted of a Hantek 6025 VE digital oscilloscope, which was connected to the cathode plate and a saturated chlorine-silver reference electrode. The reference electrode through two intermediate beakers and a Luggin capillary with an elastic nozzle were connected to the electric circuit at the place of potential measurement through a hole in the cathode.

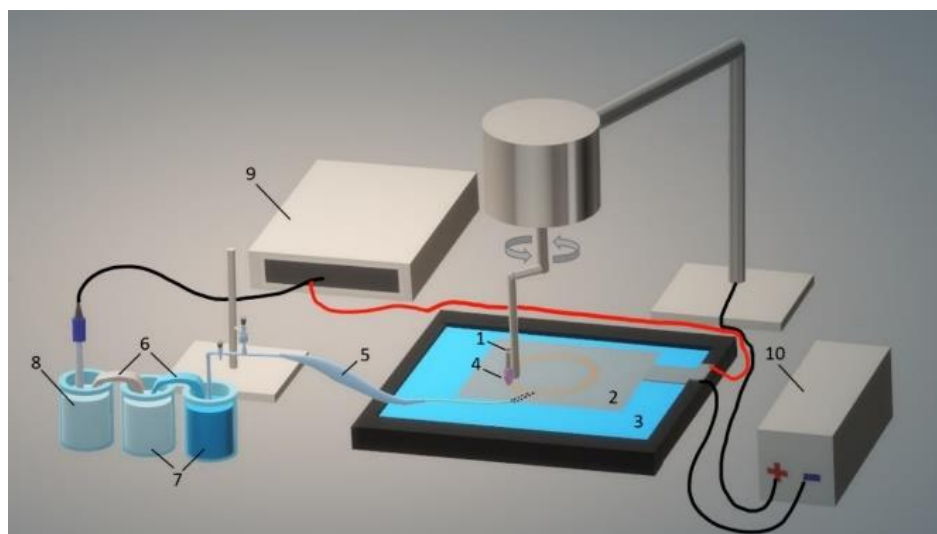


Fig. 1. Scheme of a laboratory set-up for recording oscillograms:  
 1 – anode; 2 – cathode-base; 3 – electrolyte; 4 – polypropylene capillary;  
 5 – Luggin capillary; 6 – salt bridges; 7 – intermediate beakers;  
 8 – cell of the reference electrode; 9 – oscilloscope; 10 – source of direct current

**Research results.**

**Polarization measurements in copper electrolytes.** Cathodic potentiodynamic polarization curves on a copper electrode were recorded in order to study the influence of the composition of the solution on the electrochemical parameters of the electrodeposition process. The results of relevant studies are shown in Fig. 2, the numbers of electrolytes correspond to those given in Table 1.

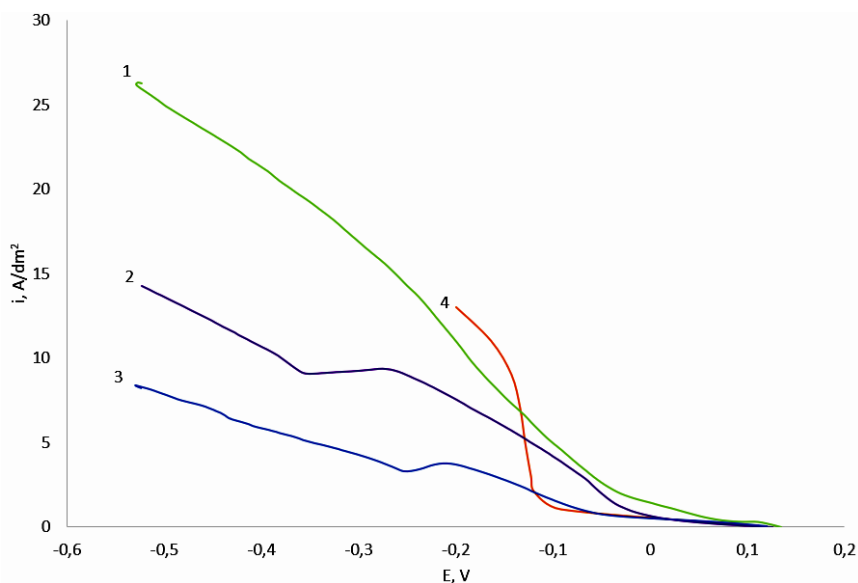


Fig. 2. Cathodic polarization curves in copper plating electrolytes:  
 1 – nitrate electrolyte (№ 1); 2 – nitrate electrolyte with added glycine (№ 2); 3 – nitrate electrolyte with glycine additives and Rubin complex (№ 3); 4 – sulfate electrolyte (№ 4)

In works [19; 20] it was proposed to introduce 0.25 M of glycine into a diluted copper plating nitrate electrolyte in order to obtain bright fine crystalline deposits of copper. Given the fact that more concentrated solutions will be used in electrochemical 3D printing systems in order to intensify this process, in this work it was proposed to introduce glycine at a concentration of 0.5 M into the investigated plating electrolyte. This led to a significant inhibition of the

cathodic process and the appearance of a limiting current of 9 A/dm<sup>2</sup>, which is associated with the active adsorption of the corresponding additive on the surface of the cathode during the electrodeposition process. In addition, the slope of the polarization curve in the range of current densities 1...9 A/dm<sup>2</sup> also decreased, which indicates that the introduction of glycine helps to increase the throwing power of the electrolyte (Fig. 2, curves 1, 2). Also, in the nitrate electrolyte, the synergetic effect of Rubin additives and glycine on the inhibition of the cathodic process have been established, as a result of which the slope of the polarization curve and the value of the limiting current decrease more strongly than in the case of separate introduction of the corresponding additives (Fig. 2, curves 2, 3).

In the case of comparison, the course of the polarization curves of sulfate electrolyte and nitrate electrolyte with the corresponding additives (Fig. 2, curves 3, 4) is similar in the range of current densities up to 2 A/dm<sup>2</sup>. In addition, this value of the current density corresponds to about 50% of the limit for the nitrate solution with the addition of glycine and Rubin additives. In view of the above, in the course of further studies for galvanic and electrochemically printed copper deposits, obtained precisely at 2 A/dm<sup>2</sup>, a comparative assessment of the morphology have been carried out.

**Current mode of electrochemical 3D-printing.** In the case of electrochemical 3D-printing or local electrodeposition [11] with the movement of the counter electrode (anode), the current mode will be equivalent to the pulse mode of electrolysis, since at a certain time the counter electrode (anode) is over a certain area on a closed trajectory of its movement (Fig. 3, a). In this area, when the counter electrode (anode) approaches it, the current pulse will increase, which will decrease after it moves away (Fig. 3, b). Accordingly, in electrochemical 3D printing and the movement of the electrode-tool along a closed trajectory with the same speed, with a certain approximation, the formula can be used to describe the current regime and calculate the average value of the current density  $i_m$ :

$$i_m = \frac{i_i + \tau_i}{\tau_i + \tau_p} = \frac{i_i}{1 + \frac{\tau_p}{\tau_i}}, \tag{1}$$

where  $i_i$  – pulse current density,  $\tau_i$  – pulse duration,  $\tau_p$  – pause duration.

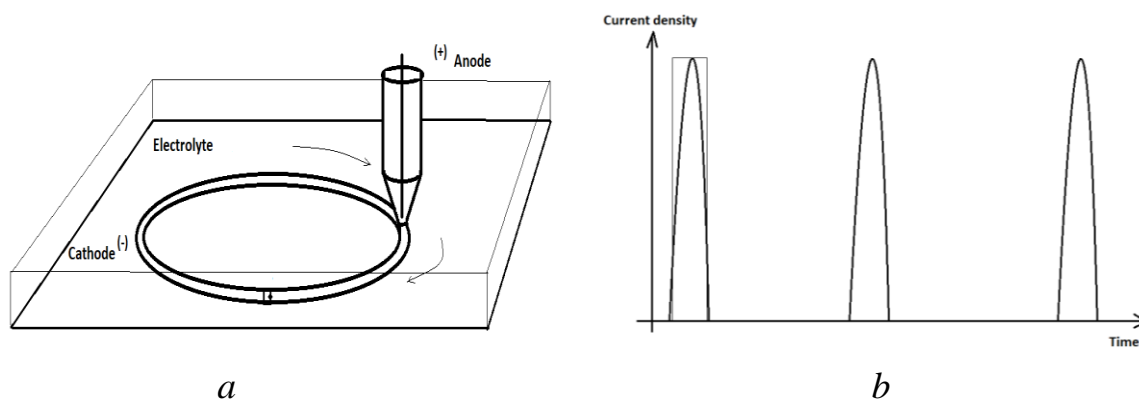


Fig. 3. Scheme of the electrochemical cell of the 3D printer (a) and the theoretical graph of the change in current density over time at a certain point on the trajectory of the working electrode-anode (b)

It should be noted that for a certain object, which will be produced by electrochemical 3D printing, the parameters of the current mode, that is, the pulse amplitude, duration of pulse and pause, will acquire a certain value, and will depend on the length of the trajectory and the speed of movement.

In order to confirm the above hypothesis, during the electrochemical 3D printing of the object "ring" made of copper, the oscillograms of potential change over time were taken in the studied copper electrolytes, which are shown in Fig. 4-7. The numbers of electrolytes correspond to those given in Table 1.

As can be seen from Fig. 4–7, the oscillograms of the change in time of the cathode potential during electrochemical 3D printing have a predicted appearance with a parabolic pulse shape. Obviously, the current pulses at the corresponding point on the trajectory of the counter electrode (anode) will have a corresponding shape.

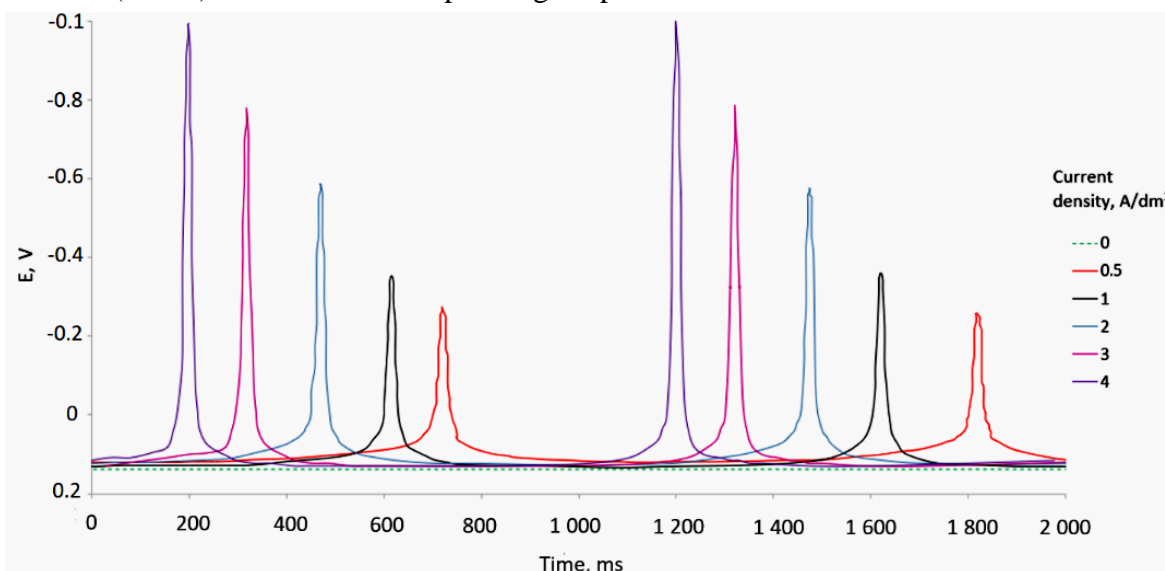


Fig. 4. Oscillograms of potential pulses in nitrate electrolyte without additives (№ 1)

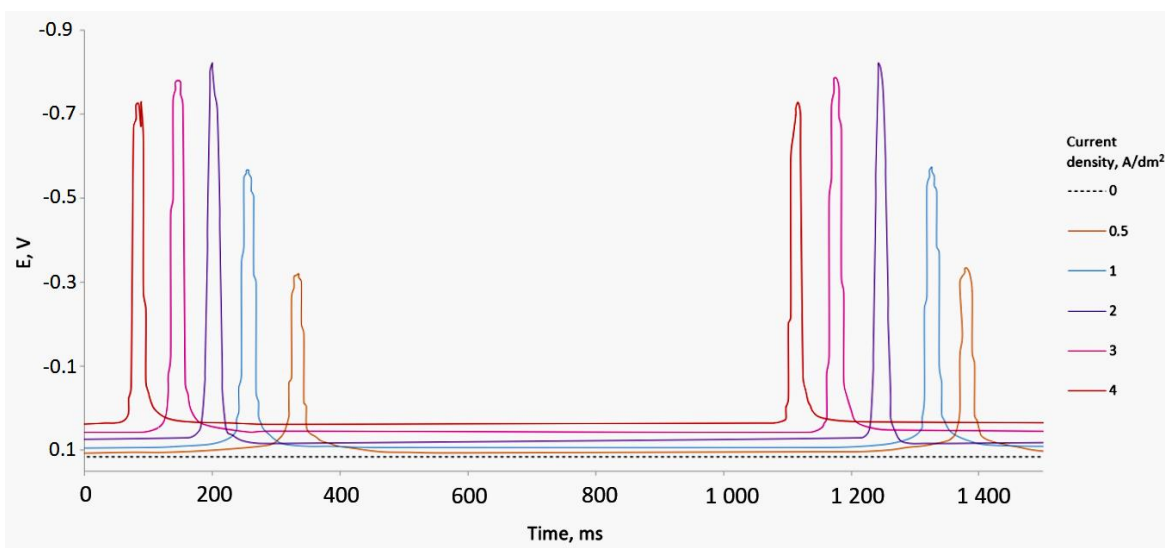


Fig. 5. Oscillograms of potential pulses in a nitrate electrolyte / with the addition of glycine (№ 2)

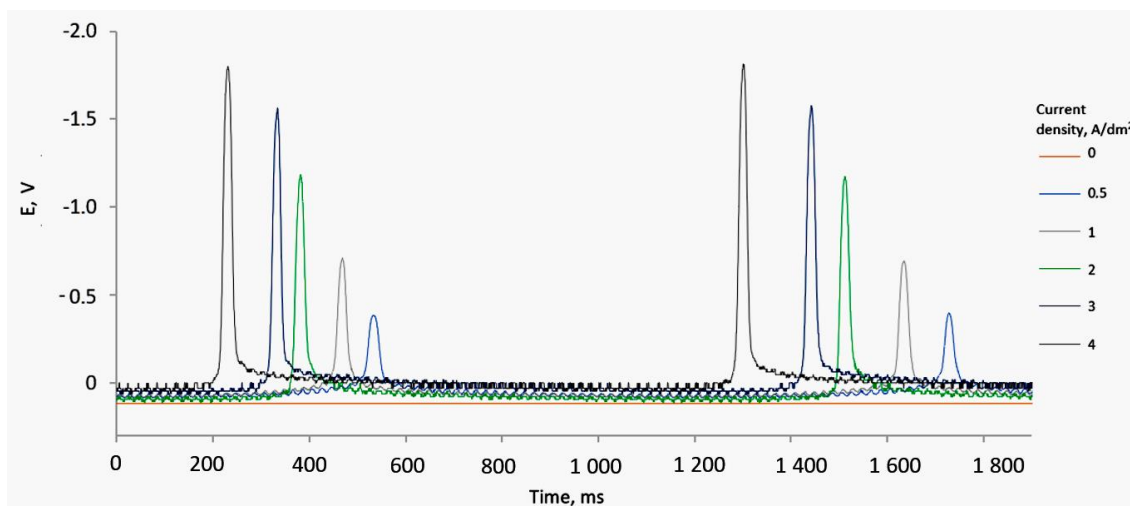


Fig. 6. Oscillograms of potential pulses in a nitrate electrolyte with the addition of glycine and Rubin additives (№ 3)

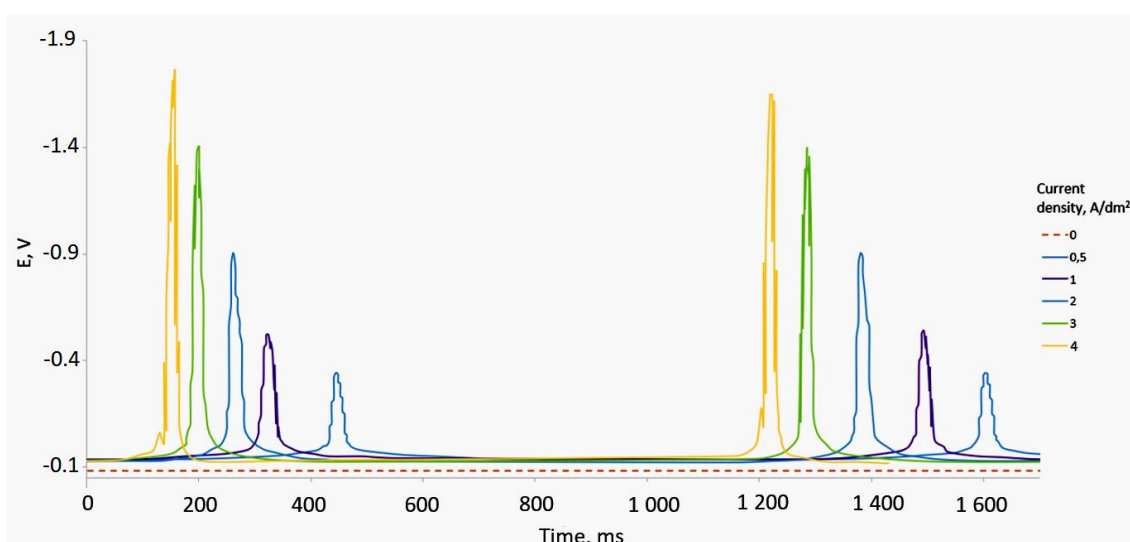


Fig. 7. Oscillograms of potential pulses in a sulfate electrolyte with the addition of Rubin (№ 4)

Based on the oscillogram data, the maximum values of the cathode potentials ( $E_i$ ), which are reached at the moment of the current pulse, are determined and are shown in Table 2. Given the simplification of model calculations and the description of the current mode as a unipolar pulse with a rectangular pulse shape (Fig. 3 b), using formula (1), the maximum values of the pulse current densities  $i_i$ , which correspond to the potentials  $E_i$ , were calculated.



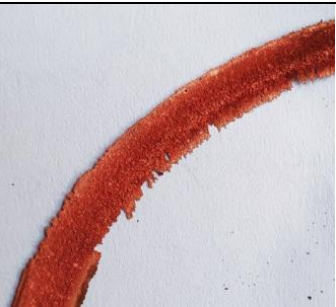






Table 2 – Basic parameters of the current mode of electrochemical 3D printing

Electrolyte number according to Table 1				$i_m, A/dm^2$	$i_i, A/dm^2$
1	2	3	4		
$E_i, V$					
-0.26	-0.33	-0.40	-0.33	0.5	5.5
-0.34	-0.58	-0.69	-0.52	1.0	11.0
-0.57	-0.81	-0.12	-0.90	2.0	22.0
-0.78	-0.79	-0.16	-1.40	3.0	33.0
-1.0	-0.73	-0.18	-1.76	4.0	44.0




From the analysis of the oscillograms (Fig. 4–7), it can be seen that the time interval between the sharp growth and the almost complete attenuation of the potential pulse is approximately 100 ms. The maximum pulse current densities  $i_i$  of electrochemical 3D printing, which correspond to the values of  $i_m \geq 0.5 \text{ A/dm}^2$ , go beyond the polarization curves, that is, they exceed the values of the limiting current densities for the stationary copper electrodeposition process (Fig. 2). In fact, at the moment of the current pulse, there is a high probability of side processes that can significantly affect the quality of copper deposits. Therefore, in order to verify the possibility of modeling the current regime using a pulse potentiostat, comparative studies of the influence of the composition of the solution and the current regime on the morphology of copper cathode deposits were conducted under the following conditions:

- 1) during electrodeposition in a conventional galvanic cell using a pulsed current mode, which is close to the current mode in electrochemical 3D printing ( $\tau_i = 0.1 \text{ s}$ ,  $\tau_p = 1 \text{ s}$ );
  - 2) directly in the process of electrochemical 3D printing on a device with a rotating anode.
- The results of relevant studies are given in Table 3.

*Table 3. Image of copper deposits obtained at an average current density of 2 A/dm<sup>2</sup> by various methods*

Electrolyte number according to Table 1	The sample was obtained by pulsed current mode electrodeposition	Electrochemically printed object "ring"	Enlarged image of the "rings" fragment
1	2	3	4
1	 CE = 89,31 %		
2	 CE = 79,26 %		
3	 CE = 75,15 %		

End Table 3

1	2	3	4
4	 <p>CE = 99,81 %</p>		

As can be seen in Table 3, in the pulse mode in the nitrate electrolyte without additives, dark precipitates were obtained, and the current efficiency (CE) is less than 100%. This may indicate the course of side processes of reduction of nitrate ions, accompanied by alkalization of the near-cathode layer and the formation of copper (I) oxide, which is consistent with the data [19, 20]. The introduction of glycine into the nitrate electrolyte does not suppress the process of electroreduction of nitrate ions, since the current efficiency decreases even more. However, due to the possible binding of monovalent copper into a complex, the quality of the deposits improves. The Rubin additives under the conditions of non-stationary current regime act as a brightener and in combination with glycine makes it possible to obtain semi-bright fine crystalline deposits of copper. In general, the similarity between the morphology of the deposits obtained in both cases allows to assume the adequacy of the proposed method of modeling the current mode of electrochemical 3D printing using a pulsed potentiostat.

**Conclusions.** Based on oscillograms of the cathode potential change in time, it was shown that the current mode of electrochemical 3D printing with relative movement of the working electrode - anode corresponds to the unipolar pulse mode.

It is shown that Rubin gloss forming additives (KIESOW OBERFLÄCHENCHEMIE GmbH & Co) provide fine crystalline bright copper deposits in both sulfate and nitrate electrolytes using stationary and pulsed electrolysis modes.

For electrochemical 3D printing of copper objects from nitrate electrolyte with copper nitrate content of 300 g/L, the addition of glycine at a concentration of 0,5 M is proposed to improve the quality of cathode deposits. Significant improvement of morphology and obtaining bright copper deposits is achieved by simultaneous addition of Rubin and glycine additives to the electrolyte.

### References

1. Electrodeposition-based 3D Printing of Metallic Microarchitectures with Controlled Internal Structures / Seol, S.K., Kim, D., Lee, S., Kim, J. H., Chang, W.S., & Kim, J.T. // Small (Weinheim an der Bergstrasse, Germany). – 2015. – Vol. 11(32). – Pp. 3896-3902. DOI: <https://doi.org/10.1002/sml.201500177>.
2. Said, R. A. Microfabrication by localized electrochemical deposition: experimental investigation and theoretical modelling / R.A. Said // Nanotechnology. – 2003. – Vol. 14(5). – P. 523. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/14/5/308>.
3. Brant, A. M. Finite element simulation of localized electrochemical deposition for maskless electrochemical additive manufacturing / A. M. Brant, M. M. Sundaram, A. B. Kamaraj // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2015. – Vol. 137(1). – 011018. <https://doi.org/10.1115/1.4028198>.
4. Kamaraj, A. Numerical study of localized electrochemical deposition for micro electrochemical additive manufacturing / Kamaraj A., Lewis S., & Sundaram M. // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 42. – Pp. 788-792. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.320>.
5. Localized electrochemical deposition of copper microstructures / E. M. El-Giar, R. A. Said, G. E. Bridges, D. J. Thomson // Journal of the Electrochemical Society. – 2000. – Vol. 147(2). – P. 586. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.1393237>.
6. Suryavanshi, A. P. Probe-based electrochemical fabrication of freestanding Cu nanowire array / A. P. Suryavanshi, M. F. Yu // Applied Physics Letters. – 2006. – Vol. 88(8). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2177538>.



7. Habib, M. A. Performance of electrodes fabricated by localized electrochemical deposition (LECD) in micro-EDM operation on different workpiece materials / M. A. Habib, M. Rahman // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2016. – Vol. 24. – Pp. 78-89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.08.003>.
8. Morsali, R. Mechanisms of localized pulsed electrodeposition (L-PED) for microscale 3D printing of nanotwinned metals / R. Morsali, D. Qian, M. Minary-Jolandan // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2019. – Vol. 166(8). – D354. DOI: <https://doi.org/10.1149/2.0051910jes>.
9. Electrical property-microstructure of copper interconnects printed by localized pulsed electrodeposition (L-PED) / M. E. H. Bhuiyan, C. Wang, M. J. Arellano-Jimenez, M. Waliullah, M. Quevedo-Lopez, R. Bernal, M. Minary-Jolandan // *Materials Letters*. – 2023. – Vol. 330. – 133364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133364>.
10. Habib, M. A. Fabrication of complex shape electrodes by localized electrochemical deposition / M. A. Habib, S. W. Gan, M. Rahman // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209(9). – Pp. 4453-4458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.10.041>.
11. Influence of polarization curve slope on the accuracy of local copper electrodeposition from sulphate electrolyte / G. Vasyliiev, V. Vorobyova, D. Uschapovskiy, M. Kotyk, O. Linyucheva // *Journal of Electrochemical Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 13(6). – Pp. 971-980. DOI: <https://doi.org/10.5599/jese.1899>.
12. Preparation of nickel parts by jet electro-deposition technique based on templates and grinding / G. F. Wang, Z. J. Tian, Z. D. Liu, L. D. Shen, J. Zhu // *International Journal of Electrochemical Science*. – 2015. – Vol. 10(8). – Pp. 6844-6854. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)06766-4](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)06766-4).
13. Selective copper metallization of nonconductive materials using jet-circulating electrodeposition / H. Kim, J. G. Kim, J. W. Park, C. N. Chu // *Precision Engineering*. – 2018. – Vol. 51. – Pp. 153-159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.08.005>.
14. Interconnect fabrication by electroless plating on 3D-printed electroplated patterns / M.E. Hossain Bhuiyan, S. Moreno, C. Wang, M. Minary-Jolandan // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2021. – Vol. 13(16). – Pp. 19271-19281. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.1c01890>.
15. Kamaraj, A. B. A study on the effect of inter-electrode gap and pulse voltage on current density in electrochemical additive manufacturing / A. B. Kamaraj, M. Sundaram // *Journal of Applied Electrochemistry*. – 2018. – Vol. 48. – Pp. 463-469. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10800-018-1177-3>.
16. Manukyan, N. Localized electrochemical deposition using ultra-high frequency pulsed power / N. Manukyan, A. Kamaraj, M. Sundaram // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – Vol. 34. – Pp. 197-204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.139>.
17. Обмеження нітратного електроліту міднення для швидкісного електрохімічного 3D-друку / Д. Ущাপовський, В. Воробйова, О. Плівак, Т. Мотронюк, Г. Васильєв // *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. – 2022. – № 4. – С. 77–87. DOI: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2022.265832>.
18. Background technology for purification of polluted aquatic environment and regeneration of concentrated waste nitrate-chloride-sulfate industrial solutions / D. Yu. Ushchapovskiy, O. G. Linyuchev, T. I. Motronyuk, O. V. Linyucheva, O. Yu. Bilchenko // *KPI Science News*. – 2019. – Vol. 5-6. – С. 95-101. DOI: <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2019.5-6.188444>.
19. Правда, А. А. Физико-химические закономерности влияния добавок различной природы на разряд-ионизацию меди в низкоконтрированных нитратных растворах : дис. ... канд. хим. наук / Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина ; Правда Алла Алексеевна. – Харьков, 2016. – 164 с.
20. Правда, А. А. Влияние глицина на процесс электроосаждения меди из нитратного электролита [Электронный ресурс] / А. А. Правда, А. П. Радченкова, В. И. Ларин // *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна*. – 2008. – № 820. Сер. : Хімія. – Вип. 16(39). – С. 353–356. – Режим доступа: <https://ekhnuir.karazin.ua/handle/123456789/3876>.
21. Мотронюк, Т. И. Электроосаждение меди из скоростных нитратных электролитов : дис. ... канд. техн. наук : спец.: 05.17.03 - "Электрохимические производства" / Киев. политех. ин-т ; науч. рук. М. И. Донченко ; Т. И. Мотронюк. – Киев, 1989. – 240 с.

22. A lab-scale alternative interconnection solution of semiconductor dice compatible with power modules 3-D integration / L. Ménager, M. Soueidan, B. Allard, V. Bley, B. Schlegel // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2010. – Vol. 25(7). – Pp. 1667-1670. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2041557>.

### References

1. Seol, S.K., Kim, D., Lee, S., Kim, J. H., Chang, W.S., & Kim, J.T. (2015). Electrodeposition-based 3D Printing of Metallic Microarchitectures with Controlled Internal Structures. *Small (Weinheim an der Bergstrasse, Germany)*, 11(32), 3896-3902. <https://doi.org/10.1002/sml.201500177>.
2. Said, R. A. (2003). Microfabrication by localized electrochemical deposition: experimental investigation and theoretical modelling. *Nanotechnology*, 14(5), 523. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/14/5/308>.
3. Brant, A. M., Sundaram, M. M., & Kamaraj, A. B. (2015). Finite element simulation of localized electrochemical deposition for maskless electrochemical additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137(1), 011018. <https://doi.org/10.1115/1.4028198>
4. Kamaraj, A., Lewis, S., & Sundaram, M. (2016). Numerical study of localized electrochemical deposition for micro electrochemical additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 42, 788-792. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.320>.
5. El-Giar, E.M., Said, R.A., Bridges, G.E., & Thomson, D.J. (2000). Localized electrochemical deposition of copper microstructures. *Journal of the Electrochemical Society*, 147(2), 586. <https://doi.org/10.1149/1.1393237>.
6. Suryavanshi, A.P., & Yu, M.F. (2006). Probe-based electrochemical fabrication of freestanding Cu nanowire array. *Applied Physics Letters*, 88(8). <https://doi.org/10.1063/1.2177538>
7. Habib, M. A., & Rahman, M. (2016). Performance of electrodes fabricated by localized electrochemical deposition (LECD) in micro-EDM operation on different workpiece materials. *Journal of Manufacturing Processes*, 24, 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.08.003>.
8. Morsali, R., Qian, D., & Minary-Jolandan, M. (2019). Mechanisms of localized pulsed electro-deposition (L-PED) for microscale 3D printing of nanotwinned metals. *Journal of The Electrochemical Society*, 166(8), D354. <https://doi.org/10.1149/2.0051910jes>.
9. Bhuiyan, M. E. H., Wang, C., Arellano-Jimenez, M. J., Waliullah, M., Quevedo-Lopez, M., Bernal, R., & Minary-Jolandan, M. (2023). Electrical property-microstructure of copper interconnects printed by localized pulsed electro-deposition (L-PED). *Materials Letters*, 330, 133364. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133364>.
10. Habib, M. A., Gan, S. W., & Rahman, M. (2009). Fabrication of complex shape electrodes by localized electrochemical deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(9), 4453-4458. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.10.041>.
11. Vasyliiev, G., Vorobyova, V., Uschapovskiy, D., Kotyk, M., & Linyucheva, O. (2023). Influence of polarization curve slope on the accuracy of local copper electrodeposition from sulphate electrolyte. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, 13(6), 971-980. <https://doi.org/10.5599/jese.1899>.
12. Wang, G.F., Tian, Z.J., Liu, Z.D., Shen, L.D., & Zhu, J. (2015). Preparation of nickel parts by jet electro-deposition technique based on templates and grinding. *International Journal of Electrochemical Science*, 10(8), 6844-6854. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)06766-4](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)06766-4).
13. Kim, H., Kim, J. G., Park, J.W., & Chu, C.N. (2018). Selective copper metallization of non-conductive materials using jet-circulating electrodeposition. *Precision Engineering*, 51, 153-159. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.08.005>.
14. Hossain Bhuiyan, M.E., Moreno, S., Wang, C., & Minary-Jolandan, M. (2021). Interconnect fabrication by electroless plating on 3D-printed electroplated patterns. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(16), 19271-19281. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c01890>.
15. Kamaraj, A. B., & Sundaram, M. (2018). A study on the effect of inter-electrode gap and pulse voltage on current density in electrochemical additive manufacturing. *Journal of Applied Electrochemistry*, 48, 463-469. <https://doi.org/10.1007/s10800-018-1177-3>.
16. Manukyan, N., Kamaraj, A., & Sundaram, M. (2019). Localized electrochemical deposition using ultra-high frequency pulsed power. *Procedia Manufacturing*, 34, 197-204. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.139>

17. Ushchapovskyi, D., Vorobiova, V., Plivak, O., Motroniuk, T., & Vasyliiev, H. (2022). Obmezhennia nitratnoho elektrolitu midnennia dlia shvydkisnoho elektrokhimichnoho 3D-druku [Limitations of copper nitrate electrolyte for high-speed electrochemical 3D printing]. *Visnyk Cherkaskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu – Bulletin of the Cherkasy State Technological University*, (4), 77–87. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2022.265832>.

18. Ushchapovskyi, D. Yu., Linyuchev, O. G., Motroniuk, T. I., Linyucheva, O. V., Bilchenko, O. Yu. (2019). Background technology for purification of polluted aquatic environment and regeneration of concentrated waste nitrate-chloride-sulfate industrial solutions. *KPI Science News*, 5-6, 95-101. <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2019.5-6.188444>.

19. Pravda, A. O. (2016). *Fiziko-khimicheskie zakonomernosti vliianiia dobavok razlichnoi prirody na razriad-ionizatsiiu medi v nizkokontsentryrovannykh nitratnykh rastvorakh [Physico-chemical regularities of the influence of additives of various nature on the discharge-ionization of copper in low-concentration nitrate solutions]* [PhD in Chemical Sciences, Kharkiv National University named after V. N. Karazin]. <https://core.ac.uk/download/pdf/154324054.pdf>.

20. Pravda, A. A., Radchenkova, A. P., Laryn, V. Y. (2008). Vliianie glitsina na protsess elektroosazhdeniia medi z nitratnoho elektrolitu [Influence of glycine on the processes of copper electroplating with the help of nitrate containing electrolyte]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu im. V. N. Karazina – Bulletin of Kharkiv National University named after V. N. Karazin*, 16(39), 353–356. <https://ekhnuir.karazin.ua/handle/123456789/3876>.

21. Motroniuk T. I. (1989). *Elektroosazhdenie medi iz skorostnykh nitratnykh elektrolitov [Electrodeposition of copper from high-speed nitrate electrolytes]*. [PhD Technical Sciences, Kyiv Polytechnic Institute].

22. Ménager, L., Soueidan, M., Allard, B., Bley, V., & Schlegel, B. (2010). A lab-scale alternative interconnection solution of semiconductor dice compatible with power modules 3-D integration. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(7), 1667-1670. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2041557>.

Отримано 22.04.2024

УДК 621.357

**Антоніна Вікторівна Плясовська<sup>1</sup>, Дмитро Юрійович Ущановський<sup>2</sup>,  
Ольга Володимирівна Лінючева<sup>3</sup>, Вікторія Іванівна Воробйова<sup>4</sup>,  
Тетяна Іванівна Мотронюк<sup>5</sup>, Георгій Степанович Васильєв<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>студентка кафедри технології електрохімічних виробництв  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
**E-mail:** [pliasovska.antonina@iit.kpi.ua](mailto:pliasovska.antonina@iit.kpi.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0002-4063-4246>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології електрохімічних виробництв  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
**E-mail:** [soldim@gmail.com](mailto:soldim@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2809-2774>

<sup>3</sup>доктор технічних наук, професор кафедри технології електрохімічних виробництв  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
**E-mail:** [olin@xtf.kpi.ua](mailto:olin@xtf.kpi.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4181-5946>

<sup>4</sup>доктор технічних наук, доцент кафедри фізичної хімії  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
**E-mail:** [vorobyovavika1988@gmail.com](mailto:vorobyovavika1988@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7479-9140>

<sup>5</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технології електрохімічних виробництв  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
**E-mail:** [t.motroniuk@gmail.com](mailto:t.motroniuk@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3717-5934>

<sup>6</sup>доктор технічних наук, доцент кафедри технології електрохімічних виробництв  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
**E-mail:** [g.vasyliiev@kpi.ua](mailto:g.vasyliiev@kpi.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4056-5551>

## **СТРУМОВИЙ РЕЖИМ ПРИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОМУ 3D-ДРУЦІ ВИРОБІВ ІЗ МІДІ**

Досліджено особливості використання нітратних електролітів міднення в системах локального електроосадження або електрохімічного 3D-друку. Запропоновано модель струмового режиму у електрохімічному 3D-друці, яка визначає його подібність до уніполярного імпульсного струмового режиму. Розраховані величини максимальної густини струму в імпульсі при електрохімічному 3D-друці, які відповідають значенням середньої швидкості осадження більшим за 0,5 А/дм<sup>2</sup>, перевищують значення граничних густин струму для стаціонарного процесу електроосадження

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

міді в досліджуваному нітратному електроліті. На основі порівняльного дослідження морфології поверхні мідних осадів, отриманих при електроосажденні з використанням імпульсного режиму електролізу в стаціонарній комірці та отриманих в комірці з обертовим анодом, показана можливість моделювання струмового режиму при електрохімічному 3D-друці за допомогою імпульсних програмнокерованих джерел струму. Встановлено, що добавки Rubip (KIESOW OBERFLÄCHENCHEMIE GmbH & Co) у сульфатному електроліті міднення зберігають блискоутворюючий ефект при використанні нестационарних режимів електролізу. Виявлено, що введення в нітратний електроліт міднення гліцину не пригнічує процес електровідновлення нітрат-іонів, оскільки вихід за струмом є таким же, як в базовому електроліті без добавки і становить близько 80 %. Забезпечення формування більш дрібнокристалічної структури осаду при введенні 0,5 М гліцину може бути пов'язане зі зв'язуванням в комплекс одновалентної міді. Показана можливість отримання електрохімічно надрукованих об'єктів з висотою профілю до 100 мкм із компактною дрібнокристалічною структурою металу за густини струму 2 А/дм<sup>2</sup> в нітратному електроліті міднення з вмістом нітрату міді 300 г/л та при одночасному введенні блискоутворюючих добавок Rubip та гліцину.

**Ключові слова:** мідь; локальне електроосаждення; електрохімічний 3D друк; нітратний електроліт; блискоутворюючі добавки; струмовий режим.

Рис.: 7. Табл.: 2. Бібл.: 22.

**Ірина Юрїївна Антонюк<sup>1</sup>, Анжеліка Олександрівна Медведєва<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри ресторанних і крафтових технологій  
Державний торговельно-економічний університет (Київ, Україна)

**E-mail:** [i.antonjuk@knu.edu.ua](mailto:i.antonjuk@knu.edu.ua). **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-4629-3403>. **ResearcherID:** [N-4736-2016](https://orcid.org/0000-0003-4629-3403)

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри ресторанних і крафтових технологій  
Державний торговельно-економічний університет (Київ, Україна)

**E-mail:** [a.medvedeva@knu.edu.ua](mailto:a.medvedeva@knu.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7991-9161>. **ResearcherID:** [N-4738-2016](https://orcid.org/0000-0002-7991-9161)

**ТЕХНОЛОГІЯ БЕЗГЛЮТЕНОВОГО ТІСТЕЧКА  
З ПІДВИЩЕНИМ ВМІСТОМ ЙОДУ**

*Розроблення технології безглютенового тістечка «Тасмнця ночі» з підвищеним вмістом органічного йоду дозволяє розширити асортимент борошняних кондитерських виробів покращеної харчової та біологічної цінності. За результатами досліджень доведено, що задоволення добової потреби в йоді та селені становить 26,7 та 30 % проти 2,0 та 12,0 % у контрольному зразку відповідно при споживанні 70 г виробу. Тістечко має високу органолептичну оцінку, підвищений вміст кальцію, калію та інших речовин, не містить глютену й речовин тваринного походження.*

**Ключові слова:** бісквітні вироби; йододефіцит; безглютенова продукція; цистозіра; апельсиново-абрикосовий мармелад; сироп топінамбура.

Табл.: 3. Рис.: 3. Бібл.: 26.

**Актуальність теми дослідження.** Зниження якості життя окремої людини та індексу здоров'я нації загалом при значному порушенні харчового статусу населення зумовлює необхідність створення харчових продуктів із підвищеним вмістом есенціальних нутрієнтів, збагачених харчовими волокнами, вітамінами й мінеральними речовинами.

Хлібобулочні та борошняні кондитерські вироби є невід'ємною частиною харчового раціону людей у більшості країн світу. Проте сьогодні спостерігається зростання захворювань, які пов'язані з непереносимістю окремих компонентів їжі (глютен, лактоза та інші), що змушує людей відмовлятися від споживання традиційних продуктів і шукати заміну. Непереносимість глютену – повна або часткова – призводить до суттєво порушення стану здоров'я і навіть, якщо особливих проблем у людини не спостерігається, споживати продукти, які містять глютен, слід помірно, оскільки глютен – це не розчинний у воді білок, і при його частому вживанні може спостерігатися погіршення роботи шлунково-кишкового тракту.

Результати досліджень свідчать, що 1 % населення на планеті страждає на повну інтолерантність до глютену, а це близько 70 млн, в Україні виявлено таких випадків 450 тис., хоча ці дані не можна вважати повними, оскільки багато людей не знають, що мають часткову непереносимість глютену [1].

Єдиним вирішенням проблем, пов'язаних із непереносимістю глютену, є виключення з раціону харчових продуктів, які містять цю речовину, і заміна такої продукції та безглютенову. Дотримання таких вимог і обмежень у харчуванні є довічним для людини.

Також серед проблем, пов'язаних із харчуванням, можна відмітити недостатню кількість вживання мінеральних речовин, що призводить до зростання так званих екологозалежних захворювань, серед яких проблема йододефіциту посідає одне з перших місць [2].

Тому дослідження, спрямовані на розроблення безглютенової продукції, зокрема борошняних кондитерських виробів із підвищеним вмістом йоду є актуальними.

**Постановка проблеми.** Борошняні кондитерські вироби на основі бісквітного тіста мають високий попит серед різних верств населення. Проте відомо, що ці вироби готуються на основі пшеничного борошна, містять велику кількість цукру та яєць. Розширення асортименту виробів, які не містять глютену й цукру (так званих «швидких» вуглеводів), а також із підвищеним вмістом мінеральних речовин, зокрема органічного йоду та селену, на сьогодні залишається невирішеною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Асортимент кондитерської продукції дуже різноманітний і технологія кожної групи істотно відрізняється за якістю використаної сировини, устаткуванням, технологічними процесами тощо. Проблеми удосконалення технології безглютенових борошняних виробів присвячені роботи багатьох вітчизняних і закордонних учених, зокрема А. М. Дорохович, В. І. Дробот, О. А. Кузнецової, О. М. Шаніної, MichukiFucasa (Японія), N. Aguilar, R. Mozeizor, Elka K. Azendt (Швейцарія) та ін. [3].

Проблемі покращення якості, інтенсифікації та стабілізації технологічних процесів отримання кондитерської та десертної продукції з пінною структурою, зокрема бісквітного напівфабрикату, присвячено роботи А. Б. Горальчука, К. Г. Іоргачової, В. І. Оболкіної, Г. М. Лисюк, В. В. Дорохович, В. І. Дробот, Н. І. Черевичної, Н. Kaiser, Н.-G. Ludewig, С. Я. Корячкіної, І.В. Матвєєвої, NarpinderSingh [4].

У проведених, науковцями В. О. Савенко і В. М. Шелудько дослідженнях обґрунтовано використання амарантового борошна та подрібненого насіння льону в технології бісквітних виробів. Доведено, що введення до 12 % насіння льону підвищує поруватість бісквітних виробів на 25,7 %, а при дозуванні до 16% спостерігається покращення органолептичних і фізико-хімічних показників готових виробів [5].

Також цікавими виявилися результати досліджень А.П. Рогової, які були спрямовані на підвищення біологічної цінності бісквітних виробів, у т. ч. масляного бісквіта завдяки використанню борошна з нуту. Встановлено, що збагачення бісквіта борошном з нуту, дозволяє отримати готові вироби підвищеної поживної цінності [6; 7]. Позитивний вплив нутового борошна на якість бісквітів відзначено в роботах А. В. Вакуленко, М. В. Діденко [8; 9]. Таким чином, можна вважати нутове борошно перспективною сировиною у виробництві борошняних кондитерських виробів, зокрема бісквітів.

В. Т. Лебединець зі співавторами розробили рецептуру бісквітного напівфабрикату, збагаченого борошном нішевих культур (спельтовим, конопляним і нутовим), яке характеризується високим вмістом нутрієнтів. Рекомендовано до впровадження у виробництві бісквітного напівфабрикату суміш, яка містить 75 % борошна пшеничного, 25 % – конопляного. Доведено, що такий бісквіт можна віднести до категорії продуктів оздоровчо-профілактичного призначення [10].

Розроблено безглютенове печиво з використанням борошна маніоку, рисового борошна, екструдованого соєвого білка (ESP) та гарбузового порошку. Чотири рівні ESP використовувалися для виробництва печива: 5, 10, 15 та 20 %. Зразок печива з 20 % ESP мав найвищий вміст білка, жиру, золи та клітковини, але найнижчий загальний вміст вуглеводів. Також у зразках печива збільшився вміст  $\beta$ -каротину та вітаміну А. Калорійність печива в усіх зразках була нижчою за контроль. Сенсорна оцінка печива показала, що додавання ESP на рівні 20 % значно знизило оцінку текстури з 9,51 до 6,61 ( $P < 0,05$ ), але несуттєво вплинуло на інші сенсорні оцінки [11].

Проведено дослідження щодо пошуку оптимальних співвідношень для борошняних кондитерських виробів на основі різних видів борошна та інших компонентів, які не містять глютену [12–15].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Попри велику кількість досліджень, проведених у напрямі розробки технологій оздоровчої харчової продукції, робота триває, оскільки з'являється нова сировина та суміші, нові харчові добавки, поліпшувачі, структуроутворювачі, що потребує наукового підходу щодо можливості їх використання в технології харчової продукції, зокрема борошняних кондитерських виробів. Також слід зазначити, що системні дослідження, спрямовані на одержання безглютенових борошняних кондитерських виробів із використанням рослинної сировини та природного органічного йоду, відсутні.

**Метою статті** є розроблення технології та дослідження харчової і біологічної цінності безглютенового тістечка з підвищеним вмістом йоду.

**Виклад основного матеріалу.**

*Методи.* У роботі використовувалися сучасні та стандартні методи досліджень, які дозволили визначити технологічні, хімічні властивості добавок, сировини та готових виробів. Повторність дослідів – п'ятикратна, аналізів – трикратна. Отримані експериментальні дані подано в одиницях міжнародної системи SI.

Для об'єктивного визначення раціональної кількості добавок визначали зміни комплексного показника якості (Кпя) залежно від кількості добавок за допомогою системи рівнянь. Визначали коефіцієнт, при якому досягається максимальне значення Кпя, визначали похідну, прирівнювали її нулеві, розв'язуючи рівняння, визначали раціональну кількість добавок.

Вміст мінеральних речовин визначено атомно-абсорбційним методом на спектрофотометрі Techtron-AA-4 (Австрія) [16], амінокислот – за S. Moore і W. Stein у модифікації Н. Н. Алахова, К. В. Єгорова і М. І. Решетова на аміноаналізаторі Biotronik-5001 (ФРН) [17]; білків – розрахунково (для готових виробів); визначення водорозчинних вітамінів – методом високоефективної рідинної хроматографії [18]; вітамінів А і Е, вуглеводів і жирів – розрахунково [19].

*Предмет дослідження:* горох нут (Нут. Технічні умови. ДСТУ 6019:2008), сироп топінамбура (ТУ У 10.8-2575611254-002.2020), кокосове масло (ДСТУ 4562:2006), мигдаль (ГОСТ 16831-71. Ядро мигдалю солодкого), какао-порошок (ДСТУ 4391:2005), дієтична добавка «Цистозіра» (ТУ У 21663408.001–2006), мармелад апельсиновий (ДСТУ 4333:2018. Мармелад. Загальні технічні вимоги), тістечко «Картопля», мармелад абрикосо-апельсиновий, тістечко «Таємниця ночі».

За контрольний зразок було обрано тістечко «Картопля», яке належить до крихтових бісквітних виробів. Для виготовлення цих виробів використовується крихта бісквітного напівфабрикату, приготовленого за класичною рецептурою, і потім обсмаженого при температурі 220-230 °С, і крихтовий напівфабрикат «Дачний». Тістечка виготовляються у вигляді картоплі, яблука і бочонка, глазурованого помадою, також можуть бути виготовлені у вигляді прямокутних смужок із кремом і рулету. Для подальших досліджень було обрано рецептуру класичного тістечка «Картопля» [20].

Класичне тістечко складається з крихти бісквіта, перемішаної з вершковим кремом, має форму кулі. Зверху посипається порошком какао, змішаним з цукровою пудрою. Також тістечко може бути фаршировано вершковим кремом. Саме такий варіант і було обрано за контрольний зразок.

Оскільки, одним із завдань дослідження було створення безглютенового виробу, на початку досліджено хімічний склад харчових продуктів, які належать до безглютенових і можуть бути використані при створенні основи для тістечка.

За результатами аналізу літературних даних щодо хімічного складу безглютенових видів сировини [19], яку можна використовувати у виробництві борошняних кондитерських виробів, зокрема, бісквітних, для подальших досліджень як сировини було обрано нут і мигдаль. Вибір цих видів сировини можна пояснити їх хімічним складом. Нут має високий вміст вітамінів і мінеральних речовин і водночас низький глікемічний індекс, тому включення нуту в раціон харчування сприяє регулюванню рівня цукру в крові [21]. Мигдаль особливо цінна горіхоплідна культура, яка має високі поживні, смакові та цілющі властивості, широко використовується у виробництві харчової продукції [22].

Відомо, що бобові, зокрема нут, мають злегка специфічний запах. Тому з метою його нівелювання було вирішено використати банани, які дозволяють зменшити специфічний запах і водночас підвищити вміст корисних речовин (вітаміни, органічні кислоти) [23].

Для підвищення вмісту йоду та селену з метою профілактики йододефіцитних захворювань було використано порошок морської водорості цистозіри, яка містить 28 мікро- і макроелементів, насамперед усі 15 незамінних: залізо, цинк, магній, мідь, марганець, хром, селен, літій, кобальт тощо, що зумовлюють її широке використання для збагачення традиційних харчових продуктів. Цистозіра також містить широкий спектр водорозчинних вітамінів: В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, В<sub>3</sub>, В<sub>9</sub>, В<sub>12</sub>, С, F [2; 24].

На підставі результатів проведених технологічних проробок було розроблено технологію основи для тістечка. Нут замочували на 10-12 годин і відварювали до готовності. Охолоджували, викладали в блендер, додавали банани, сироп топінамбура, кокосове масло кімнатної температури та збивали до однорідної консистенції. Отриману масу викладали в ємкість, додавали подрібнений в крихту і змішаний із цистозірою мигдаль і ретельно перемішували. Додавання цистозіри разом із подрібненим мигдалем дозволяє рівномірно розподілити добавку по основі тістечка, а відсутність подальшої теплової обробки сприяє максимальному збереженню йоду (який швидко руйнується під дією високих температур). За результатами проведених досліджень доведено, що раціональна кількість добавки становить 0,7 % на 100 г виробу.

Замість вершкового крему було вирішено начинити тістечко мармеладом, що зробить виріб більш корисним і дозволить підвищити вміст вітамінів. Розроблено технологію мармеладу, який буде використано для начинки, тобто мармелад у вигляді кубика або кульки поміщається всередину виробу. Виготовляли мармелад з апельсинового соку, із суміші апельсинового соку й абрикосового пюре, а також із суміші апельсинового соку й пюре гарбуза. Усі три зразки виявилися придатними для подальшого використання та мали високу органолептичну оцінку. Для подальших досліджень було обрано мармелад з апельсинового соку й абрикосового пюре.

Технологія абрикосово-апельсинового мармеладу передбачає наступні технологічні етапи: в сотейнику з'єднували абрикосове пюре і апельсиновий сік у рівних співвідношеннях, агар-агар і воду (співвідношення агар-агару і води 1:2 або 1:3) і все ретельно перемішували вінчиком, доводили до кипіння і варили 2-3 хвилини, знімали сотейник з вогню і розливали мармелад у форми, охолоджували, після застигання мармелад виймали з форми й використовували за призначенням. Краще використовувати свіжовичавлений апельсиновий сік; абрикоси можна замінити курагою і зробити пюре саме з кураги.

Як контрольний зразок використано мармелад, який виготовляється з апельсинового соку з додаванням цукру за ДСТУ 4333:2018. Органолептична оцінка абрикосово-апельсинового мармеладу наведена в табл. 1.

Таблиця 1 – Органолептична оцінка мармеладу

Показник	Контрольний зразок (апельсиновий)	Дослідний зразок (абрикосово-апельсиновий)
Смак	Притаманний апельсину, без стороннього, солодкий	Притаманний абрикосу та апельсину, без стороннього, помірно солодкуватий
Запах	Притаманний апельсину, без стороннього, приємний	Притаманний абрикосу та апельсину, без стороннього, приємний
Колір	Жовтий	Від жовтого до жовто-оранжевого (залежно від сорту абрикосів)
Консистенція	Гелеподібна	Гелеподібна, ніжна
Форма	Правильна, з чітким контуром, без деформацій	
Поверхня	Має тонкокристалічну кірочку, обсипана цукром	Гладка, структурована

Джерело: розроблено авторами.

Зовнішній вигляд основи тістечка та абрикосово-апельсинового мармеладу наведено на рис. 1.





а



б

Рис. 1. Безглютенова основа з нуту та абрикосово-апельсиновий мармелад:  
а – безглютенова основа тістечка з нуту; б – абрикосово-апельсиновий мармелад  
Джерело: розроблено авторами.

Формували вироби у вигляді кульки, всередину викладали абрикосово-апельсиновий мармелад і обкачували в какао-порошку. Викладали на пергамент і ставили в холодильну камеру на 1 годину. При подачі можна прикрасити гілочкою м'яти (рис. 2).



Рис.2. Безглютенове тістечко з абрикосово-апельсиновим мармеладом  
Джерело: розроблено авторами.

З метою більш детальної органолептичної оцінки було вирішено провести органолептичну оцінку виробу за розробленими показниками й побудувати профіль якості (рис. 3)[25].



Рис.3. Профіль якості безглютенового тістечка з підвищеним вмістом йоду  
а – пунктирна лінія – контрольний зразок; б – суцільна лінія – дослідний зразок  
Джерело: розроблено авторами.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Органолептична оцінка безглютенового тістечка з підвищеним вмістом йоду та селену наведена в табл. 2.

Таблиця 2 – Органолептична оцінка безглютенового тістечка з підвищеним вмістом йоду

Показник	Контрольний зразок	Дослідний зразок
Смак	Приємний смак шоколаду, без стороннього присмаку, солодкий	Основа тістечка: приємний смак мигдального горіха, відчувається присмак банана та шоколаду, помірно солодкий. Начинка (мармелад): солодкувато-кислуватий, відчувається смак апельсина та абрикосу, без сторонніх присмаків
Запах	Притаманний шоколаду, злегка горіховий, без сторонніх присмаків і запахів	Основа тістечка: горіховий, з ароматом мигдалю і бананів, без сторонніх присмаків і запахів; запах водоростей не відчувається. Начинка (мармелад): аромат абрикосів, без сторонніх присмаків і запахів
Колір	Коричневий	Основа тістечка: поверхні – коричневий, на розрізі – світло-коричневий, жовтуватий. Начинка (мармелад): від жовтого до жовто-оранжевого.
Зовнішній вигляд і форма	Виріб має круглу або продовгувато-приплюснуту форму, що нагадує форму картоплі.	Виріб має круглу форму
Поверхня	Обсипана какао-порошком, змішаним із цукровою пудрою, без вм'ятин і тріщин	Обсипаний какао-порошком, без вм'ятин і тріщин
Вигляд на розрізі	Однорідна маса коричневого кольору	Однорідна маса світло-коричневого, жовтуватого кольору, з чітко вираженим кубиком мармеладу
Консистенція	Міцна	Ніжна, однорідна

Джерело: розроблено авторами.

Готовий виріб на одну порцію (70 г) складається з основи – 54 г та мармеладу – 16 г. Хімічний склад та енергетична цінність контрольного й дослідного зразків, а також задоволення добової потреби наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Хімічний склад, енергетична цінність та задоволення добової потреби контрольного та розробленого зразків (на 70 г)

Нутрієнти	Вміст у виробі		Відхилення дослід/контроль, %	Добова потреба (жінки) [26]	Задоволення добової потреби, %	
	конт- роль	дослід			контроль	дослід
Білки, г	3,5	4,3	22,8	66	5,3	6,5
Жири, г	11,4	8,8	-22,8	70	16,3	12,6
Вуглеводи, г	10,5	12,4	18,1	326	3,22	3,8
Харчові волокна, г	0,3	1,8	у 6 разів	38	0,8	4,7
Енергетична цінність, ккал	151	146	-3,3	2200	6,86	6,63
<i>Вітаміни</i>						
В <sub>1</sub> , мг	0,01	0,03	у 3 рази	1,3	0,76	2,3
Е, мг	0,35	2,6	у 7,4 рази	15	2,3	17,3
А (β-каротин) мг	0,2	0,42	у 2,1 рази	0,7	28,6	60,0
<i>Мінеральні речовини</i>						
Калій, мг	71	285	у 4 рази	1920	3,70	14,8
Кальцій, мг	30	64	у 2,1 рази	1100	2,73	5,82
Магній, мг	6	45	у 7,5 рази	500	1,2	9,0
Фосфор, мг	53	120	у 2,2 рази	1500	3,53	8,0
Ферум, мг	0,5	1,2	у 2,4 рази	17	2,9	7,06
Йод, мкг	3	40	у 13,3 рази	150	2,0	26,7
Селен, мкг	6	15	у 2,5 рази	50	12,0	30,0

На основі всіх результатів проведених досліджень і встановлених показників якості розробленого тістечка «Таємниця ночі» можна зробити висновок, що запропонований виріб сприяє покращенню задоволення добової потреби людини в мінеральних речовинах, особливу в йоді та селені: дослідний зразок – 26,7 та 30,0 %, контрольний зразок – 2,0 та 12,0% відповідно.

**Висновки.** На підставі проведених досліджень, можна зробити висновок, що тістечко «Таємниця ночі» з покращеним нутрієнтним складом має високу органолептичну оцінку, підвищений вміст йоду, селену, кальцію, калію та інших речовин, порівняно із виробом традиційного виробництва, також не містить речовин тваринного походження і цукру. І це дає можливість використовувати розроблений виріб як додаткове джерело йоду та селену із метою профілактики виникнення або пом'якшення перебігу хвороб при йодозалежних захворюваннях, а також рекомендувати споживачам, які страждають на інтолерантність (повну або часткову) до глютену, не вживають продуктів тваринного походження, та для тих, хто слідкує за своїм здоров'ям, намагаючись знизити споживання цукру.

### Список використаних джерел

1. Сорочинська, Ю. С. Удосконалення технології безглютенового хліба з використанням борошна з зерна сорго : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.01 «Технологія хлібопекарських продуктів, кондитерських виробів та харчових концентратів» / Юлія Сергіївна Сорочинська ; Нац. ун-т харч. технол. – Київ, 2021. – 22 с.
2. Корзун, В. Н. Екологія і захворювання щитоподібної залози : монографія / В. Н. Корзун, Т. О. Воронцова, І. Ю. Антонюк. – 2-ге вид-ня, допов. і перероб. ; за заг. ред. д-ра мед. наук, проф. В. Н. Корзуна. – Київ : Кафедра, 2020. – 740 с.
3. Лобачова, Н. Л. Удосконалення технології безглютенових хлібобулочних виробів : монографія / Н. Л. Лобачова. – Суми : Сумський національний аграрний університет, 2015. – 214 с.
4. Лісовська, Т. О. Технологія бісквітного напівфабрикату з використанням борошна кукурудзяного: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.16 / Лісовська Тетяна Олегівна ; ХДУХТ. – Харків, 2018. 306 с.
5. Савенко, В. О. Використання борошна амаранту в технології бісквітних виробів [Електронний ресурс] / В. О. Савенко, В. М. Шелудько // Наука і молодь в ХХІ сторіччі : зб. тез доповідей III Міжнар. молодіжної наук.-практ. інтернет-конф., 1 грудня 2017 р. – Полтава : ПУЕТ, 2017. – С. 636–639. – Режим доступу: <http://dspace.puet.edu.ua/bitstream/123456789/9985/1/Савенко%20В.О..pdf>.
6. Рогова, А. Л. Підвищення біологічної цінності бісквітних виробів за рахунок використання борошна з нуту / А. Л. Рогова, Ю. О. Положишников // Харчові добавки. Харчування здорової та хворої людини: матер. Міжнар. наук.-практ. конф. Дон НУЕТ, 7–9 квітня, 2011. – Донецьк, 2011. – С. 151–153.
7. Рогова, А. Л. Вплив борошна з нуту на поживну цінність виробів із масляного бісквіта [Електронний ресурс] / А. Л. Рогова, Л. О. Положишнікова // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. – 2013. – Вип. 1(2). – С. 134-141. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt\\_2013\\_1\(2\)\\_23](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2013_1(2)_23).
8. Вакуленко, А. В. Борошно нутове – основа кондитерських виробів / А. В. Вакуленко // Проблеми формування здорового способу життя у молоді: зб. Матеріалів XIV Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених та студентів з міжнародною участю, 7–9 жовтня 2021 р. – Одеса : ОНАХТ, 2021. – С. 68-69.
9. Діденко, М. В. Дослідження показників насіння нуту для виробництва функціональних продуктів / М. В. Діденко // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті : матеріали 87 Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 15-16 квітня 2021 р. – Київ: НУХТ, 2021. – Ч. 1. – С. 149.
10. Розширення асортименту безглютенових бісквітних напівфабрикатів / В. Т. Лебединець, І. В. Донцова, В.В. Гаврилишин, А. І. Лебединець // Вісник ЛТЕУ. Технічні науки. – 2021. – Вип. 25. – С. 52-59.
11. Mona M. A. Aly. Gluten-free flat bread and biscuits production by cassava, extruded soy protein and pumpkin powder / Mona M. A. Aly, Hinar A. Seleem // Food and Nutrition Sciences. – 2015. – Vol. 6. – Pp. 660-674. DOI: 10.4236/fns.2015.67069.

12. Mancebo Camino M. Assessing rice flour-starch-protein mixtures to produce gluten free sugar-snap cookies / Mancebo Camino M., Rodriguez Patricia, Gomez Manuel // LWT-Food Science and Technology. – 2018. – Vol. 67. – Pp. 127-132.
13. Šarić, G. Possible applications of brewer's spent grain in the production of bread and pastry / G. Šarić // 12th Croatian Congress of Cereal Technologists "Brašno-Kruh '19". – Croatia, Osijek, 2020. – Pp. 65-76.
14. Ekmekcioglu, C. Nutrition and longevity – from mechanisms to uncertainties / C. Ekmekcioglu // Crit Rev Food Sci Nutr. – 2020. – № 60. – Pp. 3063-3082.
15. Yudina, T. I. Gluten-free cakes with cereal flour / T. I. Yudina, O. M. Bezruchenko, O. V. Aharova // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. пр. – 2020. – Вип. 40(1). – С. 19-25.
16. Tomcik, P. Voltammetric determination of iodide by use of an investigated microelectrode array. Fresenius / P. Tomcik, D. Bustin // J. Anal. Chem. – 2001. – Vol. 371. – Pp. 362-364.
17. Визначення амінокислот методом тонкошарової хроматографії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.biochemistry-dnu.dp.ua/wp-content/downloads/metodichki/dyomshina-aminoacid-analys-metod2005.pdf>.
18. Скарвінко, Т. Визначення вітамінів у продуктах харчування та комбікормах для тварин [Електронний ресурс] / Тетяна Скарвінко. – 2022. – Режим доступу: <https://alt.ua/blog/viznachennya-vitaminiv-u-produktah-ta-kombikormah>.
19. Харчова хімія: аналіз та хімічний склад харчових продуктів / В. О. Василечко, Я. Ф. Ломницька, Я. П. Скоробогатий, М. В. Бужанська. – Львів: Вид-во Львів. торг.-екон. ун-ту, 2020. – 306 с.
20. Павлов, О. В. Збірник рецептур борошняних кондитерських і здобних булочних виробів : навчально-практичний посібник / О. В. Павлов. – 2-ге видання, доповнене. – Київ : Проф-Книга, 2019. – 340 с.
21. Користь нуту: 5 вагомих причин включити його в раціон [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://lhealth.info/11490/koryst-nutu-5-vahomykh-prychyn-vkliuchytu-joho-v-ratsion>.
22. Пулатова, К. 6 корисних властивостей мигдалю для здоров'я: чому варто їсти горіх частіше [Електронний ресурс] / Катерина Пулатова. – 2023. – Режим доступу: <https://www.unian.ua/health/chem-polezen-mindal-6-poleznyh-svoystv-dlya-zdorovya-12146628.html>.
23. Користь бананів: ТОП причин їсти банани регулярно [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://blog.tablyscakalorijnosti.com.ua/koryst-bananiv-top-prychyn-yisty-banany-regulyarno>.
24. Цистозіра водорість корисні властивості [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://intertoolwest.com.ua/?p=12396>.
25. Корецька, І. Л. Оцінювання нових харчових виробів за допомогою критерію «Багатокутник якості» / І. Л. Корецька, Т. В. Зінченко // Наукові праці НУХТ. – 2003. – № 14. – С. 64-65.
26. Про затвердження Норм фізіологічних потреб населення України в основних харчових речовинах і енергії [Електронний ресурс] : Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 03.09.2017 № 1073. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1206-17>.

### References

1. Sorochynska, Yu.S. (2021). *Udoskonalennia tekhnologii bezgliutenovoho khliba z vykorystanniam boroshna z zerna sorho [Improvement of gluten-free bread technology using sorghum grain flour]*. [PhD dissertation; Kyiv National University of food technology].
2. Korzun, V.N., Vorontsova, T.O., & Antoniuk, I.Yu. (2020). *Ekolohiia i zakhvoriuvannia shchytovidnoi zalozy [Ecology and diseases of the thyroid gland]*. Kafedra.
3. Lobacheva, N.L. (2015). *Udoskonalennia tekhnologii bezgliutenovy khkhlilibobulochnykh vyrobiv [Improving the technology of gluten-free bakery products]*. Sumy National Agrarian University.
4. Lisovska, T.O. (2018). *Tekhnolohiia biskvitnoho napivfabrykatu z vykorystanniam boroshna kukurudzianoho [Semi-finished biscuit technology using corn flour]*. [PhD dissertation; KhDUKHT].
5. Savenko, V.O., & Sheludko, V.M. (2017). *Vykorystannia boroshna amarantu v tekhnologii biskvitnykh vyrobiv [Use of amaranth flour in the technology of biscuit products]*. *Naukaimolod v XXI storichchi: zbirnyk tezdpovidey III Mizhnarodnoyi molodizhnoyinaukovo-praktychnoyi internet-konferentsiyi – Science and youth in the 21st century: a collection of abstracts of the 3rd International Youth Scientific and Practical Internet Conference* (pp. 636-639). PUET.

6. Rohova, A.L., & Polozhysnykovk, Yu.O. (2011). Pidvyshchennia biologichnoi tsinnosti biskvitnykh vyrobiv zarahunok vykorystannia boroshna z nutu [Increasing the biological value of biscuit products due to the use of chickpea flour]. *Kharchovi dobavky. Kharchuvannia zdorovoi ta khvoroi liudyny – Food supplements. Nutrition of a healthy and sick person: International science and practice conf.* (pp. 151-153). NUET.

7. Rohova, A.L., & Polozhysnykova, L.O. (2013). Vplyv boroshna z nutu na pozhyvnu tsinnist vyrobiv iz maslianoho biskvita [The influence of chickpea flour on the nutritional value of butter biscuit products]. *Prohresyvnitekhnikatatekhnolohiikharchovykhvyrobnystvrestorannohohospodarstva i torhivli – Progressive technology and food production technologies of the restaurant industry and trade, 1(2)*, 134-141. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt\\_2013\\_1\(2\)\\_23](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2013_1(2)_23).

8. Vakulenko, A.V. (2021). Boroshno nutove – osnova kondyterskykh vyrobiv [Chickpea flour is the basis of confectionery products]. *Problemy formuvannia zdorovoho sposobu zhyttia u molodi – Problems of forming a healthy lifestyle among young people: XIV All-Ukrainian science and practice conf.* (pp. 68–69). ONAKHT.

9. Didenko, M.V. (2021). Doslidzhennia pokaznykiv nasinnia nutu dlia vyrobnytstva funktsionalnykh produktiv [Study of indicators of chickpea seeds for the production of functional products]. *Naukovi zdobutky molodi – vyrishenniu problem kharchuvannia liudstva u XXI stolitti – Scientific achievements of youth - solving the problems of human nutrition in the 21st century: the 87th International scientific conference* (vol. 1). p. 149. NUHT.

10. Lebedynets, V.T., Dontsova, I.V., Havrylyshyn, V.V., & Lebedynets, A.I. (2021). Rozshyrennia asortymentu bezghliutenovykh biskvitnykh napivfabrykativ [Expanding the assortment of gluten-free biscuit semi-finished products]. *Visnyk LTEU. Tekhnichninauky – Bulletin of LTEU. Technical sciences, 25*, 52–59.

11. Mona M. A. Aly, & Hinar A. Seleem. (2015). Gluten-free flat bread and biscuits production by cassava, extruded soy protein and pumpkin powder. *Food Nutr. Sci.*, 6, 660-674. DOI: 10.4236/fns.2015.67069.

12. Mancebo Camino M., Rodriguez Patricia, & Gomez Manuel. (2018). Assessing rice flour-starch-protein mixtures to produce gluten free sugar-snap cookies [Assessing rice flour-starch-protein mixtures to produce gluten free sugar-snap cookies]. *LWT-Food Science and Technology*, 67, 127-132.

13. Šarić, G. (2020). Possible applications of brewer's spent grain in the production of bread and pastry. *12th Croatian Congress of Cereal Technologists "Brašno-Kruh '19"*. (pp. 65-76). Osijek.

14. Ekmekcioglu, C. (2020). Nutrition and longevity – from mechanisms to uncertainties. *Crit Rev Food Sci Nutr.*, 60, 3063-3082.

15. Yudina, T.I., Vezruchenko, O.M., & Ahapova, O.V. (2020). Gluten-free cakes with cereal flour. *Obladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv – Equipment and technologies of food production, 40(1)*, 19-25.

16. Tomcik, P., & Bustin, D. (2001). Voltammetric determination of iodide by use of aninvestigated microelectrode array. *Fresenius. J. Anal. Chem.*, 371, 362-364.

17. Vyznachennia aminokyslot metodom tonkosharvoi khromatohrafii. [Determination of amino acids by the method of thin-layer chromatography]. (n.d.). <https://www.biochemistry-dnu.dp.ua/wp-content/downloads/metodichki/dyomshina-aminoacid-analys-metod2005.pdf>

18. Skarvinko, T. (2022). Vyznachennia vitaminiv u produktakh kharchuvannia ta kombikormakh dlia tvaryn [Determination of vitamins in food products and compound feed for animals]. (n.d.). <https://alt.ua/blog/viznachennya-vitaminiv-u-produktah-ta-kombikormah>.

19. Vasylechko, V.O., Lomnytska, Ya.F., Skorobohaty, Ya.P., & Buzhanska, M.V. (2020). *Kharchova khimiia: analiz ta khimichni sklad kharchovykh produktiv [Food chemistry: analysis and chemical composition of food products]*. Lviv : Lviv Trade and Economy University.

20. Pavlov, O.V. (2019). *Zbirnyk retseptur boroshnianskykh kondyterskykh i zdobnykh bulochnykh vyrobiv [Collection of recipes for flour confectionery and butter bakery products]*. 2<sup>nd</sup> edition, supplemented. ProfKnyga.

21. Koryst nutu: 5 vahomykh prychny vkliuchyty yoho v ratsion [Benefitsofchickpeas: 5 good reasons to includetheminthe diet]. (2021). <https://lhealth.info/11490/koryst-nutu-5-vahomykh-prychyn-vkliuchyty-joho-v-ratsion>.

22. Pulatova, K. (2023). 6 korysnykh vlastyvostei myhdaliu dlia zdorovia: chomu varto yisty horikh chastishe [6 useful propertiesof almonds for health: why you should eat the nut more often]. (n.d.). <https://www.unian.ua/health/chem-polezen-mindal-6-poleznyh-svoystv-dlya-zdorovyva-12146628.html>.

23. Koryst bananiv: TOP prychny isty banany rehuliarno [Benefits of bananas: TOP reasons to eat bananas regularly]. (2023). <https://blog.tablycjakalorijnosti.com.ua/koryst-bananiv-top-prychyn-yisty-banany-regulyarno>.

24. Tsystozira vodorist korisni vlastyvoli [Cystosira algae useful properties]. (n.d.). <https://inter-toolwest.com.ua/?p=12396>.

25. Koretska, I.L., & Zinchenko, T.V. (2003). Otsiniuvannia novykh kharchovykh vyrobiv za dopomohoiu kryteriiu «Bahatokutnyk yakosti» [Evaluation of new food products using the "Quality Polygon" criterion]. *NaukovipratsiNUKhT – Scientific works of NUHT, 14*, 64-65.

26. Pro zatverdzhennia Norm fiziolohichnykh potreb naselennia Ukrainy v osnovnykh kharchovykh rehovynakh i enerhii. Ministerstvo okhorony zdorovia Ukrainy [On the approval of the norms of physiological needs of the population of Ukraine in basic food substances and energy. Ministry of Health of Ukraine]. Order of the Ministry of Health of Ukraine dated September 3, 2017 № 1073. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1206-17>.

Отримано 10.06.2024

UDC 664.665:613.2

**Iryna Antonyuk<sup>1</sup>, Anzhelika Medvedieva<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Restaurant and Craft Technologies  
State University of Trade and Economics (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [i.antonyuk@knote.edu.ua](mailto:i.antonyuk@knote.edu.ua). **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-4629-3403>. **ResearcherID:** [N-4736-2016](https://orcid.org/0000-0003-4629-3403)

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Restaurant and Craft Technologies  
State University of Trade and Economics (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [a.medvedeva@knote.edu.ua](mailto:a.medvedeva@knote.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7991-9161>. **ResearcherID:** [N-4738-2016](https://orcid.org/0000-0002-7991-9161)

## TECHNOLOGY OF GLUTEN-FREE CAKE WITH INCREASED IODINE CONTENT

*Deterioration of the quality of food diets of people all over the world, a significant decrease in the supply of essential food components, in particular trace elements, dietary fibers, as well as the growth of allergic diseases and diseases associated with intolerance to certain food components (gluten, lactose), require the development of new generation food products, which are able to provide the body with the necessary substances and at the same time take into account the nutritional status of a person.*

*Flour confectionery products based on biscuit dough are very popular among different segments of the population. However, it is known that these products are prepared on the basis of wheat flour, contain a large amount of sugar and eggs. Expanding the assortment of products that do not contain gluten and sugar (so-called "fast" carbohydrates), as well as with an increased content of minerals, in particular, organic iodine and selenium, remains unresolved today.*

*The purpose of the article is to develop a technology and research the nutritional and biological value of a gluten-free cake with an increased content of iodine.*

*Based on the results of technological studies, the technology of the basis for the cake was developed. Chickpeas were soaked for 10-12 hours and boiled until ready. Then cooled, put in a blender, there were added bananas, Jerusalem artichoke syrup, coconut oil at room temperature and blended until smooth. The obtained mass was placed in a container, almonds crushed into crumbs and mixed with cystosira were added and mixed thoroughly.*

*Instead of cream, it was decided to fill the cake with marmalade, which will make the product more useful and increase the vitamin content. The technology of marmalade, which will be used for filling, has been developed, that is, marmalade in the form of a cube or ball is placed in the middle of the product. Apricot-orange marmalade technology involves the following technological stages: in a saucepan, apricot puree and orange juice were combined in equal proportions, agar-agar and water (the ratio of agar-agar and water is 1:2 or 1:3) and everything was thoroughly mixed with a whisk, brought to a boil and boiled for 2-3 minutes, the saucepan was removed from the heat and the marmalade was poured into molds, cooled, after the marmalade had hardened, it was removed from the mold and used as intended. It is better to use freshly squeezed orange juice; apricots can be replaced with dried apricots and puree made from dried apricots.*

*The development of the technology of the gluten-free cake "Secret of the Night" with an increased content of organic iodine allows to expand the range of products with improved nutritional and biological value. According to the results of research, it has been proven that the content of dietary fiber has increased by 6 times; satisfaction of the daily need for iodine and selenium is 26.7 and 30 % against 2.0 and 12.0 % in the control sample, respectively, when consuming 70 g of cake. Based on the conducted research, it can be concluded that the "Secret of the Night" cake has a high organoleptic rating, the increased content of calcium, potassium and other substances, compared to the product of traditional production, also does not contain gluten and substances of animal origin. And this makes it possible to use the developed product as an additional source of iodine and selenium for the purpose of preventing the occurrence or mitigating the course of diseases in iodine-dependent diseases, as well as recommending to consumers who suffer from gluten intolerance, do not consume animal products, and for those who watches his health, trying to reduce sugar consumption.*

**Keywords:** biscuit products; iodine deficiency; gluten-free products; cystosira; orange-apricot marmalade; Jerusalem artichoke syrup.

Table: 3. Fig: 3. References: 26.

**Олександр Володимирович Фандєєв<sup>1</sup>, Олексій Юрійович Полоз<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>магістрант кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів  
Український державний університет науки і технологій.

Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)  
**E-mail:** [sanyuyfandeev1991@gmail.com](mailto:sanyuyfandeev1991@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0002-2930-3112>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, докторант кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів  
Український державний університет науки і технологій.

Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)  
**E-mail:** [ua.apolo@gmail.com](mailto:ua.apolo@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5577-3869>  
**SCOPUS:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6505811695>

**ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ЧАСОВИХ РЕЖИМІВ  
ПОСТ-ОТВЕРДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИЦІЙ**

*Із застосуванням методу математичного планування експерименту Бокса-Уїлсона встановлено оптимальний режим пост-отвердження зносостійких епоксидних композицій, що може застосовуватись при виготовленні деталей різних габаритів та товщини, покриттів. Порівняльною оцінкою серійного та розробленого оптимізованого режимів пост-отвердження товстостінних високонаповнених мультидисперсним силіцій карбідом зносостійких епоксидних виробів (піскові насадки гідроциклонів) доведено можливість скорочення загального циклу процесу за оптимізованим режимом з покращенням зносостійкості і фізико-механічних властивостей.*

**Ключові слова:** епоксидні зносостійкі композиції; оптимізація режиму; пост-отвердження; газообразивне зношування; рельєф зношеного поверхневого шару; піскові насадки гідроциклона.

Табл.: 6. Рис.: 1. Бібл.: 27.

**Актуальність теми дослідження.** Забезпечення зносостійкості деталей різноманітного обладнання є обов'язковою умовою його надійної роботи, оскільки внаслідок зношування відбувається втрата роботоздатності багатьох деталей [1; 2]. Зношування деталей і вузлів обладнання для переробки абразивних сумішей у гірничозбагачувальній, хімічній та інших галузях промисловості веде до значних економічних втрат, що складаються із втрат від зниження продуктивності, беззворотного убитку матеріалів, простоїв обладнання при ремонті. Для виготовлення та ремонту деталей обладнання, що зазнає дії твердих абразивних частинок у потоці газу або рідини, захисних покриттів внутрішніх та зовнішніх поверхонь насосів, транспортних систем, гідроспоруд у світовій практиці широко використовуються полімерні композиційні матеріали на основі епоксидних смол, поліуретанів, полісечовин, гум [3-6]. З-поміж цих матеріалів значне поширення мають епоксидні завдяки доступності сировини, високій зносо-, агресивостійкості, міцності, високій адгезії до багатьох матеріалів різної природи, можливості отвердження за енергозберігаючою технологією – за звичайної (20 °С) температури [7-8].

Для покращення експлуатаційних властивостей епоксидних композиційних матеріалів у більшості випадків проводиться їх пост-отвердження при температурах 60-120°С, оптимізація режимів якого є актуальною задачею сьогодення.

**Постановка проблеми.** У виробничих умовах і особливо при виконанні ремонтних робіт можливі відхилення від встановлених режимів пост-отвердження деталей, покриттів із епоксидних зносостійких композицій внаслідок їх різних габаритів та товщини (коліна пневмотранспорту, гідроциклони, робочі колеса ґрунтових насосів, піскові насадки та ін.), що впливає на розподіл температур по товщині виробів, ступінь отвердження і, відповідно, їх експлуатаційні властивості. У цих умовах необхідним є розроблення режиму пост-отвердження таких виробів з поступовим підйомом температури в доступних межах, що дозволить зменшити негативні наслідки температурних перепадів на роботоздатність деталей та покриттів із захисних епоксидних композицій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання підвищення зносостійкості захисних епоксидних композицій знаходяться в центрі уваги багатьох провідних наукових центрів та установ. Інтенсивні дослідження в цьому напрямку проводяться в США,

Китаї, Індії, країнах Європейського Союзу, де працює значна кількість вартісного обладнання, гідроспоруд, що потребують захисту від зношування при дії потоку передавальних матеріалів різної твердості та розмірів. Найбільша увага в цих дослідженнях приділяється застосуванню ефективних полімерних матриць в захисних композиціях [3], насамперед епоксидних смол різної будови [4; 9], дисперсних наповнювачів [10-17], у тому числі нанорозмірних [18; 19]. Перспективними для покращення властивостей епоксидних композицій є їх модифікація енергетичними полями – магнітним, електростатичним, ультрафіолетовим опромінюванням [20]. Проте до теперішнього часу найбільш доступним і застосованим способом покращення експлуатаційних характеристик полімерних композиційних матеріалів, у тому числі і епоксидних, залишається традиційний – прогнозована зміна температури й часу їх пост-отвердження [21-25] для забезпечення оптимальних технологічних режимів їх зшивання. Звичайно пост-отвердження деталей із епоксидних композицій, попередньо отверджених за енергозберігаючою технологією при звичайній (20 °C) температурі, проводять при температурах нижче температури їх склування (60-120 °C) або вище (наприклад, 150 °C [25]). Застосування більш високих температур пост-отвердження, особливо коли епоксидні композиції використовуються при ремонті та відновленні композитних деталей обладнання, призводить до погіршення їх властивостей внаслідок перебігу процесів деструкції композитної матриці та ремонтного епоксидного матеріалу. У більшості досліджень вплив температури пост-отвердження на зміну властивостей епоксидних композицій з'ясовується при застосуванні певного постійного терміну проведення цього процесу [21-25], що не дозволяє його коригувати при відхиленні температури від заданої за режимом. Таким чином, дослідження впливу одночасної зміни температури і терміну проведення пост-отвердження епоксидних композицій надасть об'єктивну інформацію для забезпечення їхніх оптимальних експлуатаційних властивостей.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз останніх опублікованих досліджень показав, що питанням підвищення зносостійкості епоксидних композиційних матеріалів приділяється значна увага, оскільки зносостійкість багатьох деталей різноманітного обладнання сприяє зменшенню його простоїв і є дієвим фактором резервів виробництва. Одним із напрямків покращення характеристик захисних епоксидних матеріалів і, відповідно, експлуатаційної витривалості виробів із них є їх пост-отвердження (доотвердження), режими якого, як правило, повністю не наводяться, становлять «ноу-хау» виробників. В цьому зв'язку проведення досліджень з встановлення оптимальних режимів пост-отвердження зносостійких епоксидних композицій з можливістю прогнозування впливу їх зміни на зносостійкість і основні фізико-механічні властивості захисних матеріалів є доцільним та необхідним.

**Метою статті** є визначення оптимального режиму постадійного пост-отвердження зносостійких епоксидних композицій з можливим прогнозуванням зміни їхніх властивостей при температурних відхиленнях від цього режиму.

**Виклад основного матеріалу.** Для визначення оптимального температурно-часового режиму пост-отвердження епоксидних зносостійких композицій було проведено математичне планування експерименту за методом Бокса-Уілсона [26], який дозволяє отримати відповідні рівняння взаємозв'язку досліджених режимів із властивостями отверджених композитів (фізико-механічними, зношуванням при дії абразиву під різними кутами атаки). При виборі температурно-часових режимів пост-отвердження епоксидних композицій враховували результати попередньо проведених досліджень з впливу температури (60-140°C) та часу (1-3 год.) пост-отвердження на їх в'язкопружні [27] і термомеханічні властивості [21].



При проведенні досліджень як основу зносостійких епоксидних композицій використовували епоксидну діанову смолу CHS-Ероху 525 виробництва фірми Spolchemie, Чехія (епоксидний еквівалент 179-189 г/екв, динамічна в'язкість при 25 °С 10-12 Па·с), у яку для зменшення початкової в'язкості композицій та покращення розподілення в ній поліаміного отверджувача Poly7 (15 мас.ч. на 100 мас.ч. смоли) виробництва фірми Tosoh Corporation, Японія (суміш поліетиленполіаміну – 60-80 мас.%, пентаетиленгексаміну – 10-30 мас.%, тетраетиленпентаміну – 9 мас.%, амінне число 1200-1280 мг КОН/г) додатково вводили епоксидовмісний розбавник CHS-Ероху RR690 виробництва фірми Spolchemie, Чехія (тригліцидиловий ефір триметилпропану, епоксидний еквівалент 145 г/екв, динамічна в'язкість при 25°С 150 мПа·с). Вибір епоксидної діанової смоли CHS-Ероху 525 обумовлений високими фізико-механічними властивостями композиційних матеріалів на основі діанових епоксидних смол, можливістю їх отвердження за звичайної температури (20 °С) без застосування енергоносіїв. Застосування поліаміну Poly7 дозволяє проводити основний процес отвердження при 20°С (20°С×24 год.), для більш повного перебігу якого застосовували додаткове пост-отвердження при 60-120°С впродовж 1-3 год. Завершення процесу отвердження характеризували вмістом золь-фракції за відомою методикою [21] в ненаповнених композиціях, використання яких дозволяє в більш повній мірі виявити їх структурні зміни при пост-отвердженні. Температура пост-отвердження 140 °С була виключена при дослідженні, оскільки її застосування не тільки збільшує енерговитрати, а й призводить до погіршення експлуатаційних властивостей композицій внаслідок перебігу в значній мірі процесів деструкції [21], збільшенню вмісту золь-фракції в них до 4,0 мас.%. Епоксидні композиції виготовляли шляхом введення епоксидної смоли CHS-Ероху 525, епоксидовмісного розбавника CHS-Ероху RR690 в реактор періодичної дії при температурі 60 °С, компоненти перемішували впродовж 10 хв. Поліамін Poly7 додавали до необхідної кількості епоксидних композицій перед їх застосуванням при 20-25 °С, перемішували впродовж 5 хв. Готові композиції з поліаміном Poly7 заливали у відповідні форми, отверджували за режимом 20°С×24 год та пост-отверджували в термостаті при 60-120 °С впродовж 1-3 год.

Фізико-механічні характеристики пост-отверджених зразків визначали відповідно до діючих стандартів, зносостійкість характеризували їх зношуванням відповідно до ГОСТ 23.201-78. Випробування на зносостійкість проводили в найбільш жорстких умовах – при швидкості дії потоку частинок річкового піску розмірами 0,5-0,9 мм 76 м/с, створеного відцентровим прискорювачем ЦУК-3. Зразки розмірами 15×20×4 мм встановлювали на установці в положенні відповідно до кута атаки абразиву 15, 30, 45, 60, 90°. Морфологію поверхні епоксидних композицій після газоабразивного зношування досліджували із застосуванням цифрового оптичного USB-мікроскопу Microsafe Shiny Vision MM-2288-5X-BN (Китай).

При визначенні оптимального режиму пост-отвердження епоксидних композицій за методом Бокса-Уілсона для зменшення експериментальних витрат використовували план першого порядку – дробний факторний експеримент  $2^{4-1}$ , матриця якого наведена в табл. 1, з варіюванням чотирьох змінних – температур пост-отвердження 60, 80, 100, 120 °С. За основний рівень пост-отвердження композицій був прийнятий час у 2 год., оскільки за цей час переважно досягався стабільний рівень властивостей, інтервал змінних – 1 год. У табл. 2 представлено властивості пост-отверджених епоксидних композицій згідно до матриці планованого експерименту. На підставі експериментальних даних, наведених у табл. 2, були розраховані коефіцієнти рівнянь регресії поліному

$$y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 \quad (1)$$

залежності властивостей композицій від температурно-часових режимів їх пост-отвердження. Коефіцієнти рівнянь регресії  $b_j$  розраховували за формулою [26]:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot x_{ij}}{n}, \tag{2}$$

де  $b_j$  – коефіцієнт рівняння регресії при  $j$ -факторі;  $y_i$  – значення параметру оптимізації;  $x_{ij}$  – кодоване значення  $j$ -го фактора в  $i$ -му досліді;  $n$  – число дослідів.

Таблиця 1 – Матриця планування дробного факторного експерименту  $2^{4-1}$  та температурно-часові режими пост-отвердження епоксидних композицій згідно з цією матрицею

Номер досліду	Змінні					Термін пост-отвердження (год) для змінних			
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_1$ (60°C)	$x_2$ (80°C)	$x_3$ (100°C)	$x_4$ (120°C)
1	+	+	+	+	+	3	3	3	3
2	+	+	+	-	-	3	3	1	1
3	+	+	-	+	-	3	1	3	1
4	+	+	-	-	+	3	1	1	3
5	+	-	+	+	-	1	3	3	1
6	+	-	+	-	+	1	3	1	3
7	+	-	-	+	+	1	1	3	3
8	+	-	-	-	-	1	1	1	1

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 2 – Вплив температурно-часових режимів пост-отвердження епоксидних композицій згідно з матрицею планованого експерименту на їхні фізико-механічні властивості та зношування

Номер досліду	Фізико-механічні властивості				Зношування ( $\Delta V \cdot 10^3$ , см <sup>3</sup> ) при кутах атаки абразиву, градуси				
	міцність при розтягуванні, МПа	міцність при статичному згині, МПа	міцність при стисненні, МПа	ударна в'язкість за Шарпі, кДж/м <sup>2</sup>	15	30	45	60	90
1	25,44	93,11	128,94	18,42	3,5	11,4	13,3	8,6	4,2
2	31,19	98,87	124,26	22,02	3,8	13,2	15,8	8,9	6,1
3	30,97	97,70	120,30	16,31	4,7	14,9	16,2	11,2	5,6
4	30,62	91,54	126,08	17,04	5,7	13,9	16,1	10,6	5,8
5	36,63	121,00	125,34	24,86	5,5	8,0	13,0	8,8	5,2
6	28,93	119,61	122,34	24,00	6,2	8,6	13,5	9,1	4,8
7	28,47	120,59	123,95	25,91	5,6	11,4	15,3	8,7	4,7
8	23,19	83,55	109,30	15,89	7,3	16,5	17,8	12,9	6,7

Джерело: розроблено авторами

Отримані рівняння регресії властивостей епоксидних композицій мали такий вид:

- зношування ( $\Delta V \cdot 10^3$ , см<sup>3</sup>) при різних кутах атаки абразиву  $y_1$

$$y_{1, 15^\circ} = 5,2875 - 0,8625 x_1 - 0,5375 x_2 - 0,4625 x_3 - 0,0375 x_4; \tag{3}$$

$$y_{1, 30^\circ} = 12,2375 + 1,1125 x_1 - 1,9375 x_2 - 0,8125 x_3 - 1,1750 x_4; \tag{4}$$

$$y_{1, 45^\circ} = 15,1250 + 0,2250 x_1 - 1,2250 x_2 - 0,6750 x_3 - 0,5750 x_4; \tag{5}$$

$$y_{1, 60^\circ} = 9,8500 - 0,0250 x_1 - 1,0000 x_2 - 0,5250 x_3 - 0,6000 x_4; \tag{6}$$

$$y_{1, 90^\circ} = 5,3875 + 0,0375 x_1 - 0,3125 x_2 - 0,4625 x_3 - 0,5125 x_4; \tag{7}$$

- ударна в'язкість за Шарпі (кДж/м<sup>2</sup>)  $y_2$

$$y_2 = 20,56 - 2,11 x_1 + 1,77 x_2 + 0,82 x_3 + 0,78 x_4; \tag{8}$$

- міцність при стисненні (МПа)  $y_3$

$$y_3 = 122,56 + 2,33 x_1 + 2,66 x_2 + 1,94 x_3 + 2,76 x_4; \tag{9}$$

- міцність при статичному згині (МПа)  $y_4$

$$y_4 = 103,12 - 7,94 x_1 + 4,90 x_2 + 4,85 x_3 - 0,78 x_4; \tag{10}$$

- міцність при розтягуванні (МПа)  $y_5$

$$y_5 = 29,43 + 0,34 x_1 + 1,12 x_2 - 0,95 x_3 - 0,82 x_4. \quad (11)$$

Основний технічний результат, який необхідно було досягти при оптимізації температурно-часових режимів пост-отвердження епоксидних композицій, - зменшення їх зношування. Найбільше зношування (табл. 2) епоксидних композицій відбувається при куті атаки абразиву  $45^\circ$ . Виконані розрахунки за рівнянням (5) довели добру їх відповідність експериментальним даним (відхилення розрахункових значень зношування від експериментальних становлять не більше  $\pm 5\%$ ).

Аналіз рівняння регресії (5) показав, що найбільший вплив на зношування епоксидних композицій вносять змінні  $x_2$  (температура  $80^\circ\text{C}$ ),  $x_3$  (температура  $100^\circ\text{C}$ ),  $x_4$  (температура  $120^\circ\text{C}$ ), коефіцієнти  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ , при яких найбільші. Змінна  $x_1$  (температура пост-отвердження  $60^\circ\text{C}$ ) негативно впливає на зношування епоксидних композицій (сприяє збільшенню зношування композицій у порівнянні з основним рівнем). Абсолютна величина коефіцієнтів в рівнянні регресії (5) та їх знак надають можливість кількісно оцінити вплив кожної температури пост-отвердження на зношування та інші властивості композицій: відповідно до знаку «-» при коефіцієнтах  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$  для зменшення зношування епоксидних композицій необхідно застосовувати їх пост-отвердження при температурах  $80\text{-}120^\circ\text{C}$ . Однак слід враховувати, що при збільшенні температури пост-отвердження зростає вірогідність нерівномірного розподілу температур в виробках (особливо в товстостінних), що призводить до погіршення їх якості.

Для досягнення більш рівномірного розподілу температур у різних зонах виробів з урахуванням значень коефіцієнтів при змінних  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  доцільно проводити процес пост-отвердження епоксидних композицій при температурах  $80$ ,  $100^\circ\text{C}$ . Зі збільшенням тривалості пост-отвердження епоксидних композицій у відповідності із знаком «-» при коефіцієнтах  $b_2$  і  $b_3$  їх зношування буде зменшуватись, що і відповідає поставленій меті дослідження. Тому при розрахунках величини кроків варіювання змінних  $x_2$  та  $x_3$  знак при коефіцієнтах  $b_2$  і  $b_3$  був змінений з «-» на «+». При русі до області оптимуму зношування епоксидних композицій при  $45^\circ$  (рівняння  $y_{1,45^\circ}$ ) було прийнято в якості основного їх показника (найбільш негативний ефект зношування композицій, який потрібно зменшити), інші рівняння регресії залежності властивостей епоксидних композицій від температурно-часових режимів пост-отвердження використовували в якості накладання обмежень. Величини кроків варіювання змінних  $x_2$ ,  $x_3$  при русі до області оптимуму розраховували за формулою [26]:

$$\Delta_j = \frac{\varepsilon_j \cdot b_j}{c}, \quad (12)$$

де  $\Delta_j$  – крок варіювання  $j$  фактору;

$\varepsilon_j$  – інтервал варіювання  $j$  фактору;

$b_j$  – коефіцієнт рівняння регресії при  $j$  факторі;

$c$  – постійна величина, що обирається довільно.

Розрахунок величин кроків варіювання змінних факторів наведено в табл. 3. Додаванням кроків варіювання до величини основного рівня знаходили режими пост-отвердження епоксидних композицій для просування до області оптимуму (табл. 4); відповідні їм властивості композицій представлено в табл. 5, а на рисунку наведено морфологію зношених поверхневих шарів цих композицій. Аналіз даних табл.5 та рис. показав, що оптимальним за комплексом властивостей є наступний режим пост-отвердження епоксидних композицій:  $80^\circ\text{C} \times 2,4 \text{ год} + 100^\circ\text{C} \times 2,2 \text{ год}$  (композиція 10, що відповідає цьому режиму), при застосуванні якого спостерігається найбільш рівномірне абразивне зношування композицій. Область компромісного оптимуму досліджувати було недоцільно, оскільки при цьому терміни пост-отвердження епоксидних композицій потрібно ще більше звузити (відповідно до основного оптимального режиму до 3-6 хв), що немає сенсу про проведенні процесу пост-отвердження в промислових умовах.

Таблиця 3 – Величини кроків варіювання факторів оптимізації при русі до області оптимуму

Фактори	Змінні	
	$x_2$ (80°C)	$x_3$ (100°C)
$\epsilon_j$	1,0	1,0
$b_j$	+1,2250	+0,6750
c	6	6
$\Delta_j$	~ 0,20	~ 0,10

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 4 – Режими пост-отвердження епоксидних композицій при русі до області оптимуму

Номер досліду	Терміни пост-отвердження (год) при температурах	
	80°C	100°C
0	2,00	2,00
9	2,20	2,10
10	2,40	2,20
11	2,60	2,30
12	2,80	2,40

Джерело: розроблено авторами.

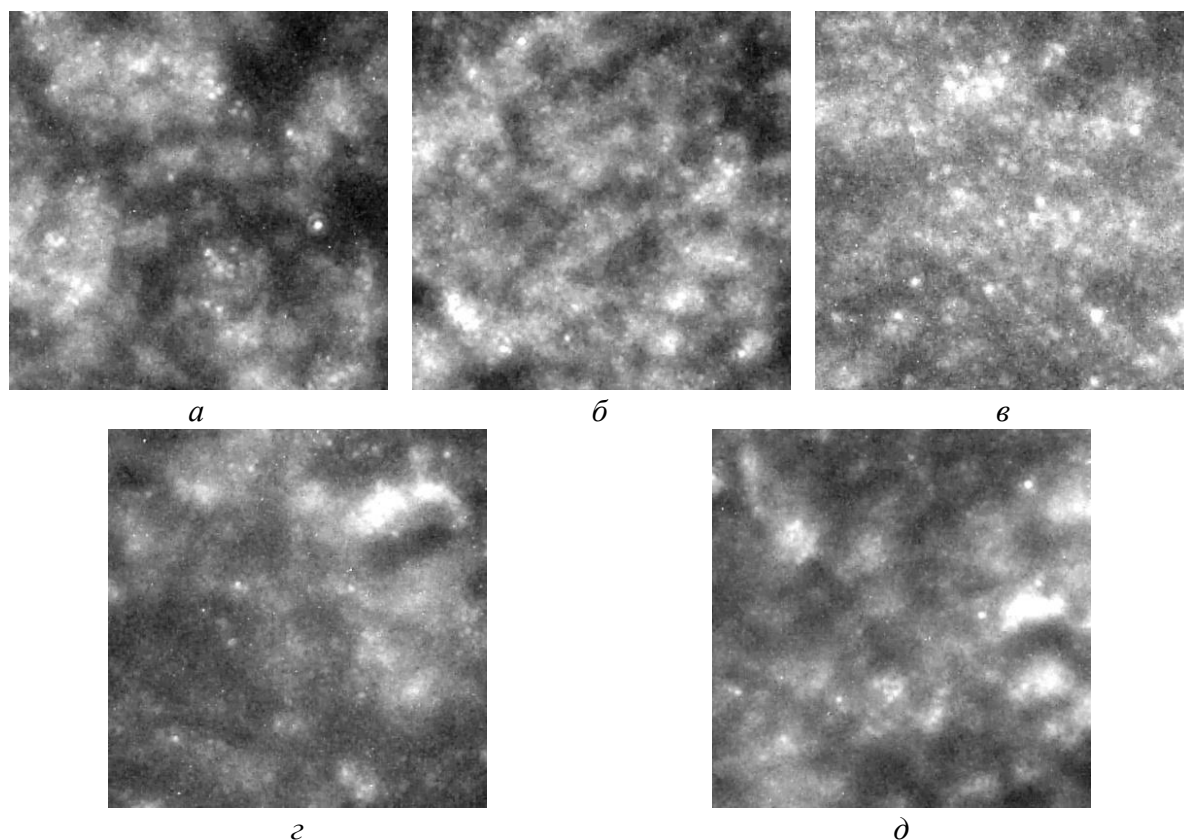


Рис. Морфологія зношених поверхневих шарів епоксидних композицій ( $\times 100$ ) при просуванні до області оптимуму (кут атаки абразиву  $45^\circ$ ):  
 а – дослід 0; б – дослід 9; в – дослід 10; г – дослід 11; д – дослід 12

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 5 – Властивості епоксидних композицій після пост-отвердження при русі до області оптимуму

Властивості композицій	Номер дослідю				
	0	9	10	11	12
Зношування ( $\Delta V \cdot 10^3$ , см <sup>3</sup> ) при кутах атаки абразиву, градуси					
15	2,6	1,9	1,5	1,7	1,8
30	4,1	4,0	3,9	4,4	4,7
45	5,7	5,2	5,0	5,6	6,0
60	3,5	3,4	3,2	3,8	4,3
90	2,6	2,3	2,0	2,3	2,4
Міцність при стисненні, МПа	123,4	124,6	126,5	124,4	123,3
Міцність при статичному згині, МПа	119,0	121,1	122,3	119,4	115,9
Міцність при розтягуванні, МПа	30,8	34,2	36,6	31,6	30,0
Ударна в'язкість за Шарпі, кДж/м <sup>2</sup>	22,7	24,3	26,6	24,1	22,8

Джерело: розроблено авторами.

Порівняльною оцінкою серійного (ТОВ «Нові технології, м. Дніпро) та розробленого режимів пост-отвердження товстостінних високонаповнених мультидисперсним силіцій карбідом зносостійких епоксидних виробів (піскові насадки гідроциклонів) доведено більшу ефективність оптимізованого режиму (табл. 6), при застосуванні якого скорочується загальний цикл пост-отвердження виробів і забезпечується досягнення їх більш високих показників зносостійкості та фізико-механічних властивостей.

Таблиця 6 – Вплив режимів пост-отвердження на властивості товстостінних зносостійких епоксидних виробів (піскові насадки гідроциклонів ГЦК-710), наповнених мультидисперсним силіцій карбідом

Властивості	Режими пост-отвердження	
	серійний (60-110°C)×8 год.	розроблений оптимізований (80-100°C)×4,6 год.
Максимальне зношування, $\Delta V \cdot 10^3$ , см <sup>3</sup>	56,1	29,8
Міцність при стисненні, МПа	120,0	144,3
Міцність при статичному згині, МПа	60,2	65,0
Міцність при розтягуванні, МПа	20,3	24,8
Ударна в'язкість за Шарпі, кДж/м <sup>2</sup>	3,4	3,5

Джерело: розроблено авторами.

**Висновки.** Із застосуванням методу математичного планування експерименту Бокса-Уілсона встановлено оптимальний режим пост-отвердження зносостійких епоксидних композицій (80°C × 2,4 год. + 100°C × 2,2 год.), що може застосовуватись при виготовленні та ремонті деталей різних габаритів та товщини, покриттів.

Проведено аналіз рівнянь регресії залежності основних властивостей епоксидних композицій від температурно-часових режимів їх пост-отвердження і показано напрямки можливого їх покращення при коригуванні температур пост-отвердження.

Встановлено вплив кута атаки абразиву при газоабразивному зношуванні епоксидних композицій на їх зносостійкість і виявлено, що максимальне зношування ненаповнених композицій відбувається при куті атаки абразиву 45°, що необхідно враховувати при експлуатації виробів.

Методом оптичної мікроскопії з'ясовано зміну рельєфу зношеного поверхневого шару композицій при куті атаки абразиву 45° від температурно-часових режимів пост-отвердження і встановлено більш однорідне їх зношування при застосуванні розробленого оптимального режиму пост-отвердження.

Порівняльною оцінкою серійного (ТОВ «Нові технології», м. Дніпро) та розробленого оптимізованого режимів пост-отвердження товстостінних високонаповнених мультидисперсним силіцій карбідом зносостійких епоксидних виробів (піскові насадки гідроциклонів) доведено можливість скорочення загального циклу процесу за оптимізованим режимом при покращенні зносостійкості і фізико-механічних властивостей.

### Список використаних джерел

1. Полоз, А. Ю. Выбор параметров для сравнительной оценки износостойкости эпоксидных композиционных материалов / А. Ю. Полоз, С. Г. Липицкий, С. Н. Куценко // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – №5/3 (31). – С. 26-31. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.81253>.
2. Горяева, Ю. Є. Порівняльні дослідження працездатності матеріалів при зношуванні в потоці абразивних часток / Ю. Є. Горяева, О. А. Семенець, В. М. Анісімов // Питання хімії і хімічної технології. – 2003. – № 6. – С. 128-131.
3. Xu Liqun. Hydraulic Abrasion-Resistant Elastic Epoxy Resin Materials / Liqun Xu, Kai Zhang, Yanhui Liu // Hindawi. Advances in Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol.2019. – Article ID 9358139. – P.1-11. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/9358139>.
4. Shu-fang M. Study and application of “Sea Island structure” epoxy resin “alloy” materials resistant to erosion and abrasion / M. Shu-fang, F. Wenshi, L. I. Jingwei // Construction Technology. – 2005. – Vol. 34. – No. 4. – P.36–39.
5. Cryogenic mechanical properties of epoxy resin toughened by hydroxyl-terminated polyurethane / Tong Wu, Yu Liu, Na Li et al. // Polymer Testing. – 2019. – Vol. 74. – P.45–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.11.048>.
6. Composite Materials Engineering (Modeling and Technology) / ed. by Alexander V. Vakhrushev, A. K. Haghi. – Apple Academic Press, 2019. – 236 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429242762>.
7. Lee H. L. Handbook of epoxy resins / H. L. Lee, K. Neville. – McGraw-Hill Book Co., 1967. – 960 p.
8. Epoxy polymers: new materials and innovations / Edited by J. R. Pascault and J. J. Williams. – WileyYCH, 2010. – 367 p.
9. Стухляк, П. Д. Эпоксидные композиты для защитных покрытий / П. Д. Стухляк. – Тернополь : Збруч, 1994. – 177 с.
10. Improving wear resistance of epoxy/SiC composite using a modified apparatus / Amal Nassar, Mostafa Salem, Ismail El-Batanony, Eman Nassar // Polymers and Polymer Composites. – 2021. – Vol. 29 (95). – Pp. 389-399. DOI: <https://doi.org/10.1177/09673911211002731>.
11. Xia Hongyan. Superior wear resistance of epoxy composite with highly dispersed graphene spheres / Hongyan Xia, Jiajia Li, Kai Wang // Advanced Composites and Hybrid Materials. – 2022. – No. 5. – Pp. 173-183. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00259-4>.
12. Improved Wear-Resistant Performance of Epoxy Resin Composites Using Ceramic Particles / Amal Nassar, Mona Younis, Mohamed Ismail, Eman Nassar // Polymers. – 2022. – Vol. 14 (2). – Pp. 2-17. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14020333>.
13. Zhang Zhicai. Reinforced Superhydrophobic Anti-Corrosion Epoxy Resin Coating by Fluorine-Silicon-Carbide Composites / Zhicai Zhang, Nie Zhao, Fugang Qi // Coatings. – 2020. – Vol. 10 (12). – Pp. 2-16. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings10121244>.
14. Полоз, О. Ю. Поведінка зносостійких епоксидних композицій в умовах контактної-динамічного навантаження / О. Ю. Полоз, Ю. Р. Ебич // Проблеми тертя та зношування. – 2021. – № 2(91). – С. 46-52. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(91\).15528](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(91).15528).
15. Optimum abrasive wear resistance for epoxy composites reinforced with polyethylene (PET) waste using Taguchi design and neural network / Salwa A. Abed, Ahmad A. Khalaf, Muzher Taha Mohamed, Muammal M. Hanon // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – Vol. 1. – No. 12(121). – Pp. 34-40. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.272534>.
16. Ray Subhrajit. Parametric Optimization and Prediction of Abrasion Wear Behavior of Marble-Particle-Filled Glass-Epoxy Composites Using Taguchi Design Integrated with Neural Network / Subhrajit Ray // The Minerals, Metals & Materials Society. – 2021. – Vol. 73. – No. 7. – Pp. 2050-2059. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04698-8>.

17. Huang Zhiping. Tribological and anti-corrosion performance of epoxy resin composite coatings reinforced with differently sized cubic boron nitride (CBN) particles / Zhiping Huang, Wenjie Zhao, Wenchao Zhao // *Friction*. – 2021. – Vol. 9. – Issue 1. – Pp. 104-118. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0329-8>.
18. Alhazmia, W. H. Tribological and Mechanical Properties of Epoxy Reinforced by Hybrid Nanoparticles / W.H. Alhazmia, Y. Jazaab, S. Mousa // *Latin American Journal of Solids and Structures*. – 2021. – Vol. 18. – No. 3. – Pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1590/1679-78256384>.
19. Shahabaz, S. M. Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiC Nano-Fillers on the Mechanical Properties of Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Hybrid Composites / S. M. Shahabaz, Prakhar Mehrotra, Hridayneel Kalita // *Journal of Composites Science*. – 2023. – Vol. 7. – Issue 4, 133. – P. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs7040133>.
20. Стухляк, П. Д. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані енергетичними полями / П. Д. Стухляк, А. В. Букетов, І. Г. Добротвор. – Тернопіль : Збруч, 2008. – 208 с.
21. Полоз, А. Ю. Термомеханические свойства износостойких эпоксидных композиций / А. Ю. Полоз, Ю. Р. Эбич, С.В. Жильцова // *Вопросы химии и химической технологии*. – 2015. – Т. 1(99). – С. 58-72.
22. Burchak Mostefa. Effect of preheating and post-curing time on the mechanical properties of epoxy resin / Mostefa Burchak, Adnan Khan, Khalid A. Juhany // *Advanced Composites Letters*. – 2013. – Vol. 22. – Issue 5. – Pp. 95-99.
23. Influence of curing, post-curing and testing temperatures on mechanical properties of a structural adhesive / Younes Jahani, Marta Baena, Cristina Barris, Ricardo Perera, Lluís Torres // *Construction and Building Materials*. – 2022. – No. 324. – Article ID 126698. – Pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126698>.
24. Optimization of the Curing and Post-Curing Conditions for the Manufacturing of Partially Bio-Based Epoxy Resins with Improved Toughness / Diego Lascano, Luis Quiles-Carrillo, Sergio Torres-Giner, Teodomiro Boronat, Nestor Montanes // *Polymers*. – 2019. – Vol. 11. – Issue 8. – Article ID 1354. – Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11081354>.
25. Sambayi P. M. K. Effects of multiple post cure cycles on properties of composite carbon fibre and epoxy materials / P. M. K Sambayi, P. S. Heyns // *Journal of Composite Materials*. – 2023. – Vol. 57. – Issue 15. – Pp. 2467-2481. DOI: <https://doi.org/10.1177/00219983231169333>.
26. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва : Наука, 1976. – 279 с.
27. Вязкоупругие свойства износостойких эпоксидных композитов / А. Ю. Полоз, Ю. Р. Эбич, Р. М. Долинская, В. В. Мозгалев // *Вопросы химии и химической технологии*. – 2013. – № 5. – С. 72-77.

### References

1. Poloz, A. Yu., Lipitsky, S. G., & Kushchenko, S. N. (2016). *Vybor parametrov dlya sravnitel'noy otsenki iznosostoykosti epoksidnykh kompozitsionnykh materialov* [Selection of parameters for comparative assessment of wear resistance of epoxy composite materials]. *Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva – Technology Audit and Production Reserves*, (5/3 (31)), 26-31. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.81253>.
2. Goryaeva, Yu. E., Semenets, O. A., & Anisimov, V. M. (2003). *Porivnyal'ni doslidzhennya pratsездatnosti materialiv pry znoshuvanni v pototsi abrazyvnykh chastok* [Comparative studies of the workability of materials during wear in the flow of abrasive particles]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii – Issues of Chemistry and Chemical Technology*, (6), 128-131.
3. Liqun, Xu, Kai, Zhang, & Yanhui, Liu. (2019). Hydraulic Abrasion-Resistant Elastic Epoxy Resin Materials. *Hindawi. Advances in Materials Science and Engineering*, (2019, 9358139), 1-11. <https://doi.org/10.1155/2019/9358139>.
4. Shu-fang, M., Wenshi, F., & Jingwei, L.I. (2005). Study and application of “Sea Island structure” epoxy resin “alloy” materials resistant to erosion and abrasion. *Construction Technology*, (34 (4)), 36–39.
5. Wu, Tong, Liu, Yu, Li, Na, Huang, Gui-Wen, Qu, Cheng-Bing & Xiao, Hong-Mei (2019). Cryogenic mechanical properties of epoxy resin toughened by hydroxyl-terminated polyurethane. *Polymer Testing*, (74), 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.11.048>.

6. Vakhrushev, Alexander V., & Haghi, A.K. (Ed.) (2019). *Composite Materials Engineering (Modeling and Technology)*. Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/9780429242762>.
7. Lee, H. L., Neville, K. (1967). *Handbook of epoxy resins*. McGraw-Hill Book Co.
8. Pascault, J. R., & Williams, J. J. (Ed.) (2010). *Epoxy polymers: new materials and innovations*. WileyYCH.
9. Stukhlyak, P.D. (1994). *Epoksidnyye kompozity dlya zashchitnykh pokrytiy [Epoxy composites for protective coatings]*.
10. Nassar, Amal, Salem, Mostafa, El-Batanony, Ismail, & Nassar, Eman. (2021). Improving wear resistance of epoxy/SiC composite using a modified apparatus. *Polymers and Polymer Composites*, (29 (95)), 389-399. <https://doi.org/10.1177/09673911211002731>.
11. Xia, Hongyan, Li, Jiajia, & Wang, Kai. (2022). Superior wear resistance of epoxy composite with highly dispersed graphene spheres. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, (5), 173-183. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00259-4>.
12. Nassar, Amal, Younis, Mona, Ismail, Mohamed, & Nassar, Eman. (2022). Improved Wear-Resistant Performance of Epoxy Resin Composites Using Ceramic Particles. *Polymers*, (14 (2)), 2-17. <https://doi.org/10.3390/polym14020333>.
13. Zhang, Zhicai, Zhao, Nie, & Qi, Fugang. (2020). Reinforced Superhydrophobic Anti-Corrosion Epoxy Resin Coating by Fluorine–Silicon–Carbide Composites. *Coatings*, (10(12)), 2-16. <https://doi.org/10.3390/coatings10121244>
14. Poloz, O.Yu., & Ebich, Yu.R. (2021). Povedinka znosostiykykh epoksydnykh kompozitsiy v umovakh kontaktno-dynamichnoho navantazhennya [Behavior of wear-resistant epoxy compositions in conditions of contact-dynamic loading]. *Problemy tertya ta znoshuvannya – Problems of friction and wear*, (2(91)), 46-52. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(91\).15528](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(91).15528).
15. Abed A., Salwa, Khalaf, A. Ahmad, Mohamed, Taha Muzher, & Hanon, M. Muammel, (2023). Optimum abrasive wear resistance for epoxy composites reinforced with polyethylene (PET) waste using Taguchi design and neural network. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, I(12(121)), 34-40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.272534>.
16. Subhrajit, Ray. (2021). Parametric Optimization and Prediction of Abrasion Wear Behavior of Marble-Particle-Filled Glass–Epoxy Composites Using Taguchi Design Integrated with Neural Network. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 73(7), 2050-2059. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04698-8>.
17. Zhiping, Huang, Wenjie, Zhao, & Wenchao, Zhao. (2021). Tribological and anti-corrosion performance of epoxy resin composite coatings reinforced with differently sized cubic boron nitride (CBN) particles. *Friction*, 9(1), 104-118. <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0329-8>.
18. Alhazmia, W. H., Jazaab, Y., & Mousa, S. (2021). Tribological and Mechanical Properties of Epoxy Reinforced by Hybrid Nanoparticles. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 18(3), 1-14. <https://doi.org/10.1590/1679-78256384>.
19. Shahabaz, S.M., Mehrotra, Prakhar, & Kalita, Hridayneel (2023). Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiC Nano-Fillers on the Mechanical Properties of Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Hybrid Composites. *Journal of Composites Science*, 7, (4)133), 1-15. <https://doi.org/10.3390/jcs7040133>.
20. Stuhlyak, P.D., Buketov, A.V., & Dobrotvor, I.G. (2008). *Epoksykompozytni materialy, modyfikovani enerhetychnymy polyamy [Epoxycomposite materials modified by energy fields]*.
21. Poloz, A. Yu., Ebych, Yu. R., & Zhiltsova, S.V. (2015). Termomekhanicheskiye svoystva iznosostoykikh epoksidnykh kompozitsiy [Thermo-mechanical properties of wear-resistant epoxy compositions]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii – Issues of Chemistry and Chemical Technology*, I(99), 58-72.
22. Bourchak, Mostefa, Khan, Adnan, & Juhany A. Khalid. (2013). Effect of preheating and post-curing time on the mechanical properties of epoxy resin. *Advanced Composites Letters*, 22(5), 95-99.
23. Jahani, Younes, Baena, Marta, Barris, Cristina, Perera, Ricardo, & Torres Lluís (2022). Influence of curing, post-curing and testing temperatures on mechanical properties of a structural adhesive. *Construction and Building Materials*, (324, 126698), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126698>.



24. Lascano, Diego, Quiles-Carrillo, Luis, Torres-Giner, Sergio, Boronat Teodomiro, & Montanes, Nestor (2019). Optimization of the Curing and Post-Curing Conditions for the Manufacturing of Partially Bio-Based Epoxy Resins with Improved Toughness. *Polymers*, 11(8)1354, 1-15. <https://doi.org/10.3390/polym11081354>.

25. Sambayi, P. M. K., & Heyns, P. S. (2023). Effects of multiple post cure cycles on properties of composite carbon fibre and epoxy materials. *Journal of Composite Materials*, 57(15), 2467-2481. <https://doi.org/10.1177/00219983231169333>.

26. Adler, Yu.P., Markova, E.V., & Granovsky, Yu.V. (1976). *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy [Planning an experiment when searching for optimal conditions]*. Nauka.

27. Poloz, A.Yu., Ebich, Yu.R., Dolinskaya, R.M., Mozgalev V.V. (2013). *Vyazkouprugiye svoystva iznosostoykikh epoksidnykh kompozitov [Viscoelastic properties of wear-resistant epoxy composites]*. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii – Issues of Chemistry and Chemical Technology*, (5), 72-77.

Отримано 06.06.2024

UDC 620.178:678.686

### **Oleksandr Fandeev<sup>1</sup>, Oleksii Poloz<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>master of the Department of Fuel, Polymer and Polygraphic Materials Technologies  
Ukrainian State University of Science and Technologies.

Educational and Scientific Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology" (Dnipro, Ukraine)

**E-mail:** [sanyvyfandeev1991@gmail.com](mailto:sanyvyfandeev1991@gmail.com). **ORCID** <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0002-2930-3112>

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Doctoral Candidate of the Department of Fuel, Polymer and Polygraphic Materials Technologies  
Ukrainian State University of Science and Technologies.

Educational and Scientific Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology" (Dnipro, Ukraine)

**E-mail:** [ua.apolo@gmail.com](mailto:ua.apolo@gmail.com). **ORCID** <https://orcid.org/0000-0001-5577-3869>

**SCOPUS** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6505811695>

## **OPTIMIZATION OF TEMPERATURE-TIME CONDITIONS OF POST-CURING OF WEAR-RESISTANT EPOXY COMPOSITIONS**

*In the manufacture and repair of equipment parts for processing abrasive mixtures in mining, chemical and other industries, protective coatings for internal and external surfaces of pumps, transport systems, and hydraulic structures, epoxy composite materials are widely used in world practice.*

*To improve the performance properties of wear-resistant epoxy materials, in most cases, they are post-cured, optimization of which modes makes it possible to reduce the negative effects of temperature changes in products of different dimensions and thickness on their performance.*

*An analysis of studies and publications on improving the performance properties of protective wear-resistant epoxy materials has shown that insufficient attention is paid to the issues of the predicted influence of changes in temperature and time on the performance of epoxy products when developing technological regimes for their post-curing.*

*The purpose of the article is determining the optimal post-curing regime for wear-resistant epoxy compositions with possible prediction of changes in their properties with temperature deviations from this regime.*

*Using the method of mathematical planning of the Box-Wilson experiment, the optimal post-curing regime for wear-resistant epoxy compositions was established (80°C × 2.4 hours + 100°C × 2.2 hours), which can be used in the manufacture and repair of parts of various sizes and thicknesses, coatings.*

*The influence of the abrasive attack angle during gas-abrasive wear of epoxy compositions on their wear resistance was clarified and it was revealed that the maximum wear of unfilled compositions occurs at an abrasive attack angle of 45°, which must be taken into account when using the products.*

*A comparative assessment of serial (New Technologies LLC, Dnepr) and developed optimized post-curing modes of thick-walled wear-resistant epoxy products highly filled with multidisperse silicon carbide (sand-nozzles of hydrocyclone) has proven the possibility of reducing the overall process cycle using the optimized mode while improving wear resistance and physical and mechanical properties.*

**Keywords:** epoxy wear-resistant compositions; mode optimization; post-curing; gas-abrasive wear; relief of the worn surface layer; sand-nozzles of hydrocyclone.

Table: 6. Fig: 1. References: 27.

**Serhii Zaitsev<sup>1</sup>, Victor Kishnevsky<sup>2</sup>, Valentin Tikhenko<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, engineer of the Department of Nuclear Power Plants  
Odesa Polytechnic National University (Odesa, Ukraine)

**E-mail:** [sdjavdet@ukr.net](mailto:sdjavdet@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1166-3243>

<sup>2</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Nuclear Power Plants  
Odesa Polytechnic National University (Odesa, Ukraine)

**E-mail:** [kishnevskiy@opu.ua](mailto:kishnevskiy@opu.ua). **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-1780-2969>

<sup>3</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor, head of the Department of digital technologies in engineering  
Odesa Polytechnic National University (Odesa, Ukraine)

**E-mail:** [vtikhenko@gmail.com](mailto:vtikhenko@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2804-2838>

## CONTROL OF DISSOLVED GAS CONTENT IN FRESH AND OXIDISED TURBINE OILS

*The article is a publication of scientific and methodical character. Gas chromatography methods were used to determine the content of dissolved diagnostic gases in mineral turbine oil «Agrinol Tp-46» and in synthetic fire-resistant turbine oils «Fyrquel®L», «Reolube®OMTI», «Reolube®46 RS». The following were studied: the solubility of these gases in mineral oil «Agrinol Tp-46» and in synthetic oil «Reolube®46 RS»; dependence of solubility values for diagnostic gas H<sub>2</sub>S on temperature in the system «mineral turbine oil – dissolved gas H<sub>2</sub>S»; distribution coefficients of dissolved gases in turbine oils in systems «turbine oil – dissolved gas – gaseous extractant»; dissolved gas content in «Reolube®46 RS» synthetic turbine oils by application method. This will make it possible to determine the content of dissolved gases in wet turbine oils for diagnostics of oil-filled equipment.*

**Keywords:** gas chromatography; diagnostics; nuclear power; partition coefficient; gas solubility.

*Fig.: 1. Table: 6. References: 21.*

**Urgency of the research.** In thermal mechanical equipment of nuclear power plants (NPPs), turbine oils (TO) are used in the following systems: lubrication and adjustment of steam turbines; lubrication and sealing of generator shafts; lubrication the main circulation pumps and water cooling system pumps; lubrication of condensate electric pumps, pumps for pumping technical water of responsible and non-responsible consumers; lubrication and adjustment of turbine feed pump units and separator pumps [1; 2]. Currently, the thermal mechanical equipment of Ukrainian NPPs uses mineral turbine oils (MTO) of the brands «Tp-22», «Tp-22s», «Tp-22b», «Agrinol Tp-22», «Agrinol Tp-22s», «Agrinol Tp-30», «Agrinol Tp-46», «Azmol Tp-22s» and synthetic fire-resistant turbine oils (SFRTO) of the «Fyrquel®L», «Reolube®OMTI», «Reolube®46 RS» brands [3]. Often, turbine oils contain dissolved water (homogeneous system) and undissolved water as an emulsion (heterogeneous system) [4]. All this requires continuous improvement of diagnostic methods of oil-filled NPP equipment based on the results of monitoring the content of diagnostic components in them, for example, dissolved gases CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> [5; 6], including in heterogeneous systems of the «oil turbine – dissolved gas – emulsion water» type.

**Target setting.** Quite often, internal defects in oil-filled thermal-mechanical equipment of nuclear power plants, which contain mineral and/or synthetic fire-resistant turbine oils, arise due to the action of electric, thermal and acoustic fields, as well as the presence of moisture in these turbine oils. At the same time, the development of these defects is influenced by the quality indicators of lubricating turbine oils, including such an indicator as the content of dissolved emulsion form of water in these turbine oils [7]. Currently, the method of diagnosing oil-filled thermal-mechanical equipment based on the results of determining the content of diagnostic dissolved gases in turbine oils during their operation in such equipment is widely used. Reliability of the results of determining the dissolved gases content by gas chromatography methods can be achieved by correctly choosing the range of water concentrations in these turbine oils under study, in which there is no significant influence of water content on the results of gas chromatographic measurements.

**Actual scientific researches and issues analysis.** In work [8] there is a list of oil-filled electrotechnical equipment, the technical condition of which can be determined by the results of the analysis of insulating oils using gas chromatography methods from this equipment. It is shown that the control of the equipment, which is not included in the above list, can be carried out based on the results of the analysis by gas chromatography methods of insulating oils by the decision of the technical management of the enterprise to obtain additional results of the technical condition of the equipment.

The rate of entry of external contaminants into energy oils, such as wear products of mating friction pairs, atmospheric dust, etc., in the case of a stable operating mode, for example, a turbine unit, and unchangeable external conditions, is considered constant and independent of the operation of the oil system [7; 9]. Degradation of lubricating oil, especially with a high content of emulsion water, often occurs with the release of gases. The presence of these gases, their concentrations and the rate of their increase can be used to diagnose the technical condition of rubbing surfaces, for example, in bearings [10].

In work [5], using the gas chromatography method, monitoring modes of the physicochemical and thermophysical properties of mineral turbine oil «Tp-30» of the circulating reverse water supply system of evaporative cooling towers of the Rivne NPP were investigated in the process of identifying the causes of bearing failure in an electric pump unit (by detection in this oil dissolved diagnostic gases  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_3\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ). The humidity of this turbine oil complies with established standards and does not exceed 0.03% mass [2].

In work [6], the gas chromatography method was used to determine the content of diagnostic dissolved gases  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  in samples of operational turbine oil «Tp-22s (grade 1)» from the main oil tank of the circulation supply system of a turbine unit with turbine K-210-130-3 and turbogenerator TGV-200M with hydrogen cooling.

However, the moisture content of turbine oil samples is not indicated. The results obtained make it possible to accumulate statistical data for the development of a diagnostic model for determining the technical condition of a hydrogen-cooled turbogenerator when determining the occurrence of thermal or electrical defects in bearings based on the corresponding diagnostic models used for electrical equipment [8].

The work [11] indicates that the mass fraction of sulfur in fresh mineral turbine oils is: for «Tp-22s (grade 1)» – no more than 0.5% mass; for «Agrinol Tp-30» - no more than 0.8% mass; for «Azmol Tp-22s» – no more than 0.5% mass.

This can be used to identify a thermal defect in oil-filled power equipment in the defect zone at  $t = 300$  °C and above, for example, in the contact areas of rubbing surfaces in bearings equipped with a forced circulation system of sulfur-containing mineral turbine oil [5; 14].

At the same time, in [15] it is indicated that the result of determining the  $\text{H}_2\text{S}$  content in liquid media containing water, using the gas chromatography method for gas extraction and using distribution coefficients for  $\text{H}_2\text{S}$ , depends on the pH of liquid media, which in turn affects on the degree of dissociation of  $\text{H}_2\text{S}$  in the proportions of water and on the distribution coefficients for  $\text{H}_2\text{S}$  in equilibrium heterogeneous extraction systems «mineral oil – free water – dissolved dissociated  $\text{H}_2\text{S}$  – gaseous extractant».

In this case, the application of the method of applying  $\text{H}_2\text{S}$  to the analyzed sample of moistened heterogeneous mineral oil can increase the reliability of the results of measuring the content of  $\text{H}_2\text{S}$  in it without using the values of distribution coefficients for  $\text{H}_2\text{S}$  [6].

The work [6] gives the values of the distribution coefficients  $k_i$  for dissolved gases in the «Azmol Tp-22s» mineral turbine oil, but the values of the water concentration  $W$  in this oil are not indicated.

It is known that for diagnostic gases  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  dissolved in dried electrical insulating mineral oils, a change in temperature in the range of 18–25 °C leads to a change in the distribution coefficients in the «electrical insulating mineral oil – dissolved gas – gaseous extractant» within  $\pm 5\%$  relative [16].

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Despite the presence of a large number of studies of methods for diagnosing electrical and thermal mechanical oil-filled equipment based on the results of analyzing samples of energy oils using gas chromatography methods, the nature of the influence of water content in mineral and synthetic fire-resistant turbine oils on the results of analyzes has not been sufficiently studied.

Thus, in order to diagnose oil-filled equipment of nuclear power plants, there is a need to identify the reliability of the results of studying the content of diagnostic dissolved gases using gas chromatography methods in samples of wet mineral and synthetic fire-resistant turbine oils containing dissolved and emulsified water.

**The research objective.** The main goal of the article is to ensure the reliability of the results of the study of the content of diagnostic dissolved gases  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  using gas chromatography methods in samples of wet mineral and synthetic flame-resistant turbine oils for further diagnostics of oil-filled NPP equipment.

**Research objectives:**

1. Improve the mathematical description of the phase equilibrium in the extraction system «wet turbine oil – dissolved gas – gaseous extractant (Ar)».
2. To identify the influence of the concentrations of  $i$ -dissolved gases in wet turbine oils on the value of distribution coefficients for  $i$ -dissolved gases in extraction systems «wet turbine oil – dissolved  $i$ -th gas – gaseous extractant».
3. Identify the influence of water concentrations in wet turbine oils on the value of distribution coefficients for  $i$ -dissolved gases in extraction systems «wet turbine oil – dissolved  $i$ -gas – gaseous extractant».
4. Investigate the solubility of diagnostic gases in dried and wet turbine oils at a temperature of 20 °C.

**The statement of basic materials.** Tested environments: mixtures of diagnostic components ( $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_3H_6$ ,  $C_3H_8$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$ ,  $H_2S$ ) in «Agrinol Tp-46» mineral turbine oil; mixtures of the above diagnostic components, except  $H_2S$ , in synthetic fire-resistant turbine oils «Fyrquel<sup>®</sup>L», «Reolube<sup>®</sup>OMTI», «Reolube<sup>®</sup>46 RS».

When performing research, the following methods are used: a) determination of the humidity of fresh (non-oxidized) turbine oils [2; 17] (coulometric titration); b) determination of the humidity of oxidized turbine oils [2] (calcium hydride; or thermal distillation with a solvent that does not dissolve water); c) gas chromatography determination of: concentrations of dissolved gases in turbine oils, concentrations of gases in gas mixtures, distribution coefficients for dissolved gases in energy oils in the system «turbine oil – dissolved gas – gaseous extractant» [18; 19]; d) titration – to determine the indicator «acid number (AN)» for turbine oils [2; 11]. Before determining the distribution coefficients  $k_i$  for dissolved gases, samples of turbine oils were pre-dried at  $t = 20$  °C using KSM silica gel granules to a final moisture content of  $W \leq 0.005\%$  mass (measurement of  $W$  – according to the method [2; 11]).

The conditions for performing research using gas chromatography methods when determining the content of dissolved gases in turbine oils correspond to the requirements specified in the works [18; 19]. When performing measurements, the following were used: a gas chromatograph with gas dispensers, a methanator (to convert  $CO$  and  $CO_2$  into  $CH_4$ ), a thermal conductivity detector (TCD), a flame ionization detector (FID), a flame photometric detector (FPD), liquid evaporators; device for accelerating the achievement of equilibrium with a rotating drum (DAAB) for placing syringes with a volume of 20  $sm^3$  or 50  $sm^3$  with analyzed samples of turbine oils and gaseous extractants for establishing phase equilibria in systems «turbine oil – gaseous extractant (Ar)» (duration  $\tau_e$  of phase equilibrium with a turbine oil volume of 10  $sm^3$  and a gaseous extractant volume of 10  $sm^3$ , is no less than 1 hour, according to requirements [16]); graduated gaseous mixtures of  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $C_3H_6$ ,  $C_3H_8$ ,  $H_2S$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  in argon; mixtures of turbine oils with distilled water [6].

The measurements were performed at a temperature of  $t_i = (20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$  [18]. In the chromatograph, registration of components was performed with the help of: TCD – for  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ , and FID – for  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_3\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  [18]; FPD – for  $\text{H}_2\text{S}$  [4].

When determining: a) the content of dissolved gases in turbine oils, the following were used: a static version of the gas chromatography measurement method using a gaseous extractant and corresponding variants of methods for analyzing the equilibrium gas phase in the systems «turbine oil – dissolved gas – gaseous extract»; b) the content of dissolved gases in gaseous extracts using appropriate gaseous calibration mixtures – the absolute calibration method was used [18; 19]; c) thresholds for determining the concentrations of dissolved gases in turbine oils and distribution coefficients  $k_i$  – mixtures of gases  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{C}_3\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  in gaseous argon were used at a concentration of each gas greater than 0.5% volume. Oxidation was carried out: mineral turbine oil – according to the method [2; 11]; synthetic fire-resistant turbine oils – according to method [2; 20]. Water is added to turbine oils using the application method [6].

Table 1 shows the quality indicators of the studied fresh and oxidized turbine oils at a moisture content of  $W = 0.005\%$  mass (homogeneous liquid) and  $W = 0.7\%$  mass (heterogeneous liquid).

Table 1 – Quality indicators of the studied turbine oils

Oil condition	Oil condition indicator	turbine oil			
		«Agrinol Тп-46»	«Fyrquel®L»	«Reolube®OMTI»	«Reolube®4 6 RS»
Fresh oil	Moisture contents $W = 0.005\%$ mass or $W = 0.7\%$ mass in oil				
	AN, mg KOH per 1 g of TO	0.45	0.035	0.030	0.032
Oxidized oil	Moisture contents $W = 0.7\%$ mass in oil				
	AN, mg KOH per 1 g of TO	0.65	1.5	1.7	1.6

Source: developed by the authors.

When determining the concentration of  $C_i$ , a dissolved gas in turbine oils using the gas chromatography method, a formula was used to calculate the process of a single isothermal extraction [18; 21]:

$$C_{i,0} = \frac{S_k}{K_g} \left( k_i + \frac{V_e}{V_{e0}} \right), \tag{1}$$

where  $S_k$  – plane of the gas chromatographic peak for the  $i$ -th gas;  $K_g$  – calibration coefficient for a gas chromatograph for the  $i$ -th gas;  $k_i$  – distribution coefficient for  $i$ -gas dissolved in turbine oil;  $V_e$  – extractant volume;  $V_{e0}$  – turbine oil sample volume.

Distribution coefficients  $k_i$  for dissolved gases were determined by gas chromatography by sequential double isothermal extraction of dissolved gas from a sample of turbine oil with equal volumes of pure gaseous extractant and using the calculation formula [21]:

$$k_i = \frac{S_i}{S_2 - S_1} \cdot \frac{V_e}{V_{e0}}, \tag{2}$$

where  $S_1$ ,  $S_2$  are the areas of gas chromatographic peaks for the  $i$ -th gas after its first and second gas extraction with argon.

Determination of the content of dissolved gases in turbine oils using the application method includes the following operations: 1) a known volume of a gaseous pure extractant that does not contain a component is added to a sample of turbine oil with a known volume; 2) perform gas extraction of the  $i$ -th dissolved gas from the volume of turbine oil into the volume of the gaseous extractant; 3) using the gas chromatography method, the content of the  $i$ -th dissolved gas in the volume of the gaseous extractant is determined; 4) to a sample of turbine oil with a

known volume, add a known volume of a gaseous extractant containing the *i*-th dissolved gas with a known content; 5) perform gas extraction of the *i*-th dissolved gas from the volume of turbine oil into the volume of the gaseous extractant; 6) using the gas chromatography method, the content of the *i*-th dissolved gas in the volume of the gaseous extractant is determined; 7) calculate the concentration of the contents of the *i*-th component in the volume of turbine oil according to formula (1).

The mathematical description of phase equilibria in the process of gas extraction of the *i*-th dissolved gas consists in the use of known relationships [21]:

$$C_{i,0} \cdot V_{e0} = C_{i,e0,1} \cdot V_{e0} + C_{i,1,e} \cdot V_e; \tag{3}$$

$$C_{i,0} \cdot V_{e0} + C_{i,d} \cdot V_e = C_{i,e0,2} \cdot V_{e0} + C_{i,2,e} \cdot V_e, \tag{4}$$

where  $C_{i,0}$  is the concentration of the *i*-th dissolved gas in the volume of turbine oil;  $V_{e0}$  is the volume of this turbine oil;  $C_{i,e0,1}$  is the concentration of the *i*-th dissolved gas in the volume of turbine oil after gas extraction with a pure extractant that does not contain the *i*-th dissolved gas;  $V_e$  – volume of added pure extractant;  $C_{i,1,e}$  is the content of the *i*-th dissolved gas in the volume of the gaseous extractant after gas extraction;  $C_{i,d}$  is the concentration of the *i*-th dissolved gas in the volume of the gaseous extractant added to the turbine oil sample;  $C_{i,2,e}$  is the concentration of the *i*-th dissolved gas in the volume of turbine oil after gas extraction with an extractant containing the *i*-th dissolved gas with a known content;  $C_{i,2,e}$  is the content of the *i*-th dissolved gas in the volume of the gaseous extractant after gas extraction.

The formula for calculating the content of the *i*-th dissolved gas  $C_{i,0}$  in the volume of turbine oil, obtained from equations (3) and (4), has the form:

$$C_{i,0} = \frac{V_e}{V_{e0}} \cdot \frac{C_{i,1,e} \cdot C_{i,d}}{C_{i,2,e} - C_{i,1,e}}. \tag{5}$$

The application method does not require determining the distribution coefficients  $k_i$  for the *i*-th dissolved gases.

Experimentally obtained threshold values for determining the concentrations of dissolved gases in turbine oils when performing measurements using gas chromatography methods [18]: 2 ppm – for H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S; 1 ppm – for CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>; 0.5 ppm – for C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>; 5 ppm – for CO, CO<sub>2</sub>. The values of the limit of permissible relative error  $\delta_i$  (% relative for determining the concentrations of dissolved gases  $C_i$  based on the results of the analysis of turbine oils using gas chromatography methods meet the requirements of [18] depending on the range of concentrations of dissolved gases.

Table 2 shows the distribution coefficients  $k_i$  for dissolved gases in turbine oils at  $t = 20$  °C in equilibrium systems «turbine oil – dissolved *i*-th gas – gaseous extractant».

Table 2 – Partition coefficients  $k_i$  for dissolved gases in turbine oils in systems «turbine oil – dissolved gas – gaseous extractant»

Dissolved gases											
CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Distribution coefficients $k_i$ at $t = 20$ °C											
MTO «Agrinol ТП-46», $W = 0.005$ % mass, AN = 0.45 mg KOH per 1 g of fresh MTO											
0.44	2.76	1.80	1.30	8.30	8.80	0.053	0.12	1.18	0.17	0.09	15.2
MTO «Agrinol ТП-46», $W = 0.7$ % mass, AN = 0.65 mg KOH per 1 g of oxidized MTO											
0.42	2.72	1.88	1.40	8.30	8.75	0.05	0.11	1.19	0.17	0.1	15.4
SFRT0 «Fyrquel®L», $W = 0.005$ % mass, AN = 0.0355 mg KOH per 1 g of fresh SFRT0											
0,43	2.60	1.76	1.35	8.20	8.90	0.05	0.12	1.06	0.16	0.10	abs.
SFRT0 «Fyrquel®L», $W = 0.7$ % mass, AN = 1.5 mg KOH per 1 g of oxidized SFRT0											
0,45	2.65	1.70	1.30	8.20	8.70	0.05	0.11	1.18	0.16	0.10	abs.

End of the table 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SFRTO «Reolube®OMTI», W=0.005 % mass, AN = 0.030 mg KOH per 1 g of fresh SFRTO											
0.43	2.74	1.75	1.25	8.25	8.75	0.05	0.12	1.18	0.17	0.09	abs.
SFRTO «Reolube®OMTI», W=0.7 % маси, AN = 1.7 mg KOH per 1 g of oxidized SFRTO											
0.42	2.65	1.75	1.25	8.20	8.60	0.05	0.11	1.17	0.16	0.09	abs.
SFRTO «Reolube®46 RS», W=0.005 % mass, AN = 0.032 mg KOH per 1 g of fresh SFRTO											
0.50	2.70	1.85	1.40	8.40	8.90	0.05	0.11	1.20	0.18	0.10	abs.
SFRTO «Reolube®46 RS», W=0.7 % mass, AN = 1.6 mg KOH per 1 g of oxidized SFRTO											
0.5	2.65	1.80	1.35	8.35	8.80	0,05	0,12	1.2	0.17	0.10	abs.
Water *[21]											
0.0367	0.0514	0.128	1.108	0.216	0.0424	0.0194	0.0249	0.937	0.0334	0.0169	2.792

Notes: abs. – absent; \* – values for comparison

Source: developed by the authors.

From the table 2 it follows that the values of the distribution coefficients  $k_i$  for the corresponding dissolved  $i$ -gases in the studied turbine oils practically do not depend on: the nature of these oils (mineral or fire-resistant synthetic turbine oil) or the water content in them in the range of its concentrations 0.005–0.7% mass; the «acid number» indicator in its range is 0.032–1.7 mg KOH per 1 g of turbine oil.

Table 3 shows the results of a study of the nature of the effect of temperature on the value of distribution coefficients  $k_i$  for H<sub>2</sub>S in the system «turbine oil «Agrinol Tp-46» – dissolved gas H<sub>2</sub>S – gaseous extractant (Ar)» on the gas extraction temperature in the temperature range 15–80 °C.

Table 3 – Dependence of distribution coefficients  $k_i$  for H<sub>2</sub>S in the system «turbine oil Agrinol Tn-46 – dissolved gas H<sub>2</sub>S – extractant» on gas extraction temperature

$t_i, ^\circ\text{C}$	15	20	25	30	40	50	60	70	80
$T_i, \text{K}$	288	293	298	303	313	323	333	343	353
$k_i$	16.1	15.0	14.0	13.1	11.6	10.3	9.2	8.3	7.5
$\gamma_i, \% \text{ rel.}$	7.3	0	- 6.7	- 12.7	- 22.7	- 31.3	- 38.7	- 44.7	- 50.0

Note:  $\gamma_i$  – relative deviations of the values of coefficients  $k_i$  (% rel.) at measured temperatures  $t_i$  from the value  $\gamma_i = 0$  obtained at  $t = 20 ^\circ\text{C}$ .

Source: developed by the authors.

From the table 3 it follows that in the temperature range  $t_i = 15\text{--}25 ^\circ\text{C}$  changes in  $k_i$  values do not exceed 7.3% relative, which is acceptable for technical calculations, and gas extraction of H<sub>2</sub>S from turbine oil «Agrinol Tp-46» with argon gas is recommended to be performed at  $t = 20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ .

In the temperature range  $t_i = 15\text{--}80 ^\circ\text{C}$ , the values of the distribution coefficients  $k_i$  for H<sub>2</sub>S in the system «turbine oil «Agrinol ТП-46» – dissolved gas H<sub>2</sub>S – gaseous extractant», depending on the gas extraction temperature, can be calculated using the empirical formula:

$$\lg k_i = 1184 \cdot T^{-1} - 1.35, \tag{6}$$

where  $k_i$  is the distribution coefficient for H<sub>2</sub>S;  $T_i$  is the gas extraction temperature, K.

Table 4 shows the results of a study of the nature of the effect of temperature on the solubility of  $X_i$  for H<sub>2</sub>S in the system «turbine oil «Agrinol Tp-46» – dissolved gas H<sub>2</sub>S» in the temperature range 15–80 °C. Solubility  $X_i$  for H<sub>2</sub>S is defined as the amount of dissolved volume of H<sub>2</sub>S in one volume of «Agrinol Tp-46» turbine oil.

Table 4 – Dependence of solubility values for H<sub>2</sub>S on temperature in the system «turbine oil Agrinol Tp-46 – dissolved gas H<sub>2</sub>S»

$t_i, ^\circ\text{C}$	15	20	25	30	40	50	60	70	80
$T_i, \text{K}$	288	293	298	303	313	323	333	343	353
$X_i, \% \text{ vol.}$	4.36	4.06	3.79	3.54	3.14	2.79	2.49	2.25	2.03

Source: developed by the authors.

From the table 4 it follows that in the temperature range  $t_i = 15\text{--}25\text{ }^\circ\text{C}$ , an increase in temperature reduces the solubility of  $\text{H}_2\text{S}$  in the «Agrinol Тп-46» mineral turbine oil. In the temperature range  $t_i = 15\text{--}80\text{ }^\circ\text{C}$ , the solubility values  $X_i$  for  $\text{H}_2\text{S}$  in the system «mineral turbine oil «Agrinol Тп-46» – dissolved gas  $\text{H}_2\text{S}$ », depending on temperature, can be calculated using the empirical formula:

$$\lg X_i = 1190 \cdot T_i^{-1} - 2.69, \tag{7}$$

where  $X_i$  is the content of  $\text{H}_2\text{S}$  in turbine oil, the volume of  $\text{H}_2\text{S}$  in one volume of mineral turbine oil;  $T_i$  – temperature, K.

Table 5 shows the results of a study of the solubility of gases ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_3\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ) at  $t = 25\text{ }^\circ\text{C}$  in «Agrinol Тп-46» turbine oils with a moisture content of  $W = 0.005$  mass and «Reolube®46 RS» with moisture content  $W = 0.005\%$  mass.

Table 5 – Solubility of gases in energy oils

Solubility of gases in energy oils, % volume, при $t = 25\text{ }^\circ\text{C}$										
$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_2\text{H}_4$	$\text{C}_2\text{H}_2$	$\text{C}_3\text{H}_6$	$\text{C}_3\text{H}_8$	$\text{H}_2$	$\text{CO}$	$\text{CO}_2$	$\text{O}_2$	$\text{N}_2$
MTO «Agrinol Тп-46», $W = 0.005\%$ mass										
28	270	265	430	1250	2000	6.5	8.5	115	15	9.0
SFRTO «Reolube®46 RS», $W = 0.005\%$ mass										
35	290	290	450	1300	2100	7	9	120	17	10

Source: developed by the authors.

From the table 5 it follows that: the solubility of gases  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_3\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  in turbine oils «Agrinol Тп-46» and «Reolube®46 RS» practically do not depend on the nature of these oils at  $t = 25\text{ }^\circ\text{C}$ . The study of the constancy of the values of distribution coefficients  $k_i$  in a given range of concentrations of  $i$ -th diagnostic gases dissolved in turbine oils was carried out using the method of sequential multiple gas extraction of  $i$ -th gases from turbine oils, which makes it possible to construct a linear dependence  $\lg C_{i,e} = f(n)$ , where  $C_{i,e}$  is the concentration of the  $i$ -th gas in the gas extractant above the turbine oil after the  $n$ -th sequential gas extraction.

In this case, the value of  $k_i$  for the  $i$ -th dissolved gas is calculated according to the formula [21] taking into account the concentrations of dissolved gas in the gas extract above the turbine oil after the first ( $C_1$ ) and after the  $n$ -th ( $C_n$ ) extraction of dissolved gas from the turbine oil at  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ :

$$k_i = \frac{V_e}{V_{e0}} \cdot \frac{(C_n)^{n-1}}{(C_1)^{n-1} - (C_n)^{n-1}}, \tag{8}$$

Figure shows a generalized graph of the results of determining the constancy of the distribution coefficients  $k_i$  for dissolved gases in a sample of synthetic fire-resistant turbine oil «Reolube®46 RS» at its humidity  $W = 0.005\%$  mass (homogeneous liquid).

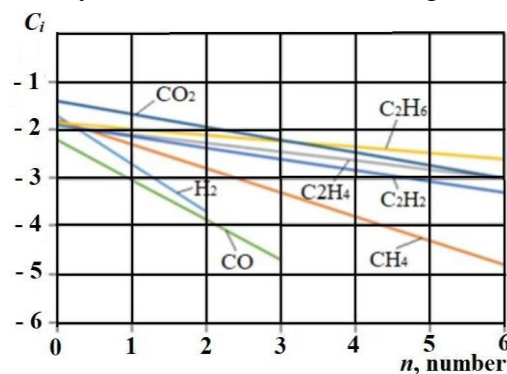


Fig. Graph of the results of determining the constancy of the distribution coefficients for dissolved gases in the «Reolube®46 RS» turbine oil:  $C_i = \lg C_{g,i}$ ;  $C_{g,i}$  concentration of the  $i$ -th gas in the gaseous extractant above the surface of the energy oil, % volume;  $n$  is the number of successive gas extractions after replacing the extractant with its pure portion of the original volume



Similar results were obtained when determining the constancy of the distribution coefficients  $k_i$  for dissolved gases in other studied turbine oils at their humidity  $W = 0.005\%$  mass. The graph practically repeats the results obtained in [6] for the system «mineral transformer oil - dissolved gas - gaseous extractant».

The constancy of the distribution coefficient values in the studied range of measured concentrations of gases dissolved in turbine oils, depending on the number of extractions performed, indicates the possibility of using gas extraction equations (1) and (2) in the studied range of measured concentrations of dissolved gases, as well as the reproduction of phase equilibrium conditions in DAAB.

Table 6 shows the results of a study of the content of dissolved gases in model synthetic fire-resistant turbine oils «Reolube®46 RS» using the application method at  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ .

Table 6 – Results of a study of the content of  $i$ -th dissolved gases in model synthetic fire-resistant turbine oils «Reolube®46 RS» using the application method

Concentration of dissolved gases $C_{i,0}$ , % volume										
CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
SFRTO «Reolube®46 RS», $W = 0.005\%$ mass										
0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.2	0.2	1.0	2.0	5.9
SFRTO «Reolube®46 RS», $W = 0.7\%$ mass										
0.11	0.09	0.11	0.12	0.33	0.28	0.2	0.2	1.1	2.0	5.9
Relative deviation $\gamma_i$ , % relative										
+10	-10	+10	+12	+10	-7.6	0	0	+10	0	0
Note: $\gamma_i$ – relative deviations (% rel.) of $C_{i,0}$ values at moisture content $W = 0.7\%$ mass (heterogeneous liquid) from $C_{i,0}$ values at humidity $W = 0.005\%$ mass (homogeneous liquid) for SFRTO										

From the table 6, it follows that the relative deviations of  $\gamma$  and the values of  $C_{i,0}$  at a moisture content of  $W = 0.7\%$  mass (heterogeneous liquid) in the turbine oil «Reolube®46 RS» from the values of  $C_{i,0}$  at a moisture content of  $W = 0.005\%$  mass (homogeneous liquid) in the turbine oil oils do not exceed the value of 12% relative, which is permissible for performing technical calculations when determining the content of diagnostic dissolved gases in this turbine oil with its humidity in the range of 0.005–0.7% mass.

**Conclusions.**

1. The mathematical description of the phase equilibrium in the extraction system «moistened turbine oil – dissolved  $i$ -th diagnostic gas – gaseous extractant (argon)» has been improved for dissolved diagnostic gases CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>.

2. It has been established that: a) the values of the distribution coefficients  $k_i$  for the corresponding dissolved diagnostic gases in the studied turbine oils are practically independent of the nature of the turbine oils (mineral or fire-resistant synthetic turbine oils), or the water content in them in the range of its concentrations of 0.005–0.7% mass; b) at  $t = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , the solubility of diagnostic gases in energy oils such as mineral transformer oil and in turbine oils «Agrinol Тп-46» and «Reolube®46 RS» practically does not depend on the nature of these energy oils; c) the constancy of the values of the distribution coefficients  $k_i$  in the studied range of measured concentrations of gases dissolved in turbine oils, depending on the number of gas extractions performed, indicates the possibility of using the known gas extraction equation (1) in the studied range of measured concentrations of gases dissolved in turbine oils.

3. The following were studied: a) the nature of the effect of temperature on the value of distribution coefficients  $k_i$  for H<sub>2</sub>S in the system «mineral turbine oil «Agrinol Тп-46» – dissolved gas H<sub>2</sub>S – extractant (argon)» in the temperature range 15–80 °C, and it was found that an increase in temperature leads to a decrease in the distribution coefficients  $k_i$  for H<sub>2</sub>S.

A similar result was obtained when studying the nature of the dependence of H<sub>2</sub>S solubility values on temperature in the system «mineral turbine oil «Agrinol Тп-46» – dissolved H<sub>2</sub>S gas»; b) The content of  $i$ -dissolved gases in the model synthetic fire-resistant turbine oil

«Reolube®46 RS» according to the application method at  $t = 20$  °C, and it is shown that the relative deviations of  $\gamma$  and  $C_{i,0}$  values at moisture content  $W = 0.7\%$  mass (heterogeneous liquid) in turbine oil «Reolube®46 RS» from the values of  $C_{i,0}$  with a moisture content in  $W = 0.005\%$  mass (homogeneous liquid) turbine oil, do not exceed the value of 12% relative, which is acceptable for performing technical calculations when determining the content of diagnostic dissolved gases in this oil with its humidity in the range of 0.005–0.7% mass.

4. The promise of the research results obtained lies in the possibility of their further use to determine the influence of moisture, temperature, thermal, electric and acoustic fields on the degradation of turbine oils for further improvement of the elements of the system for ensuring the reliability of operation of oil-filled equipment of nuclear power plants.

### References

1. OEP "GRIFRE". (2003). *Technical operation of power plants and networks. Rules* (GCD 34.20.507-2003).
2. NAEK "Energoatom". (2020). *Turbine oils for power equipment of nuclear power plants. Rules of operation* (SOU NAEK 085:2020).
3. Gunaza, S.O. (n.d.). *Analiz dosvidu ekspluatatsii turbinnykh olyv u VP AES [Analysis of the experience of operating turbine oils in NPPs]*. <https://www.ntseu.net.ua/docs/gunaza>.
4. Konovalov, V.M., Skritskiy V.Ya., Rokshevskiy V.A. (1976) *Ochistka rabochikh zhidkosti v gidroprivodakh stankov [Cleaning of working fluids in hydraulic drives of machine tools]*. Mashinostroenie.
5. Kuznietsov, P., Tykhomyrov, A., Biedunkova, O., Zaitsev, S. (2022). Improvement of methods for controlling power oil of cooling tower recycling water supply units at Rivne nuclear power plant. *Scientific Horizon*, 25, 12, 69–79. DOI:10.48077/scihor.25(12).2022.69-79.
6. Zaitsev, S.V., Kishnevsky, V.A., Oborsky, G.A., & Prokopovich, I.V. (2019). *Sovremennyye metody kontrolya energeticheskikh masel i produktov ikh degradatsii dlya obespecheniya nadezhnosti ekspluatatsii maslonapolnennogo elektrooborudovaniya elektricheskikh stantsiy i setey [Modern methods for monitoring energy oils and their degradation products to ensure the reliability of operation of oil-filled electrical equipment of power plants and networks]*. Ecology.
7. Gladyshev, G.P., Aminov, R.Z., Gurevich, V.Z. (1991). *Nadezhnost teploenergeticheskogo oborudovaniia TES i AES [Reliability of Heat Power Equipment of TPP and NPP]*. Higher School.
8. OEP "GRIFRE". (2006). *Diagnostics of oil-filled transformer equipment based on the results of chromatographic analysis of free gases taken from the gas relay and gases dissolved in insulating oil* (SOU-N EE 46.501:2006).
9. Lindorf, L.S., Mamikonyants, L.G. (1972). *Ekspluatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniyem [Operation of turbogenerators with direct cooling]*. Energia.
10. Lyashenko, Ya.A. (2011). Tribologicheskaya sistema v rezhime granichnogo treniya pod periodicheskim vneshnim vozdeystviyem [Tribological system in the regime of boundary friction under periodic external influence]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*, 81(6), 125–132.
11. Standart "VEA". (2015). *Energy oils and olive farms of enterprises of the energy sector of Ukraine, and enterprises where similar equipment is used. Organization of operation and maintenance. Norms and requirements* (SOU VEA. 100.1/01:2015).
12. Zaitsev, S.V., Kishnevskiy, V.A., Savich, S.L. (2014). Razrabotka metodov gazokhromatograficheskikh opredeleniy sodержaniy rastvorenykh komponentov v energeticheskikh maslakh [Development of methods of gas chromatographic determinations of dissolved components in energy oils]. *Skhidno-Yevropeys kyy zhurnal peredovykh tekhnolohiy – East-European Journal of Advanced Technologies*. 6/6 (72), 34–42. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.29389.
13. Lipstein, R.A., & Shakhnovich, M.I. (1983). *Transformatornoye maslo [Transformer oil]*. Energoatomizdat.
14. Zaitsev, S., Kyshnevsky, V., Chichenin, V., Tykhomyrov, A. (2020) *Development of methods of gas chromatographic analysis of technological media of the main circulation pumps of a nuclear power plant. East-European Journal of Advanced Technologies*. 6/6(108), 59–70. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.21723.

15. Aranovich, G.I., Korshunov, Yu.N., Lyalikov, Yu.S. (1979). *Spravochnik po fiziko-khimicheskim metodam issledovaniya ob yektov okruzhayushchey sredy [Reference book on physico-chemical methods of investigation of environmental objects]*. Sudostroenie.
16. GNTUEE. (1990). *Methodical instructions on preparation and carrying out of chromatographic analysis of gases dissolved in oil of power transformers* (RD 34.46.303-89).
17. International Standard. (1997). *Insulating liquids – Oil-impregnated paper and pressboard – Determination of water by automatic coulometric Karl Fischer titration*. (IEC 60814:1997).
18. ОЕР "GRIFRE". (2006). *Preparation and conduct of chromatographic analysis of free gases taken from a gas relay and gases dissolved in insulating oil of oil-filled electrical equipment. Methodological instructions* (SOU-N EE 46.302:2006).
19. International Standard. (2011). *Guide for the sampling of gases and of oil from oil-filled electrical equipment and the analysis of free and dissolved gases* (IEC 60567:2011).
20. European Norm. (2013). *Petroleum and related products – Determination of the oxidation stability and corrosivity of fire-resistant phosphate ester fluids* (EN 14832:2013).
21. Witenberg A.G., & Ioffe, B.V. (1982). *Gazovaya ekstraktsiya v khromatograficheskom analize. Parofaznyy analiz i rodstvennyye metody [Gas extraction in chromatographic analysis. Headspace analysis and related methods]*. Chemistry.

### Список використаних джерел

1. ОЕР "GRIFRE". (2003). *Technical operation of power plants and networks. Rules* (GCD 34.20.507-2003).
2. NAEK "Energoatom". (2020). *Turbine oils for power equipment of nuclear power plants. Rules of operation* (SOU NAEK 085:2020).
3. Гуназа, С. О. Аналіз досвіду експлуатації турбінних олів у ВП АЕС [Електронний ресурс] / С. О. Гуназа. – Режим доступу: <chrome-extension://efaidnbmninnbpcajpcglclefindmkaj/https://ntseu.net.ua/wp-content/uploads/2021/08/gunaza.pdf>.
4. Конвалів, В. М. Очищення рідин у гідроприводах станків / В. М. Конвалів, В. Я. Скрицький, В. А. Рокшевський. – Москва : Машиностроение, 1976. – 288 с.
5. Improvement of methods for controlling power oil of cooling tower recycling water supply units at Rivne nuclear power plant / P. Kuznetsov, A. Tykhomyrov, O. Biedunkova, S. Zaitsev // *Scientific Horizon*. – 2022. – Vol. 25, № 12. – Pp. 69–79. DOI:10.48077/scihor.25(12).2022.69-79.
6. Современные методы контроля энергетических масел и продуктов их деградации для обеспечения надежности эксплуатации маслonaполненного электрооборудования электростанций и сетей / С. В. Зайцев, В. А. Кишнеvский, Г. А. Оборский, И. В. Прокопович. – Одесса : Экология, 2019. – 304 с.
7. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС / под ред. А. И. Андрущенко. – Москва : Высшая школа, 1991. – 303 с.
8. ОЕР "GRIFRE". (2006). *Diagnostics of oil-filled transformer equipment based on the results of chromatographic analysis of free gases taken from the gas relay and gases dissolved in insulating oil* (SOU-N EE 46.501:2006).
9. Эксплуатация турбогенераторов с непосредственным охлаждением / под общ. ред. Л. С. Линдорфа, Л. Г. Мамиконянца. – Москва : Энергия, 1972. – 352 с. – 143 р.
10. Ляшенко, Я. А. Трибологическая система в режиме граничного трения под периодическим внешним воздействием / Я. А. Ляшенко // *Журнал технической физики*. – 2011. – № 81. – С. 125-132.
11. Standart "VEA". (2015). *Energy oils and olive farms of enterprises of the energy sector of Ukraine, and enterprises where similar equipment is used. Organization of operation and maintenance. Norms and requirements* (SOU VEA. 100.1/01:2015).
12. Зайцев, С. В. Разработка газохромато-графического метода определения в энергетических маслах ионола и воды методом добавок / С. В. Зайцев // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2015. – № 6/6 (72). – С. 34–42. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.29389.
13. Ліпштейн, Р. А. Трансформаторное масло / Р. А. Ліпштейн, М. І. Шахнович. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.

14. Development of methods of gas chromatographic analysis of technological media of the main circulation pumps of a nuclear power plant / S. Zaitsev, V. Kyshnevsky, V. Chichenin, A. Tykhomyrov // East-European Journal of Advanced Technologies. – 2020. – № 6/6(108). – С. 59–70. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.21723.

15. Аранович, Г. И. Справочник по физико-химическим методам исследования объектов окружающей среды / Г. И. Аранович, Ю. Н. Коршунов, Ю. С. Ляликов. – Л. : Судостроение, 1979. – 648 с.

16. GNTUEE. (1990). Methodical instructions on preparation and carrying out of chromatographic analysis of gases dissolved in oil of power transformers (RD 34.46.303-89).

17. International Standard. (1997). Insulating liquids – Oil-impregnated paper and pressboard – Determination of water by automatic coulometric Karl Fischer titration. (IEC 60814:1997).

18. ОЕР "GRIFRE". (2006). Preparation and conduct of chromatographic analysis of free gases taken from a gas relay and gases dissolved in insulating oil of oil-filled electrical equipment. Methodological instructions (SOU-N EE 46.302:2006).

19. International Standard. (2011). Guide for the sampling of gases and of oil from oil-filled electrical equipment and the analysis of free and dissolved gases (IEC 60567:2011).

20. European Norm. (2013). Petroleum and related products – Determination of the oxidation stability and corrosivity of fire-resistant phosphate ester fluids (EN 14832:2013).

21. Витенберг, А. Г. Газовая экстракция в хроматографическом анализе: Парофазный анализ и родственные методы / А. Г. Витенберг, Б. В. Иоффе. – Л. : Химия, 1982. – 280 с.

Отримано 19.06.2024

УДК 621.314.212.001:621.315.615.2.004

**Сергій Володимирович Зайцев<sup>1</sup>, Віктор Панасович Кишневський<sup>2</sup>,  
Валентин Миколайович Тіхенко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, інженер кафедри атомних електростанцій  
Національний університет «Одеська політехніка», (Одеса, Україна)  
**E-mail:** [sdjavidet@ukr.net](mailto:sdjavidet@ukr.net), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1166-3243>

<sup>2</sup>доктор технічних наук, професор, професор кафедри атомних електростанцій  
Національний університет «Одеська політехніка», (Одеса, Україна)  
**E-mail:** [kishnevskiy@opu.ua](mailto:kishnevskiy@opu.ua), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-1780-2969>

<sup>3</sup>доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри цифрових технологій в інжинірингу  
Національний університет «Одеська політехніка», (Одеса, Україна)  
**E-mail:** [vtikhenko@gmail.com](mailto:vtikhenko@gmail.com), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2804-2838>

## **КОНТРОЛЬ ВМІСТУ РОЗЧИНЕНИХ ГАЗІВ У СВІЖИХ ТА ОКИСНЕНИХ ТУРБІННИХ ОЛИВАХ**

*Стаття є публікацією науково-методичного характеру.*

*Застосування сучасних методів контролю стану оливнонаповненого тепломеханічного обладнання АЕС потребує безперервного удосконалення методів діагностування такого обладнання, в тому числі за результатами контролю вмісту розчинених діагностичних газів, таких як CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, в мінеральних та синтетичних вогнестійких турбінних оливах, у тому числі в гетерогенних системах типу «турбіна олива – розчинений газ – емульсійна вода».*

*Добитися достовірності результатів визначення вмісту діагностичних розчинених газів в турбінних оливах за методами газової хроматографії можна при правильному виборі діапазону концентрацій води в цих досліджуваних турбінних оливах, в якому відсутній значний вплив вмісту води на результати газохроматографічних вимірювань.*

*Аналіз досліджень і публікацій з питань досліджень методів діагностування електротехнічного та тепломеханічного оливнонаповненого обладнання за результатами аналізів проб енергетичних олив методами газової хроматографії показав, що питанням сталого підвищення достовірності результатів визначення вмісту діагностичних розчинених газів у турбінних оливах за методами газової хроматографії на сьогодні приділено мало уваги в науковій літературі.*

*Виявлення характеру впливу вмісту розчиненої та емульсійної води в мінеральних та синтетичних вогнестійких турбінних оливах на результати газохроматографічних аналізів на сьогодні приділено мало уваги в науковій літературі.*

*Метою статті є забезпечення достовірності результатів дослідження вмісту діагностичних розчинених газів H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, за методами газової хроматографії в пробах вологих мінеральних та синтетичних вогнестійких турбінних оливах для подальшого діагностування оливнонаповненого обладнання АЕС.*

*На підставі існуючих методів досліджень, було: удосконалено математичний опис фазової рівноваги в екстракційній системі «волога турбінна олива – розчинений і-й газ – газоподібний екстрагент» для досліджуваних турбінних олив «Арінол Тп-4б», «Fyrquel®L», «Reolube®OMTI», «Reolube®46 RS». За методами газової хроматографії: виявлено*

вплив концентрацій  $i$ -х розчинених газів у вологих турбінних оливах на значення коефіцієнтів розподілу для  $i$ -х розчинених газів в екстракційних системах «волога турбінна олива – розчинений  $i$ -й газ – газоподібний екстрагент»; виявлено вплив концентрацій води у вологих турбінних оливах на значення коефіцієнтів розподілу для  $i$ -х розчинених газів в екстракційних системах «волога турбінна олива – розчинений  $i$ -й газ – газоподібний екстрагент»; досліджено розчинність діагностичних газів в осушених та вологих турбінних оливах при температурі  $20^{\circ}\text{C}$ .

У роботі досліджено: розчинність цих газів в мінеральній турбінній оливі «Агрінол Тп-46» та в синтетичній вогнестійкій турбінній оливі «Reolube<sup>®</sup>46 RS» із вмістом в них води в інтервалі  $0,005$ – $0,7$  % маси при температурі  $25^{\circ}\text{C}$ ; залежність величин розчинності для  $\text{H}_2\text{S}$  від температури в системі «мінеральна турбінна олива – розчинений газ  $\text{H}_2\text{S}$ » в інтервалі температур  $15$ – $80^{\circ}\text{C}$ ; коефіцієнти розподілу розчинених газів в досліджених турбінних оливах при температурі  $20^{\circ}\text{C}$  в системах «турбінна олива – розчинений газ – газоподібний екстрагент»; вміст розчинених газів в модельних синтетичних вогнестійких турбінних оливах «Reolube<sup>®</sup>46 RS» за методом додатку. Це дозволить визначати вміст розчинених газів у вологих турбінних оливах для подальшого діагностування оливонаповненого обладнання.

**Ключові слова:** газова хроматографія; діагностика; ядерна енергетика; коефіцієнт розподілу; розчинність газу.  
Табл.: 6. Рис.: 1. Бібл.: 21.

## РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-2(36)-227-241

УДК 621.316.1

**Андрій Миколайович Лось<sup>1</sup>, Олександр Анатолійович Велігорський<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>аспірант кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** swarika@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1848-3744>. **ResearcherID:** JHS-7999-2023

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри радіотехнічних та вбудованих систем

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** o.veligorskiy@stu.cn.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-8256-7339>. **ResearcherID:** F-3889-2014

### МЕТОДИКА ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЇ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ НА БАЗІ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

У роботі представлена методика вибору технології акумуляторних батарей, які використовуються як джерело живлення автономної системи спостереження на базі безпілотних літальних апаратів. Уперше запропоновано структуру оцінки, яка включає в себе попередній етап відбору та багатокритеріальний етап прийняття рішень для вибору відповідних технологій накопичення енергії за методом Сааті. Уперше висунута концепція структури оцінки яка включає в себе експлуатаційний, технічний та економічний індекси, кожен з яких, в свою чергу, поділяється на окремі складові. Здійснено моделювання вибору технології акумуляторних батарей для автономної системи спостереження, що базується на визначених експертами вагових коефіцієнтах. Результати моделювання показують, що максимальний загальний індекс мають акумуляторні батареї на основі літій-нікель-марганець оксид та літій-нікель-кобальт-алюміній оксид, а отже, вони є найкращими для даної сфери застосування.

**Ключові слова:** акумуляторна батарея; багатокритеріальна модель ухвалення рішень; Сааті; комплексна оцінка ефективності; автономна система спостереження; безпілотний літальний апарат.

Рис.: 6. Табл.: 3. Бібл.: 25.

**Актуальність теми дослідження.** Безпілотні літальні апарати або дрони знаходять дедалі більше сфер застосування, починаючи від відеозйомки свят до застосування як бомбардувальників або дронів-камікадзе. Однією зі сфер застосування, яка з'явилася порівняно нещодавно, є спостереження з метою охорони, моніторингу розповсюдження пожеж та інших стихійних подій, великомасштабних заходів на відкритому повітрі тощо. Таке спостереження може здійснюватися для окремого об'єкта або ж за певною траєкторією, шляхом обмеженого часу або безперервно. В останньому випадку для забезпечення безперервності спостереження необхідно використовувати кілька дронів (групу), яка буде працювати за певним алгоритмом, коли одні дрони будуть висіти в повітрі для моніторингу ситуації, у той час як інші дрони будуть підзаряджатися на землі, та замінювати ті дрони, які в повітрі, коли їх заряд впаде до мінімального рівня, достатнього для повернення на точку підзарядки. Така система безперервного спостереження може працювати від промислової однофазної мережі 220 В 50 Гц або ж трифазної мережі 380 В 50 Гц, яка буде забезпечувати безперервний потік енергії для заряджання дронів. Однак у випадку використання такої системи в зоні бойових дій, у віддалених регіонах без наявної електричної мережі, необхідно забезпечувати автономне живлення системи, яке може бути здійснене шляхом використання додаткових відновлюваних джерел енергії (наприклад, фотоелектричних перетворювачів), та накопичувача енергії (акумуляторної батареї). У такому випадку актуальним завданням є покращення автономності, оптимізація енергозабезпечення та енергоспоживання, а також зменшення масогабаритних показників та вартості.

Враховуючи те, що різні хімічні складові акумуляторних батарей пропонують різні рівні енергетичної щільності, терміни служби, швидкості заряджання та розряджання, а також різні рівні безпеки, задача вибору оптимальної технології акумуляторних батарей є однією з ключових та актуальною для досягнення оптимальної продуктивності,

економічної ефективності й довговічності системи зберігання енергії, а також підтримки стабільності експлуатації системи безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів.

**Постановка проблеми.** Узагальнена концепція автономної системи безперервного спостереження за допомогою безпілотних літальних апаратів (дронів) включає в себе три підсистеми (рис. 1):

1. Підсистема керування та контролю виконання місій дронами.

Основними завданнями системи є:

- розрахунок необхідної кількості дронів, яку необхідно запустити для виконання місії, а саме – для забезпечення безперервного спостереження;
- ретрансляція каналу керування та передачі даних до користувача;
- оптимізація режимів зарядки акумуляторних батарей дронів з метою найбільш ефективного виконання завдання.

2. Підсистема забезпечення автономності.

Основним завданням системи є забезпечення підсистеми забезпечення живленням достатню кількість енергії з урахуванням тривалих перебоїв. У більшості випадків, для досягнення автономності системи, використовуються відновлювані джерела електричної енергії – фотоелектричні перетворювачі, вітрогенератори.

3. Підсистема забезпечення живленням.

Основним завданнями підсистеми забезпечення живленням є доставка достатньої кількості енергії до підсистеми керування та контролю виконання місій дронами з урахуванням гнучкості системи в напрямку збереження необхідних характеристик безперервного спостереження в цілому. Така підсистема базується на акумуляторних батареях, які накопичують заряд від підсистеми забезпечення автономності, у той час коли виробленої відновлюваними джерелами енергії більше, ніж потрібно для підзарядки дронів, та віддають його, коли такої енергії недостатньо.

Окремо від системи слід виділити пульт керування та контролю користувача, який може включати в себе декілька систем моніторингу, яка існує для узагальнення та керівництва місіями.

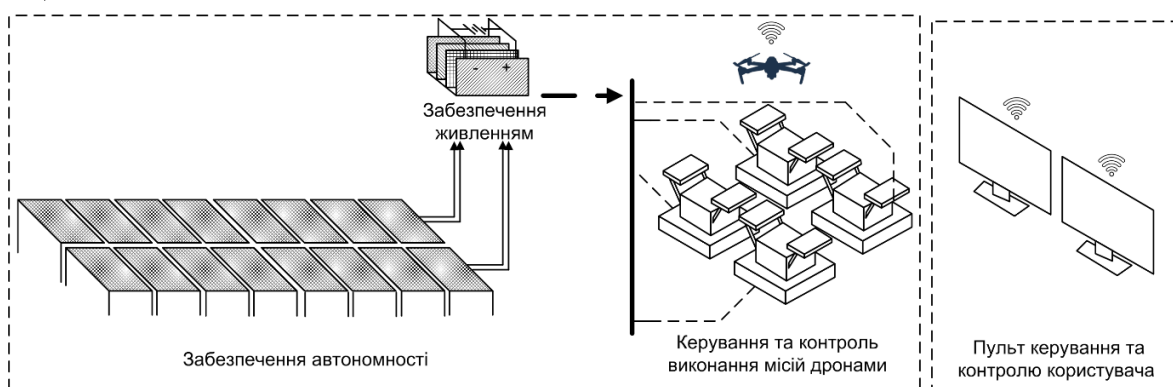


Рис. 1. Узагальнена концепція автономної системи безперервного спостереження за допомогою дронів

Джерело: розроблено авторами.

Враховуючи те, що ключовим елементом у такій системі є акумуляторні батареї, саме від їх вибору залежать техніко-економічні показники автономної системи безперервного спостереження. Постійне вдосконалення електрохімічних джерел енергії, для яких досягаються дедалі більш високі результати в ефективності та безпечності, спонукає багатьох дослідників до розроблення методик порівняння та вибору технологій акумуляторних батарей. Станом на сьогодні є кілька основних груп акумуляторних батарей, які умовно

можна назвати свинцевими, нікелевими, літійовими (за основним матеріалом, який входить до складу батареї), та окремо виділити групу перспективних технологій, які ще не знайшли значного поширення.

З огляду на вищевикладене, станом на зараз є актуальним питання вибору технології акумуляторних батарей для використання як елемент накопичення енергії в системах безперервного спостереження на основі дронів, оскільки саме це впливає на основні техніко-економічні показники системи живлення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням побудови моделей та вибору найкращих технологій акумуляторних батарей як накопичувачів енергії для систем електроживлення різноманітних застосувань науковцями з усього світу приділяється значна увага. Серед значної кількості опублікованих робіт, варто виділити такі отримані результати.

Однією з найбільших станом на сьогодні сфер застосування акумуляторних батарей є *електромобілі*. У роботі [1] авторами було запропоновано метод оцінювання акумуляторних батарей для електромобілів, заснований на нейромережі та параметрах що надали виробники акумуляторних батарей. У статті [2] авторами виділені критерії для оцінки акумуляторних технологій, які використовуються як накопичувач електроенергії в електромобілях та проведено їх техніко-економічне порівняння. У продовження цього питання автори дослідження [3] також розглянули різні технології батарей, у тому числі перспективних, та навели результати порівняльного аналізу, де встановили, що для електромобіля в сучасних умовах найбільш доцільним є використання літій-іонних батарей, однак у найближчому майбутньому вони можуть бути замінені на перспективні, такі як твердотілі та кремнієві акумуляторні батареї. У дослідженні [4] фокус дослідження полягає у хімічному складі основних типів акумуляторних батарей з погляду їх застосування в електромобілях, а також задачах моніторингу та керування процесом розрядки та зарядки таких батарей.

Ще однією сферою застосувань акумуляторних батарей як джерела енергії для основного рушія, є *водні транспортні засоби*. У статті [5] авторами було порівняно основні типи акумуляторних батарей з погляду їхніх хімічних властивостей, ємності, об'ємів, ваги, енергії, питомої енергії, вартості та життєвого циклу за методом TOPSIS, і вибирається найкраща батарея для гібридних рушіїв кораблів. За результатами порівняння було встановлено, що найкращими для такого застосування є літій-залізо-фосфатні акумуляторні батареї.

Значним сегментом застосувань акумуляторних батарей є *системи зберігання енергії у складі електричних систем* (зокрема, мікро- та наномереж). Так, у дослідженні [6] пропонується багатокритеріальна модель ухвалення рішень, яка поєднує підхід нечіткої логіки для створення комплексної системи оцінки технологій акумуляторних батарей для мікромереж, які складаються з вітрогенераторів, фотоелектричних перетворювачів та акумуляторних батарей. За результатами застосування даного методу було встановлено, що найкращими для такої сфери застосувань є літій-іонні акумулятори. На відміну від попередньої роботи, автори статті [7] розглянули можливі технології акумуляторних батарей для накопичувачів енергії у складі мікромереж з погляду мінімальної вартості всієї системи. У свою чергу, автори роботи [8] провели огляд існуючих і нових технологій акумуляторних батарей для великомасштабних накопичувачів енергії, які повинні стати альтернативою гідроакумулятивним електростанціям. Авторами зроблено висновок, що найкращими для такого застосування є натрієві та літій-іонні акумулятори, а нові перспективні типи з високою щільністю енергії все ще не можуть бути застосовані. У дослідженні [9] авторами було проведено порівняльний аналіз гібридної системи електрифікації сільської місцевості в Індії з різними системами резервного накопичення енергії для мікромережі села Коркаду, штат Пудучеррі, Індія, та встановлено, що для такої сфери застосувань



найкращими є літій-іонні акумуляторні батареї. Робота [10] містить моделювання ефективності з'єднаної з мережею системи накопичення електричної енергії на різних типах акумуляторних батарей, та робляться висновки про оптимальне рішення. У дослідженні [11] виконано імітаційну модель і техніко-економічний аналіз літій-іонних і свинцево-кислотних акумуляторів, інтегрованих у фотоелектричну систему, з'єднану з мережею, з урахуванням реальних комерційних профілів навантаження та даних про ресурси. Авторами встановлено, що літій-іонні акумулятори забезпечують нижчу вартість електроенергії в такій системі, що є їх перевагою. Варто також відзначити дослідження [12], де представлено методологію оцінки техніко-економічних показників підключеної до мережі системи зі зберіганням електроенергії за тарифом на електроенергію та часом використання, та встановлено, що й літій-іонні, і свинцево-кислотні батареї поки не можуть бути економічно вигідними в таких системах, однак літій-іонні мають певну перевагу.

Таким чином, проведений аналіз останніх досліджень та публікацій за темою порівняльного аналізу різних технологій акумуляторних батарей в основних сферах їх застосування свідчить про те, що подібна задача вже вирішена, зокрема, для електромобілів, водних транспортних засобів, енергетичних систем з накопичувачами електричної енергії, та мікромереж. За результатами огляду встановлено, що науковцями вже запропоновано різні методи оцінки, включаючи такі, що базуються на нейронних мережах, математичному апараті нечіткої логіки, багатокритеріальних моделях прийняття рішень та техніко-економічному аналізу. Отже, ці результати досліджень надають комплексне розуміння різноманітних критеріїв, які можуть бути використані у процесі відбору, а також прокладають шлях для майбутніх досліджень у сферах інтеграції накопичувачів енергії на базі акумуляторних батарей, зокрема, для відновлюваної енергетики, підкреслюючи важливість розгляду як технічних, так і економічних факторів акумуляторних батарей для ефективного прийняття рішень у плануванні та реалізації автономної енергетичної системи.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Варто зауважити, що аналіз останніх публікацій говорить про те, що хоча й розробці методик вибору технологій акумуляторних батарей для різних застосувань вже присвячена значна увага науковців та запропоновано певні рішення, невирішеними все ще наступні частини проблеми. У роботах [2; 5] основними критеріями методики вибору авторами виділено ціну батареї, значення ваги та об'єму. Однак ці критерії оцінки не включають у себе такі важливі параметри, як, зокрема, безпека застосування, а також вартість експлуатації. У дослідженні [12] найважливішими параметрами системи виділено вартість придбання акумуляторної батареї та кількість циклів до виходу з ладу, які визначають вартість придбання батареї на кВт·г циклу, проте не проаналізовано інші важливі показники системи. Найбільш повним є метод, запропонований у дослідженні [6], де система індексів для методу вибору містила три якісних підкритерії (технологічні, економічні та соціальні), а значення ефективності за ними визначалися висновками експертів. Однак усі зазначені результати отримані або для підключених до мережі електричних систем із накопичувачами енергії, або для таких автономних систем, як транспортні засоби. Отже, питання розробки комплексної методики вибору акумуляторних батарей та її застосування для акумуляторних батарей у складі джерел живлення автономних систем спостереження на базі безпілотних літальних апаратів, які мають низку принципових відмінностей від розглянутих вище, станом на зараз не вирішене. Крім цього, аналіз джерел вказує на необхідність додаткового врахування параметрів безпеки застосування, вартості експлуатації, значення ефективності в аспектах енергозбереження та екологічних викидів для повнішої оцінки акумуляторних батарей в автономних системах загалом.

**Мета статті** полягає в розробці комплексної багатокритеріальної методики оцінювання для вибору технологій акумуляторних батарей, які застосовуються як джерело енергії для автономних систем спостереження на базі безпілотних літальних апаратів.

**Виклад основного матеріалу.** Запропонована методика оцінки та вибору технологій акумуляторних батарей для застосування їх у складі автономних систем спостереження на базі безпілотних літальних апаратів складається з двох етапів. На першому етапі (етап попереднього відбору) здійснюється відсіювання тих технологій акумуляторних батарей, які не підходять для системи, оскільки не задовольняють найбільш важливим критеріям. На другому етапі здійснюється порівняння всіх тих технологій, які пройшли попередній етап, а отже, можуть бути використані в системі.

### I етап - попередній відбір.

Автономні системи спостереження на базі безпілотних літальних апаратів мають критичні обмеження щодо забезпечення мобільності, а саме щодо максимальної допустимої ваги та об'єму батареї. Для визначення впливу критичних обмежень на систему пропонується використовувати два критерії, а саме мінімальне значення щільності енергії ( $S_{e.min}$ ) та мінімальне значення питомої ваги енергії ( $E_{d.max}$ ). Розрахунок базується на використанні максимальних допустимих значень ваги ( $m_{max}$ ) та об'єму ( $v_{max}$ ) для системи за формулами (1) та (2):

$$S_{e.min} = \frac{E}{m_{max}}; \quad (1)$$

$$E_{d.max} = \frac{E}{v_{max}}; \quad (2)$$

де  $E$  – загальна необхідна енергія для роботи системи впродовж визначеного проміжку часу, Вт\*г.

### II етап - багатокритеріальний відбір.

Після здійснення відсіювання тих технологій акумуляторних батарей, які не задовольняють базовим вимогам до системи, необхідно здійснити порівняння всіх попередньо відібраних технологій. Для цього пропонується методика вибору, побудована на багатокритеріальному порівнянні за допомогою методу розрахунку вектора вагових коефіцієнтів за основним методом Сааті [13]. Цей метод не дозволяє групувати критерії для розуміння впливу на систему безперервного моніторингу кожного з них. Враховуючи наведене, було виконано розподілення критеріїв оцінювання та введено індекс для кожного типу батареї за формулою:

$$I_{bat} = E_i + T_i + P_i, \quad (3)$$

де  $E_i$  – експлуатаційний індекс;  $T_i$  – технічний індекс;  $P_i$  – економічний індекс;  $I_{bat}$  – загальний індекс технології акумуляторної батареї.

Кожен із трьох індексів являє собою критерій, значення якого відповідає сумі добуток вагових коефіцієнтів ( $w_i$ ), та величини критерію. Кожен критерій визначається залежно від впливу на систему безперервного моніторингу.

Для забезпечення коректного порівняння показників, які мають різні одиниці виміру, кожен показник індексу нормалізується до діапазону значень від 0 до 1, нормалізоване значення показника критерію визначається за формулою:

$$N_i = \frac{i_n - i_{min}}{i_{max} - i_{min}}, \quad (4)$$

де  $I_n$  – значення показника;  $i_{min}$  – мінімальне значення показника;  $i_{max}$  – максимальне значення показника.

*Експлуатаційний індекс  $E_i$*  відповідає за фактори батареї, які змінюються залежно від умов експлуатації автономних систем спостереження, та враховує показники:

– діапазон робочих температур  $T_r$ , який повинен враховувати можливості системи безперервного моніторингу функціонувати як у зимну, так і в літню пору року в різних кліматичних умовах;

- показник безпечності  $S_s$ , повинен враховувати можливі випадки аварійного стану батареї через який може статися займання, задимлення або вибух;
- показник саморозряду  $\eta$ , повинен враховувати вплив на батарею довгого невикористання, що призводитиме до зменшення ємності шляхом саморозряду через процеси в середині батареї або на її поверхні.

Експлуатаційний індекс розраховується за запропонованою нижче формулою:

$$E_i = T_r \cdot w_{Tr} + S_s \cdot w_{ss} + \eta \cdot w_{\eta} \quad (5)$$

Для визначення діапазону робочих температур  $T_r$  пропонується використовувати різницю між максимальною  $T_{\max}$  та мінімальною  $T_{\min}$  експлуатаційними температурами, відповідно, за формулою:

$$T_r = T_{\max} - T_{\min} \quad (6)$$

Показник безпечності  $S_s$  є комплексним показником, базуючись на аналізі публікацій, спрямованих на тему безпечності акумуляторних батарей [14-21]. У складі цього показника пропонується врахувати максимальний час безпечної зарядки  $T_s$ , максимальну швидкість розрядки  $T_{sd}$ , максимальну потужність зарядки  $P_{mc}$ . Показник безпечності пропонується розраховувати за формулою:

$$S_s = T_s + T_{sd} + P_{mc} \quad (7)$$

Для визначення показника саморозряду  $\eta$  пропонується використовувати метод визначення необоротних та оборотних втрат ємності батареї, запропонований у [22]:

$$\eta = \frac{C - C_1}{C} \cdot 100\%, \quad (8)$$

де  $C$  – номінальна ємність батареї, Вт\*г;  $C_1$  – ємність розряду, Вт\*г.

Розрахунок експлуатаційного індексу дозволяє отримати дані щодо стійкості батареї до змінних зовнішніх умов експлуатації, технічної досконалості, а також безпечності експлуатації в заданих умовах. У системі безперервного моніторингу експлуатаційний індекс має одне з найважливіших значень, оскільки визначає можливість безперервного використання системи протягом тривалого часу без погіршення її експлуатаційних характеристик та технічних відмов.

Технічний індекс  $T_i$  відповідає за фактори які впливають на технічні характеристики (специфікацію) системи безперервного моніторингу, він враховує показники:

- питомої енергії  $S_e$ , який відповідає за кількість накопиченої в батареї енергії на одиницю ваги батареї;
- показник щільності енергії  $E_d$ , який відповідає за кількість накопиченої в батареї енергії на її об'єм;
- показник життєвого циклу  $L$ , який відповідає максимальну тривалість безперервного використання батареї (цикли “заряд”-”розряд”) в роках;
- показник стабільності номінальної ємності при зміні температури навколишнього середовища  $S_t$ .

Технічний індекс розраховується за наступною запропонованою формулою:

$$T_i = S_e \cdot w_{se} + E_d \cdot w_{ed} + L \cdot w_l + S_t \cdot w_{st} \quad (9)$$

Показник питомої енергії та щільності енергії розраховуються за формулами:

$$S_e = \frac{E}{m}, \quad (10)$$

де  $E$  – кількість накопиченої енергії, Вт\*г;  $m$  - вага батареї, кг,

$$E_d = \frac{E}{l}, \quad (11)$$

де  $l$  – об'єм батареї, м<sup>3</sup>.

Показник життєвого циклу  $L$  розраховується за формулою (12), і залежить від часу заряджання  $C_r$ , розряджання  $D_r$  та гарантійної кількості робочих циклів батареї  $C_l$ . Загальна інформація про життєвий цикл акумуляторної батареї наведена у [23- 25].

$$L = (C_r + D_r) \cdot C_l. \quad (12)$$

Показник стабільності номінальної ємності при зміні температури навколишнього середовища розраховується як температурний коефіцієнт ємності акумуляторної батареї за такою формулою:

$$S_t = \frac{\Delta C}{C_0 \cdot \Delta T} \cdot 100\%, \quad (13)$$

$$\Delta C = C_0 - C_1, \quad (14)$$

$$\Delta T = T_0 - T_1, \quad (15)$$

де  $C_0$ ,  $C_1$  – ємність при  $T_0$  та  $T_1$ , Вт\*г  $T_0$ ,  $T_1$  – поточна (мінімальна) та еталонна температура навколишнього середовища, С.

Розрахунок технічного індексу дозволяє, серед іншого, оцінити об'єктивну інформацію щодо майбутніх розмірів системи безперервного моніторингу та скільки часу система зможе функціонувати в заданих умовах. Для нашої системи технічний індекс може бути пріоритетним над іншими в зв'язку з вимогами щодо мобільності і довготривалості експлуатації.

*Економічний індекс* відповідає за вплив ціни акумуляторної батареї, тобто впливає на загальний бюджет побудови системи, і, відповідно, на можливість реалізації концепції взагалі, та враховує показники:

- вартості батареї  $C_b$ , яка безпосередньо впливає на вартість системи, оскільки ціна батареї може бути головною статтею витрат на побудову системи безперервного моніторингу;
- вартості обслуговування батареї  $C_s$ , показник опосередковано впливає на можливості системи безперервного моніторингу щодо автономності.

Економічний індекс розраховується за такою запропонованою формулою:

$$P_i = C_b \cdot w_{cb} + C_s \cdot w_{cs}. \quad (16)$$

Дані щодо вартості батареї отримуються від виробника, однак вартість обслуговування не наводиться виробником, і тому розраховується індивідуально. Вартість обслуговування в більшій частині залежить від віддаленості системи безперервного моніторингу та якості виконання збірки акумуляторного блоку, можливості заміни окремих елементів у випадку виходу їх з ладу тощо.

Таким чином, II етап дозволяє здійснити багатокритеріальне порівняння можливих варіантів технологій акумуляторних батарей на основі розрахунку розподілених критеріїв оцінки для розуміння впливу на систему кожного з них.

Запропонована методика дозволяє врахувати всі основні техніко-економічні показники акумуляторних батарей, такі як стійкість батареї до змінних зовнішніх умов експлуатації, технічну досконалість, безпечність експлуатації, оцінити відносні майбутні розміри системи безперервного моніторингу. Одночасно методика також враховує показник життєвого циклу, що дозволяє оцінити час функціонування системи безперервного моніторингу в заданих умовах, а також вартість батареї та її обслуговування. Такий підхід є досить ефективним інструментом для аналізу різних акумуляторних батарей.

### **Застосування запропонованої методики оцінки для вибору технології акумуляторних батарей**

#### *Попередній відбір.*

Відповідно до першого етапу вибору виконаємо попередній відбір технологій акумуляторних батарей для їхньої роботи у складі джерел живлення автономних систем спостереження на базі безпілотних літальних апаратів. Спроектowana система спостереження виключає можливість збільшення ваги акумуляторної батареї понад 300 кг, а

об'єму 0,12 м<sup>3</sup>. Крім цього, за результатами попередніх розрахунків, які виходять за межі цієї публікації та очікують публікації, встановлено, що необхідна кількість енергії для автономної системи безперервного спостереження становить 25687,3 Вт\*г. Таким чином, отримано значення  $S_{e\_min}$  та  $S_{d\_max}$ :

$$S_{e\_min} = \frac{E}{m_{max}} = \frac{25687,3}{300} \approx 85,5, \text{ В}\cdot\text{г/кг}; \tag{17}$$

$$E_{d\_max} = \frac{E}{v_{max}} = \frac{25687,3}{120} \approx 214, \text{ В}\cdot\text{г/кг}. \tag{18}$$

Використовуючи бази даних про технології акумуляторних батарей [1; 2; 3], на першому етапі методики було виключено ті технології батарей (позначені червоним), які не відповідають за критичними показниками для забезпечення живлення системи безперервного спостереження. Дані відображені на рис. 2 та 3 відповідно.

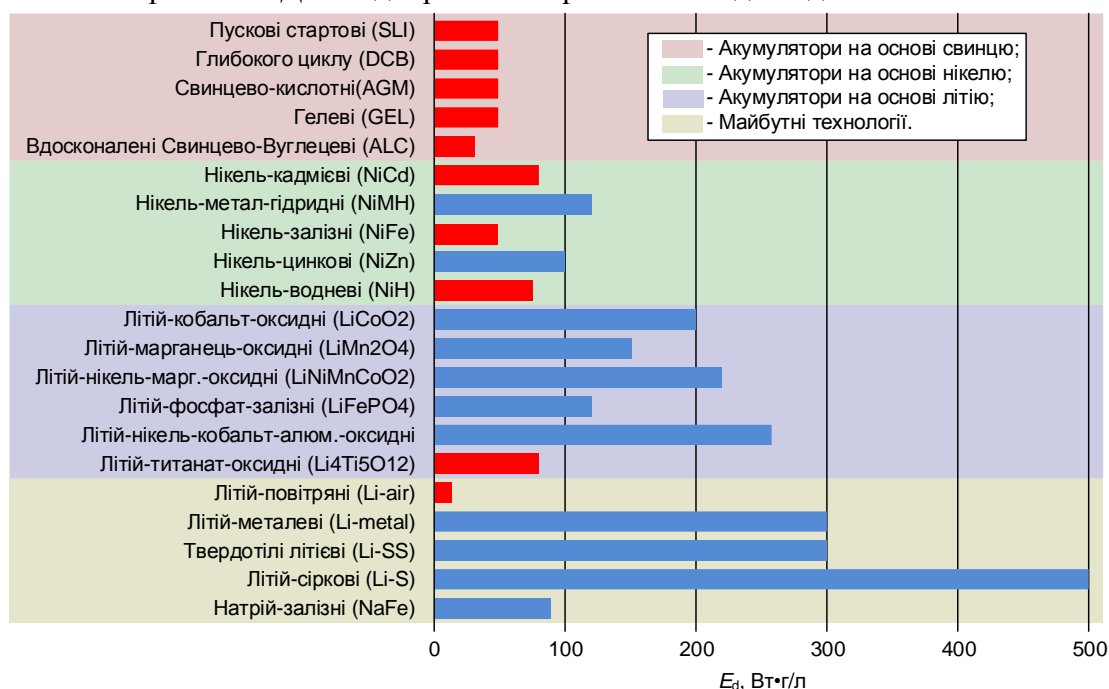


Рис. 2. Значення щільності енергії, В\*г/кг

Джерело: розроблено авторами.

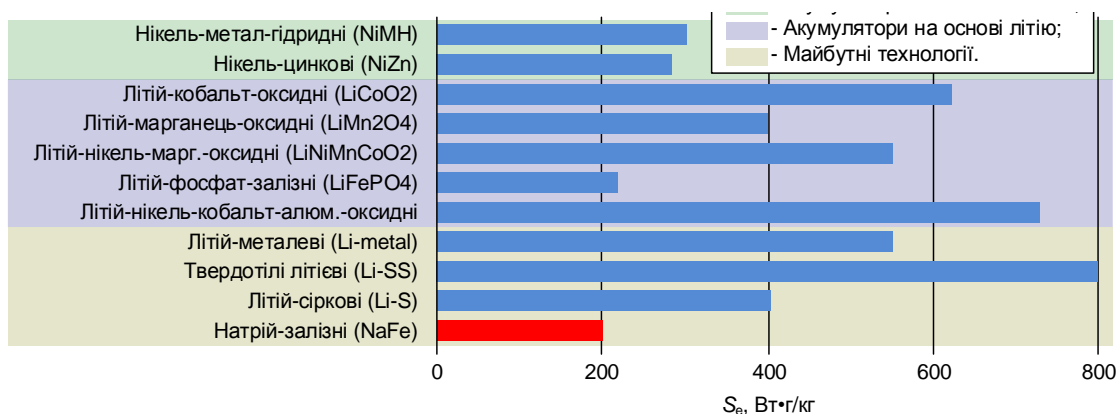


Рис. 3. Значення питомої ваги енергії, В\*г/кг

Джерело: розроблено авторами.

Значення щільності енергії та питомої ваги енергії є наближеними до реальних і можуть змінюватися залежно від конкретного хімічного складу, технології виробництва та інших факторів.

Отримані результати попереднього відбору, згруповані за технологіями, наведені в табл. 1, вони показують, що літєві акумуляторні батареї в більшості є прийнятними для використання, оскільки забезпечують мінімально необхідні технічні показники, в той час, як свинцеві взагалі не підходять для системи безперервного спостереження.

Таблиця 1 – Результати попереднього відбору

Нікелеві	Літєві	Свинцеві	Майбутні
NiMH	LiCoO2	—	Li-metal
NiZn	LiMn2O4	—	Li-S
—	LiNiMnCoO2	—	Li-SS
—	LiFePO4	—	—
—	LiNiCoAlO2 (NCA)	—	—

Джерело: розроблено авторами.

*Застосування багатокритеріального відбору*

Враховуючи те, що для певних перспективних технологій акумуляторних батарей, таких як **літій-металеві** та **натрій-іонні**, у відкритих джерелах станом на зараз відсутня об'єктивна інформація щодо їх параметрів та показників, їх також усунуто від подальшого порівняння. З появою нових даних дана методика повинна бути застосована ще раз, що може призвести у майбутньому до зміни найбільш прийнятної технології для даної сфери застосувань.

Для встановлення вагових коефіцієнтів у методиці було застосовано метод експертних оцінок, результати наведені табл. 2 та нанесено на діаграму (рис. 4).

Таблиця 2 – Вагові коефіцієнти показників

$E_i$		$T_i$		$P_i$	
$w_{tr}$	0,03	$w_{se}$	0,32	$w_{sb}$	0,1
$w_{ss}$	0,23	$w_{ed}$	0,09	$w_{cs}$	0,02
$w_{\eta}$	0,04	$w_l$	0,06	-	-
-	-	$w_{st}$	0,11	-	-

Джерело: розроблено авторами.

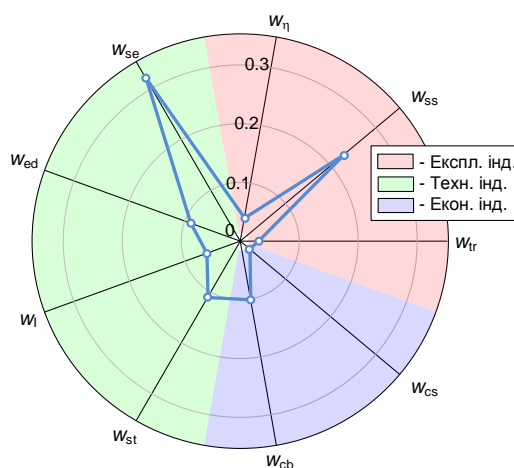


Рис. 4. Дані вагових коефіцієнтів

Джерело: розроблено авторами.

Пріоритет надано показнику питомої енергії з коефіцієнтом 0,32 та показнику безпеки з коефіцієнтом 0,23. Таким чином забезпечуються основні вимоги до системи в мінімальній вазі та максимальній безпеці. Розподіл значень показників по технологіях акумуляторних батарей надано в табл. 3.

За допомогою розробленої методики оцінки, та за результатами моделювання, отримуються значення сум індексів. Чим вище значення суми індексів, тим краще технологія підходить для використання в системі безперервного моніторингу, враховуючи розподіл вагових коефіцієнтів показників, що оцінювались.

Таблиця 3 – Диференційний розподіл значень показників

Параметр	NiMH	NiZn	LiCoO <sub>2</sub>	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	LiNiMnCoO <sub>2</sub>	LiFePO <sub>4</sub>	NCA
$T_r, C$	65	70	80	80	80	95	80
$T_r, p.u.$	0	0,167	0,5	0,5	0,5	1	0,5
$T_r \cdot w_{Tr}$	0	0,005	0,015	0,015	0,015	0,03	0,015
$S_s$ (коефіцієнт)	18	9	9	9	9	16	9
$S_s, p.u.$	1	0	0	0	0	0,778	0
$S_s \cdot w_{ss}$	0,23	0	0	0	0	0,179	0
$\eta$ (% на місяць)	15	30	2	2	2	2	2
$\eta, p.u.$	0,464	1	0	0	0	0	0
$\eta \cdot w_\eta$	0,019	0,04	0	0	0	0	0
$E_i$	0,249	0,045	0,015	0,015	0,015	0,209	0,015
$S_e, Вт \cdot г/кг$	120	150	200	150	220	120	220
$S_e, p.u.$	0	0,3	0,8	0,3	1	0	1
$S_e \cdot w_{se}$	0	0,096	0,256	0,096	0,32	0	0,32
$E_d, Вт \cdot г/л$	300	250	620	400	550	220	730
$E_d, p.u.$	0,157	0,059	0,784	0,353	0,647	0	1
$E_d \cdot w_{ed}$	0,014	0,005	0,071	0,032	0,058	0	0,09
$L, днів$	500	300	1000	700	2000	2000	500
$L, p.u.$	0,118	0	0,412	0,235	1	1	0,118
$L \cdot w_L$	0,007	0	0,025	0,014	0,06	0,06	0,007
$S_t$ коэф.	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3
$S_t, p.u.$	0	0,5	1	0,5	1	0,5	1
$S_t \cdot w_{st}$	0	0,055	0,11	0,055	0,11	0,055	0,11
$T_i$	0,021	0,156	0,461	0,197	0,548	0,115	0,527
$C_b, y.o. \cdot кВт \cdot г$	300	400	600	500	700	500	800
$C_b, p.u.$	0	0,2	0,6	0,4	0,8	0,4	1
$C_b \cdot w_{cd}$	0	0,02	0,06	0,04	0,08	0,04	0,1
$C_s, y.o. \cdot кВт \cdot г$	150	200	300	250	350	250	400
$C_s, p.u.$	0	0,2	0,6	0,4	0,8	0,4	1
$C_s \cdot w_{cs}$	0	0,004	0,012	0,008	0,016	0,008	0,02
$P_i$	0	0,024	0,072	0,048	0,096	0,048	0,12
$I_{bat}$	0,27	0,225	0,548	0,26	0,659	0,372	0,662

Джерело: розроблено авторами.

Результати моделювання наведено на рис. 5.

Як видно з рис. 5, нікель-метал-гідридні акумуляторні батареї (NiMH) є найкращими для нашого застосування з погляду експлуатаційного індексу, у якому визначальним є показник безпечності. Літій-кобальт-оксидні (LiCoO<sub>2</sub>), літій-марганцевий-оксидні (LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), літій-нікель-марганцево-оксидні (LiNiMnCoO<sub>2</sub>), літій-нікель-кобальт-алюміній-оксидні (NCA) акумуляторні батареї – за експлуатаційним індексом показали себе найгірше. Дані щодо безпечності NiMH акумуляторних батарей вказують на їхню стабільність та високу стійкість до неконтрольованого теплового розповсюдження вогню в порівнянні з іншими технологіями.

За відомостями, представленими на рис. 5, літій-нікель-марганцево-оксидні акумуляторні батареї (LiNiMnCoO<sub>2</sub>) та літій-нікель-кобальт-алюміній-оксидні акумуляторні батареї (NCA) видаються найбільш відповідними для нашого застосування з урахуванням технічного індексу, який базується на показнику питомої енергії. Літій-фосфат-залізни

(LiFePO<sub>4</sub>) та нікель-метал-гідридні (NiMH) акумуляторні батареї - мають найнижчі показники питомої енергії, що впливає на безпосередньо вагу акумуляторної батареї, що є одним з найважливіших критеріїв при виборі відповідної технології для автономної системи.

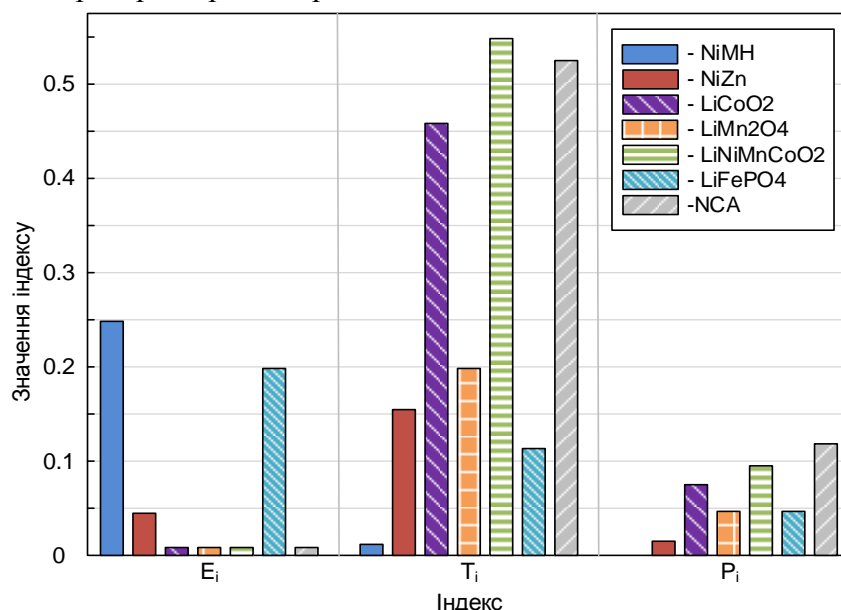


Рис. 5. Результати моделювання

Джерело: розроблено авторами.

Як можна помітити на рисунку 5 літій-нікель-кобальт-алюміній-оксидні акумуляторні батареї (NCA) та літій-нікель-марганцево-оксидні акумуляторні батареї (LiNiMnCoO<sub>2</sub>) мають найвищий економічний індекс безпосередньо на нього найбільше впливає показник ціни батареї. Найнижчим показником ціни і відповідно найдорожчими є нікель-метал-гідридні (NiMH) акумуляторної батареї.

Результати моделювання (рис. 6) показують, що максимальний загальний індекс батареї (суми окремих індексів) мають літійо-нікелево-марганцеві оксидні акумуляторні батареї (LiNiMnCoO<sub>2</sub>) та літійо-нікелево-кобальтово-алюмінієві оксидні акумуляторні батареї (NCA).

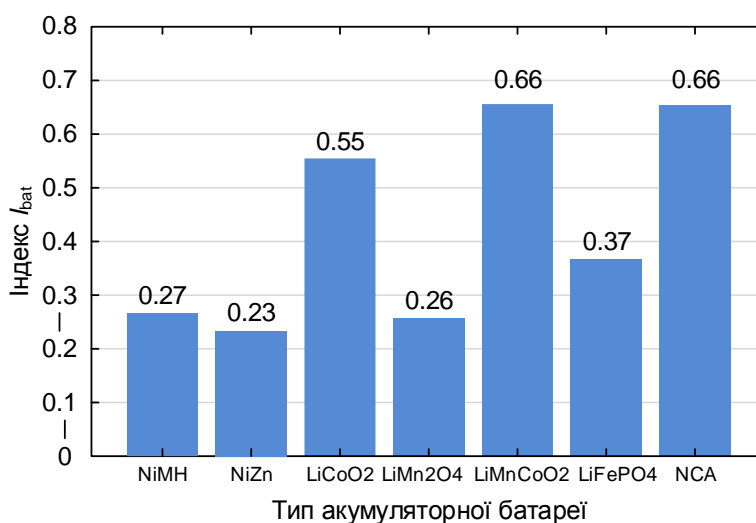


Рис. 6. Результати значень розрахунку загального індексу технології акумуляторної батареї I<sub>bat</sub>

Джерело: розроблено авторами.



**Висновки.** Дослідження нових матеріалів і хімічних речовин підвищує енергетичну щільність, термін служби та безпеку акумуляторів, сприяючи покращенню зберігання енергії та зниженню витрат. З часом враховуючи такий технологічний розвиток в електротехніці призведе до того, що одні технології акумуляторних батарей перестануть використовуватись, а інші стануть основними джерелами живлення з урахуванням потреб споживачів. Вибір оптимальної технології акумуляторної батареї в майбутньому буде визначати продуктивність, економічну ефективність та довговічність загальної системи зберігання енергії.

За результатами аналізу літературних джерел та напрацювань інших авторів, в роботі було представлено методику вибору технології акумуляторних батарей для їх застосування як накопичувачів енергії в системах спостереження на базі безпілотних літальних апаратів. Дана методика включає в себе два етапи. На першому попередньому етапі відбору здійснюється відсів тих технологій, які не підходять за мінімально необхідними техніко-економічними показниками, у той час як на другому етапі здійснюється багатокритеріальний підхід до прийняття рішення з вибору за методом Сааті. Цей підхід базується на трьох запропонованих індексах – експлуатаційному, технічному та економічному. Для здійснення вибору відповідно до необхідних вимог, експертною оцінкою було визначено вагові коефіцієнти складових індексів. За результатами розрахунків загального індексу технології акумуляторної батареї встановлено, що акумуляторні батареї на основі літієво-нікелево-марганцево оксидної та літієво-нікелево-кобальтово-алюмінієво оксидної технології мають найвищі значення індексу, а відповідно, є оптимальними для цієї сфери застосування. Ця методика може бути застосована і для інших сфер застосувань шляхом зміни експертами вагових коефіцієнтів індексів, що робить її універсальною.

#### Список використаних джерел

1. Bukola Peter Adedeji. A Novel Method for Estimating Parameters of Battery Electric Vehicles / Bukola Peter Adedeji // *Intelligent Systems with Applications*. – 2022. – Vol. 15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2022.200089>.
2. Yücenurşen, A. Battery selection criteria for electric vehicles: techno-economic analysis / A. Yücenurşen, A. Samancı // *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*. – 2023. – Vol. 12(2). – Pp. 65-74. DOI: <https://doi.org/10.18245/ijaet.1216888>.
3. Gang Zhao. Connecting battery technologies for electric vehicles from battery materials to management / Gang Zhao, Xiaolin Wang, Michael Negnevitsky // *iScience*. – 2022. – Vol. 25, Issue 2. – Pp. 103-744. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103744>.
4. Techniques of battery selection for usage in electric vehicles [Electronic resource] / Devendra Vashist, Anshul Tyagi, Diwakar Bhandari, Ankit Mittal, Manav Rachna // *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*. – 2022. – Vol. 10, Issue 11. – Pp. 359-363. – Access mode: <https://ijcrt.org/papers/IJCRT2211506.pdf>.
5. Bayraktar, M. Multi-Criteria Decision Making using TOPSIS Method for Battery Type Selection in Hybrid Propulsion System / M. Bayraktar, M. Nuran // *Transactions on Maritime Science*. – 2022. – Vol. 11(1). – Pp. 45-53. DOI: <https://doi.org/10.7225/toms.v11.n01.w02>.
6. Zhao, H. Comprehensive Performance Assessment on Various Battery Energy Storage Systems / H. Zhao, S. Guo, H. Zhao // *Energies*. – 2018. – № 11. – Pp. 28-41. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11102841>.
7. Bruce Dunn. Electrical energy storage for the grid: a battery of choices / Bruce Dunn, Haresh Kamath, Jean-Marie Tarascon // *Science*. – 2011. – Nov 18; 334(6058). – Pp. 928-935. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1212741>.
8. Soloveichik, Grigorii L. Battery technologies for large-scale stationary energy storage / Grigorii L. Soloveichik // *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. – 2011. – Vol. 2. – Pp. 503-527. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-061010-114116>.

9. Optimal Sizing, Selection, and Techno-Economic Analysis of Battery Storage for PV/BG-based Hybrid Rural Electrification System / Murugaperumal Krishnamoorthy, Ajay D. Vimal Raj Periyarayagam, Ch. Santhan Kumar, B. Praveen Kumar, Suresh Srinivasan & P. Kathiravan // IETE Journal of Research. – 2022. – Vol. 68. – Pp. 4061-4076. DOI: <https://doi.org/10.1080/03772063.2020.1787239>.

10. A review of modelling approaches to characterize lithium-ion battery energy storage systems in techno-economic analyses of power systems / Anton V. Vykhodtsev, Darren Jang, Qianpu Wang, William Rosehart, Hamidreza Zareipour // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – Vol. 166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112584>.

11. Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid batteries in stationary energy storage application / Abraham Alem Kebede, Thierry Coosemans, Maarten Messagie, Towfik Jemal, Henok Ayele Behabtu, Joeri Van Mierlo, Maitane Berecibar // Journal of Energy Storage. – 2021. – Vol. 40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102748>.

12. Rodolfo Dufo-López. Techno-economic analysis of grid-connected battery storage / Rodolfo Dufo-López, José L. Bernal-Agustín // Energy Conversion and Management. – 2015. – Vol. 91. – Pp. 394-404. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.038>.

13. Медиковський, М. О. Дослідження ефективності методів визначення вагових коефіцієнтів важливості / М. О. Медиковський, О. Б. Шуневич // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. – № 5. – С. 176-182.

14. Optimal charging strategies in lithium-ion battery / Reinhardt Klein, Nalin A. Chaturvedi, Jake Christensen, Jasim Ahmed, Rolf Findeisen and Aleksandar Kojic // Proceedings of the 2011 American Control Conference, San Francisco, CA, USA, 2011. – Pp. 382-387. DOI: 10.1109/ACC.2011.5991497.

15. Mundra, T. S. An Innovative Battery Charger for Safe Charging of NiMH/NiCd Batteries / S. Mundra, A. Kumar // IEEE Transactions on Consumer Electronics. – 2007. – Vol. 53, no. 3. – Pp. 1044-1052. doi: 10.1109/TCE.2007.4341584.

16. Liu, C. Toward safe and rapid battery charging: Design optimal fast charging strategies through a physics-based model considering lithium plating / C. Liu, Y. Gao, L. Liu // Int J Energy Res. – 2021. – Vol. 45. – Pp. 2303-2320. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.5924>.

17. Safe and fast-charging Li-ion battery with long shelf life for power applications / K. Zaghbi, M. Dontigny, A. Guerfi, P. Charest, I. Rodrigues, A. Mauger, C.M. Julien // Journal of Power Sources. – 2011. – Vol. 196, Issue 8. – Pp. 3949-3954. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.11.093>.

18. Lithium-ion battery fast charging: A review / Anna Tomaszewska, Zhengyu Chu, Xuning Feng, Simon O'Kane, Xinhua Liu, Jingyi Chen, Chenzhen Ji, Elizabeth Endler, Ruihe Li, Lishuo Liu, Yalun Li, Siqi Zheng, Sebastian Vetterlein, Ming Gao, Jiuyu Du, Michael Parkes, Minggao Ouyang, Monica Marinescu, Gregory Offer, Billy Wu. // eTransportation. – 2019. – Vol. 1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100011>.

19. An advanced Lithium-ion battery optimal charging strategy based on a coupled thermoelectric mode / Kailong Liu, Kang Li, Zhile Yang, Cheng Zhang, Jing Deng // Electrochimica Acta. – 2017. – Vol. 225. – Pp. 330-344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.12.129>.

20. Al-Haj Hussein A. A Review of Charging Algorithms for Nickel and Lithium Battery Chargers / A. Al-Haj Hussein and I. Batarseh // in IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2011. – Vol. 60, no. 3. – Pp. 830-838. DOI: 10.1109/TVT.2011.2106527.

21. Research on electric vehicle charging safety warning model based on back propagation neural network optimized by improved gray wolf algorithm / Liang Zhang, Tian Gao, Guowei Cai, Koh Leong Hai // Journal of Energy Storage. – 2022. – Vol. 49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104092>.

22. Research on a fast detection method of self-discharge of lithium battery / Liao H., Huang B., Cui Y., Qin H., Liu X., Xu H. // Journal of Energy Storage. – 2022. – Vol. 55. – P. 105431.

23. BU-214: Summary Table of Lead-based Batteries [Electronic resource] // Battery University. – Mode of access: <https://batteryuniversity.com/article/bu-214-summary-table-of-lead-based-batteries>.

24. BU-215: Summary Table of Nickel-based Batteries [Electronic resource] // Battery University. – Mode of access: <https://batteryuniversity.com/article/bu-215-summary-table-of-nickel-based-batteries>.

25. BU-216: Summary Table of Lithium-based Batteries [Electronic resource] // Battery University. – Mode of access: <https://batteryuniversity.com/article/bu-216-summary-table-of-lithium-based-batteries>.

## References

1. Bukola, P. A. (2022). A Novel Method for Estimating Parameters of Battery Electric Vehicles. *Intelligent Systems with Applications*, 15, 200089. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2022.200089>.

2. Yücenurşen, A., Samancı, A. (2023). Battery selection criteria for electric vehicles: techno-economic analysis. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 12(2), 65-74. doi:10.18245/ijaet.1216888.
3. Zhao, G., Xiaolin, W., Negnevitsky, M. (2022). Connecting battery technologies for electric vehicles from battery materials to management. *iScience*, 25(2), 103744. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103744>.
4. Vashist, D., Tyagi, A., Bhandari, D., Mittal, A., Rachna, M. (2022). Techniques of Battery Selection for Usage in Electric Vehicles. *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, 10(11).
5. Bayraktar, M. & Nuran, M. (2022). Multi-Criteria Decision Making using TOPSIS Method for Battery Type Selection in Hybrid Propulsion System. *Transactions on Maritime Science*, 11. 10.7225/toms.v11.n01.w02.
6. Zhao, H., Guo, S., Zhao, H. (2018). Comprehensive Performance Assessment on Various Battery Energy Storage Systems. *Energies*, 11. <https://doi.org/10.3390/en11102841>.
7. Dunn, B. et al. (2011). Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices. *Science* 334, 928-935. DOI:10.1126/science.1212741
8. Soloveichik, G. L. (2011). Battery technologies for large-scale stationary energy storage. *Annu Rev Chem Biomol Eng.*, 2, 503-27. doi: 10.1146/annurev-chembioeng-061010-114116.
9. Murugaperumal Krishnamoorthy, Ajay D. Vimal Raj Periyanyagam, Ch. Santhan Kumar, B. Praveen Kumar, Suresh Srinivasan & P. Kathiravan (2022). Optimal Sizing, Selection, and Techno-Economic Analysis of Battery Storage for PV/BG-based Hybrid Rural Electrification System. *IETE Journal of Research*, 68(6), 4061-4076. DOI: 10.1080/03772063.2020.1787239.
10. Vykhodtsev, A. V., Jang, D., Wang, Q., Rosehart, W., Zareipour, H. (2022). A review of modeling approaches to characterize lithium-ion battery energy storage systems in techno-economic analyses of power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 166, 112584. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112584>.
11. Kebede, A. A., Coosemans, T., Messagie, M., Jemal, T., Behabtu, H. A., Van Mierlo, J., Berecibar, M. (2021). Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid batteries in stationary energy storage application. *Journal of Energy Storage*, 40, 102748. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102748>.
12. Dufo-López, R., Bernal-Agustín, J. L. (2015). Techno-economic analysis of grid-connected battery storage. *Energy Conversion and Management*, 91, 394-404. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.038>.
13. Medikovskiy M. O., Shunevich O. B. (2011). Doslidzhennia efektyvnosti metodiv vyznachennia vahovykh koefitsientiv vazhlyvosti [Research on the effectiveness of methods for assessing the importance coefficients]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu – Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, 2011176.
14. Klein, R., Chaturvedi, N. A., Christensen, J., Ahmed, J., Findeisen, R., Kojic, A. (2011). Optimal charging strategies in lithium-ion battery. *Proceedings of the 2011 American Control Conference* (pp. 382-387). San Francisco, CA, USA. doi:10.1109/ACC.2011.5991497.
15. Mundra, T. S., Kumar, A. (2007). An Innovative Battery Charger for Safe Charging of NiMH/NiCd Batteries. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 53(3), 1044-1052. DOI: 10.1109/TCE.2007.4341584.
16. Liu, C, Gao, Y, Liu, L. (2021). Toward safe and rapid battery charging: Design optimal fast charging strategies thorough a physics-based model considering lithium plating. *Int J Energy Res.*, 45, 2303–2320. <https://doi.org/10.1002/er.5924>.
17. Zaghib, K., Dontigny, M., Guerfi, A., Charest, P., Rodrigues, I., Mauger, A., Julien, C.M. (2011). Safe and fast-charging Li-ion battery with long shelf life for power applications. *Journal of Power Sources*, 196(8), 3949-3954. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.11.093>.
18. Anna, Tomaszewska, Zhengyu, Chu, Xuning, Feng, Simon, O'Kane, Xinhua, Liu, Jingyi, Chen, Chenzhen, Ji, Elizabeth, Endler, Ruihe, Li, Lishuo, Liu, Yalun, Li, Siqi, Zheng, Sebastian, Vetterlein, Ming, Gao, Jiuyu, Du, Michael, Parkes, Minggao, Ouyang, Monica, Marinescu, Gregory, Offer, Billy, Wu (2019). Lithium-ion battery fast charging: A review. *eTransportation*, 1, 100011. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100011>.
19. Kailong, Liu, Kang, Li, Zhile, Yang, Cheng, Zhang, Jing, Deng. (2017). An advanced Lithium-ion battery optimal charging strategy based on a coupled thermoelectric model. *Electrochimica Acta*, 225, 330-344. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.12.129>.

20. A. Al-Haj Hussein and I. Batarseh. (March 2011). A Review of Charging Algorithms for Nickel and Lithium Battery Chargers. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(3), 830-838. doi:10.1109/TVT.2011.2106527.

21. Liang, Zhang, Tian, Gao, Guowei, Cai, Koh, Leong, Hai. (2022). Research on electric vehicle charging safety warning model based on back propagation neural network optimized by improved gray wolf algorithm. *Journal of Energy Storage*, 49, 104092. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104092>.

22. Liao, H., Huang, B., Cui, Y., Qin, H., Liu, X., & Xu, H. (2022). Research on a fast detection method of self-discharge of lithium battery. *Journal of Energy Storage*, 55, 105431.

23. BU-214: Summary Table of Lead-based Batteries. (n.d.). *Battery University*. <https://batteryuniversity.com/article/bu-214-summary-table-of-lead-based-batteries>.

24. BU-215: Summary Table of Nickel-based Batteries. (n.d.). *Battery University*. <https://batteryuniversity.com/article/bu-215-summary-table-of-nickel-based-batteries>.

25. BU-216: Summary Table of Lithium-based Batteries. (n.d.). *Battery University*. <https://batteryuniversity.com/article/bu-216-summary-table-of-lithium-based-batteries>.

Отримано 22.04.2024

UDC 621.316.1

**Andrii Los<sup>1</sup>, Oleksandr Veligorskiy<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD student

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [swarika@stu.cn.ua](mailto:swarika@stu.cn.ua). **ORCID** <https://orcid.org/0000-0003-1848-3744>. **ResearcherID:** [JHS-7999-2023](https://orcid.org/0000-0003-1848-3744)

<sup>2</sup> PhD in Technical Sciences, Associate Professor,

Associate Professor of Department of Biomedical Radioelectronic Apparatus and Systems

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [o.veligorskiy@stu.cn.ua](mailto:o.veligorskiy@stu.cn.ua). **ORCID** <http://orcid.org/0000-0002-8256-7339>. **ResearcherID:** [F-3889-2014](https://orcid.org/0000-0002-8256-7339)

## METHODOLOGY OF SELECTING BATTERY TECHNOLOGY FOR AUTONOMOUS SURVEILLANCE SYSTEMS BASED ON UAVS

*Unmanned aerial vehicles, or drones, are finding increasingly diverse applications, ranging from capturing footage of events to being utilized as bombers or kamikaze drones. One relatively recent application is surveillance for protection purposes, monitoring the spread of fires and other natural disasters, large-scale outdoor events, and more. Such surveillance can be conducted for individual objects or along specific trajectories, either for a limited time or continuously. In the latter case, to ensure continuous surveillance, multiple drones (a group) need to be used, operating according to a specific algorithm where some drones hover in the air to monitor the situation while others recharge on the ground, replacing those drones in the air whose charge falls to a minimum level sufficient for returning to the charging point.*

*The aim of the article is to develop a comprehensive multi-criteria evaluation methodology for selecting battery technologies used as power sources for autonomous surveillance systems based on unmanned aerial vehicles.*

*Considering that different chemical components of battery cells offer varying levels of energy density, service life, charging and discharging rates, as well as safety levels, the task of selecting the optimal battery technology is one of the key and relevant ones for achieving optimal productivity, economic efficiency, and durability of the energy storage system, as well as supporting the stability of operation of the continuous surveillance system based on unmanned aerial vehicles.*

*The paper presents a methodology for selecting battery technologies used as power sources for autonomous surveillance systems based on unmanned aerial vehicles. For the first time, a selection structure is proposed, which includes a preliminary selection stage and a multi-criteria decision-making stage for choosing appropriate energy storage technologies using the Analytic Hierarchy Process method. A concept of assessment structure is proposed, including operational, technical, and economic indices, each of which is further divided into individual components. Modeling of battery technology selection for an autonomous surveillance system based on expert-defined weighting coefficients is performed. The modeling results indicate that the highest overall indices are achieved by lithium-nickel-manganese oxide and lithium-nickel-cobalt-aluminum oxide batteries, making them the best choices for this application field.*

**Keywords:** battery; multi-criteria decision-making model; Saati; comprehensive performance evaluation; continuous monitoring systems.

*Fig.:* 6. *Tables:* 3. *References:* 25.

**Ярослав Олександрович Кириленко<sup>1</sup>, Юрій Миколайович Кутовий<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>асистент кафедри автоматизовані електромеханічні системи  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків, Україна)  
E-mail: [Yaroslav.Kyrylenko@iee.khpi.edu.ua](mailto:Yaroslav.Kyrylenko@iee.khpi.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0331-617X>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, професор кафедри автоматизовані електромеханічні системи  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків, Україна)  
E-mail: [yurii.kutovyi@khpi.edu.ua](mailto:yurii.kutovyi@khpi.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0331-617X>

## ДО ПИТАННЯ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ СИСТЕМ ЗАХИСТУ ВІД НАДЛИШКОВОГО КОВЗАННЯ КОЛІС РЕЙКОВИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

*Контроль ковзання завжди був вирішальним у залізничному секторі через обмежене тертя між колесами та рейкою. У цьому дослідженні будуть розглянуті різні типи захисту від ковзання та ковзання для залізничних транспортних засобів. На основі чого будувати реалізацію максимальної сили тяги відповідно до умов зчеплення. Підвищення тягового зусилля є комплексною проблемою проектування залізничних транспортних засобів; тому необхідно розробити ефективні системи тяги та алгоритми. Постійний розвиток інтелектуальних систем управління дозволяє будувати системи управління на основі сигналів зовнішнього середовища. Такі типи сигналів можуть бути отримані багатofункціональними датчиками, як камери.*

**Ключові слова:** буксування; юз; швидкість прослизання ковзання; характеристика зчеплення; фрикційні автоколивання.

Рис.: 4. Бібл.: 16.

**Актуальність теми дослідження.** Залізничні транспортні засоби постійно вдосконалюються, щоб скоротити час подорожі та безпекові показники. Тому їм потрібна потужна система керування тяги, щоб задовольнити зростаючі вимоги до швидкості. Розробка стратегій контролю тяги для досягнення оптимального зчеплення забезпечує безпечне та ефективне водіння, одночасно зменшуючи небажане ковзання між колесом і рейкою. Тому розробка сучасних систем управління, які усувають ці проблеми, є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Проблема побудови системи керування від надлишкового ковзання та юзу була спеціально досліджена з погляду енергоефективності в багатьох джерелах. Оптимальні стратегії управління були запропоновані для забезпечення компромісного аналізу між часом подорожі потягом і витратами енергії. Аналіз показав що ця тема досліджень є перспективною та потребує інтеграції в такі системи керування інтелектуальних систем керування на базі комп'ютерного зору та машинного навчання. За останнє десятиліття кілька дослідників досягли значних успіхів у використанні різних методів обробки зображення та зору для навігації, уникнення перешкод і керування наземними транспортними засобами. Більшість дослідників використовують методи обробки зображень для створення 3D-простору з 2D-зображень, виявлення перешкод або вилучення руху з отриманих послідовностей зображень. Нещодавно було розроблено багато навігаційних алгоритмів, які можуть обчислювати шлях робота та відносно надійно генерувати карти неструктурованих середовищ. Найбільш помітним є прогрес у методах навігації на основі SLAM. Однак ця стаття зосереджена на оцінці швидкості, яка застосовна до оцінки ковзання.

**Метою статті** є розглянути різні типи захисту від буксування та юзу рельсових транспортних засобів, на основі яких будується реалізація максимальної сили тяги за умовами зчеплення. Базуючись на розглянутих недоліках класичних систем захисту від надлишкового буксування розробити алгоритм вимірювання лінійної швидкості на базі алгоритмів комп'ютерного зору. Метою статті є показати переваги розробленого датчика комп'ютерного зору для визначення положення та швидкості транспортних засобів за допомогою однієї камери. Алгоритм, що використовується датчиком, був перевірений, а його похибка виміряна за допомогою стенду з модельним транспортним засобом, що рухається по відомій трасі.

**Виклад основного матеріалу.** До рейкових транспортних засобів (РТЗ) належать електровози, тепловози, приміські електрички та електрички метро, трамваї, рудничні електровози, та інші види транспорту з механізмами пересування по рейковій колії. Ці види транспорту виконують основні перевезення в промислово розвинених країнах.

З моменту появи РТЗ, а це понад двісті років, є проблема буксування і юза, або проблема надлишкового ковзання колеса відносно рейки.

Надлишкове ковзання спричиняє мимовільні втрати енергії, додатковий знос колісно-моторного блоку, знижує силу тяги та безпеку руху, призводить до фрикційних автоколивань у тягових електроприводах (ЕП) [1].

Величини надлишкового ковзання  $U$  характеризуються швидкістю надлишкового ковзання, яка визначається як різниця:

$$U = V_k - V_d,$$

де  $V_k$  – лінійна швидкість на ободі колеса;

$V_d$  – лінійна швидкість РТЗ.

Вимірювання швидкості надлишкового ковзання дає змогу побудувати систему автоматичного регулювання сили тяги на ободі колеса за умовою зчеплення.

Така система, з від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю надлишкового ковзання, усуває буксування або юз і забезпечує максимум сили тяги, що своєю чергою збільшує продуктивність праці з перевезення вантажів.

Лінійна швидкість на ободі колеса зазвичай визначається через кутову швидкість за допомогою низки аналогових, цифрових, частотних та інших типів датчиків кутової швидкості.

Вимірювання лінійної швидкості РТЗ є суттєво складнішим завданням, яке вирішуються за допомогою інерційних датчиків, навігаційних систем, одометрії колеса, з використанням відеокамери та технологій комп'ютерного зору.

Завдання спрощується, якщо РТЗ має колісну пару, не пов'язану з тяговим двигуном. Тоді лінійна швидкість на ободі колеса такої пари та лінійна швидкість РТЗ відповідають. Однак для повного використання зчепної ваги локомотива всі його колісні пари зазвичай мають тяговий привід.

Можна виходити з того, що одночасне буксування або юз усіх колісних пар локомотива неможливий. У цьому разі швидкість надлишкового ковзання перебуває як різниця швидкостей буксування і колісної пари, що не буксує. При цьому має бути деяка зона нечутливості, враховується технологічний розкид характеристик двигуна і можливу різницю в діаметрах бандажів колісних пар.

Для РТЗ з малою базою, як рудничний електровоз або трамвай, одночасне буксування і юз досить характерне. Тоді виявлення порушення умов зчеплення можливе за кутовим прискоренням, яке збільшується в 5-10 і більше разів при зриві зчеплення.

Якщо характеристика зчеплення має падаючу ділянку, за певного поєднання параметрів електромеханічної системи, надлишкове ковзання спричиняє фрикційні автоколивання [1]. Фрикційні автоколивання виявляються за допомогою смугового фільтра, налаштованого на частоту (20–60) Гц [2]. І за цими результатами виявляється надлишкове ковзання.

Для побудови системи реалізації максимальної сили тяги за умовами зчеплення виявлення надлишкового ковзання умова необхідна, але недостатня. Процес регулювання передбачає формування сигналу від'ємного зворотного зв'язку пропорційного швидкості надлишкового ковзання. Цей сигнал можна отримати, застосувавши датчик швидкості колісної пари та припустити, що в момент початку буксування  $t_6$  визначивши тим чи іншим способом, а за час регулювання приводом сила тяги швидкості РТЗ через інерційність залишається незмінною. Тоді різницю між поточним значенням швидкості колісної пари й зафіксованим у момент початку буксування, можна вважати швидкістю надлишкового ковзання.

Тоді різницю між поточним значенням швидкості колісної пари і постійним, зафіксованим у момент початку буксування, можна вважати швидкістю надлишкового ковзання коліс, як показано на рис. 1.

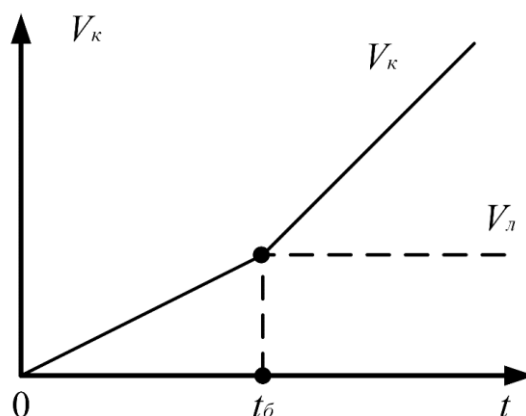


Рис. 1. Зміна швидкості колісної пари під час пуску

Розвиток технологій комп'ютерного зору, зниження вартості відеокамери, покращення її технічних характеристик, розширення бібліотеки програм з відкритим доступом для оброблення зображень дає можливість використовувати відеокамеру для вимірювання лінійної швидкості.

Відеокамера є багатофункціональним сенсором, що визначає не тільки такі фізичні параметри, як положення, швидкість, прискорення, а й може реагувати на середовище, в якому відбувається рух РТЗ [3-8].

Вимірювання лінійної швидкості РТЗ з використанням відеокамери базується на виявленні просторово-часових відмінностей у послідовності зображень, визначенні таких функцій, що відрізнятимуться під час переходу від одного зображення до іншого. Відома низка методів аналізу та алгоритмів обробки відео потоку. Алгоритм Лукаса-Канаде кращий, оскільки забезпечує достатню точність, нечутливість до шумів, працює в режимі реального часу [9-10].

Відповідно до цього алгоритму визначається рух яскравісних характеристик зображення, які, як передбачається, рухаються в міру руху об'єктів у послідовності зображень. Вихідний сигнал оптичного потоку отримують у вигляді компонентної швидкості  $u_x$  і  $u_y$ , як показано на рис. 2. Передбачається, що картина оптичного потоку відповідатиме полю руху, хоча на практиці це не завжди так. Використовуючи деякі обмеження, такі як порівняння геометрії (форми), порівняння рівнів сірого та інтенсивностей, об'єкт, виявлений на одному зображенні, зазвичай можна зіставити з об'єктом на наступному зображенні.

Основне припущення про оптичний потік полягає в тому, що зовнішній вигляд сцени істотно не змінюється між кадрами і що сцена плавно переходить від одного зображення до іншого. Потік часто локально однорідний, проте на межах сцени можуть виникати розриви. Інше припущення полягає в тому, що сцена складається з протяжних досить гладких поверхонь, які жорстко рухаються або принаймні плавно спотворюються під час руху. Кількість руху між кадрами невелика і порівняно з розміром зображення означає, що вектори оптичного потоку малі для пари зображень.

Хорн [11] провів новаторську роботу з розробки методів оптичного потоку, заснованих на обчисленні просторово-часових відмінностей за послідовністю зображень. Відтоді було розроблено безліч методів і алгоритмів визначення оптичного потоку, таких як диференціальні методи, методи зіставлення на основі областей, методи на основі енергії та методи на основі фази [12].

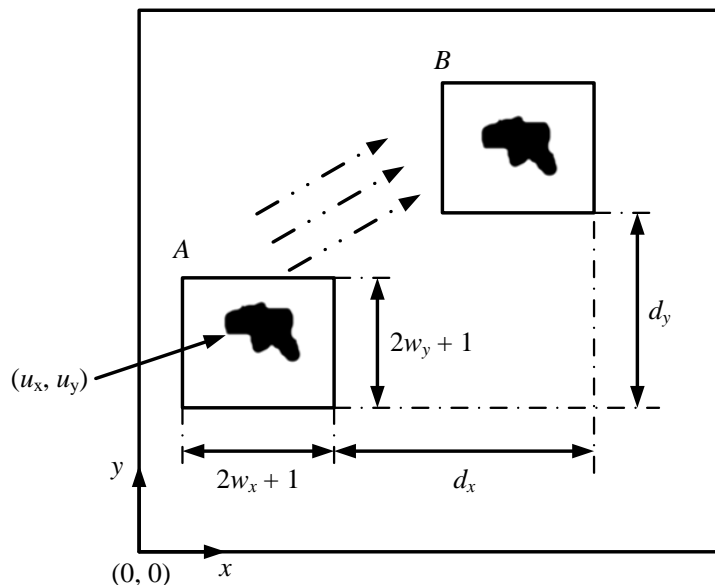


Рис. 2. Особливості оптичного потоку і швидкість руху характерної особливості кадру

Алгоритм оптичного потоку Канаді-Лукаса використовують тому, що він надійний, точний, нечутливий до шуму і джерел неоднорідної інтенсивності світла і підходить для обчислень у реальному часі [13].

У цьому методі нехай  $I_i$  є зображенням у відтінках сірого в момент часу  $t_i$  та  $I_{i+1}$  є зображенням у відтінках сірого в цей момент  $t_{i+1}$ . Нехай за цей проміжок часу зображення переміститься на відстань  $=(\Delta x, \Delta y)$ . Якщо  $A$  є характерною особливістю в  $I_i$ , а  $B$  – тією самою особливістю в  $I_{i+1}$  як показано на рис. 2. Під час розрахунку оптичного потоку використовують стандартну геометричну схему представлення камери, як показано на рис. 3.

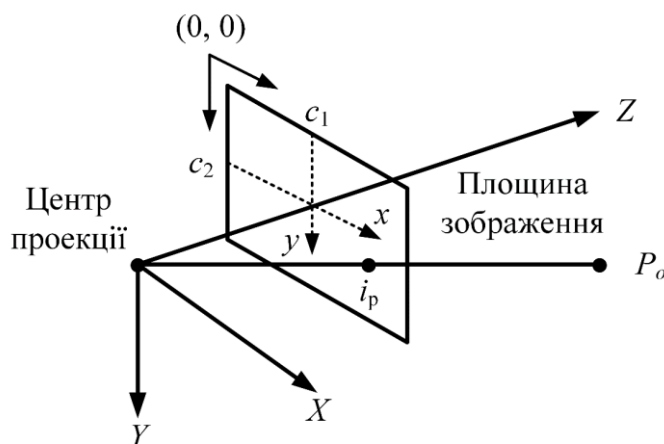


Рис. 3. Стандартна система координат камери

Тоді мета полягає в тому, щоб знайти  $d$  шляхом мінімізації функції  $\varepsilon(d)$ .

$$\varepsilon(d) = \iint_w (I_i(p) - I_{i+1}(p + d))^2 dx dy,$$

де

- $P_0=(x,y)$  координата пікселя загальної точки зображення, як показано на рис. 3. Координата пікселя верхнього лівого кута дорівнює  $(0,0)$ , а координата пікселя нижнього правого кута -  $(n_x-1, n_y-1)$ , де  $n_x, n_y$  – це ширина і висота зображення відповідно;
- $I_i$  і  $I_{i+1}$  значення відтінків сірого першого і другого зображення відповідно.



- $W$  – площа вікна об’єкта, розмір якої дорівнює  $(2w_x+1, 2w_y+1)$ .
- $d=(\Delta x, \Delta y)$  вихідний оптичний потік або відстань між елементами двох наступних кадрів зображення.

На практиці рішення мінімізації (1) може бути досягнуто за допомогою ітераційного алгоритму, такого як метод Ньютона-Рафсона. Алгоритм реалізується таким чином:

1. Виберіть вікно функції для відстеження на зображенні  $I_i(p)$ .
2. Нехай  $u=(u_x, u_y)$  буде центром вікна об’єкта на зображенні  $I_i(p)$ , як показано на рис. 2.
3. Ширина й довжина вікна,  $(w_x, w_y)$  визначаються експериментально і мають типові значення від 2 до 7 пікселів.
4. Нехай  $d=(\Delta x, \Delta y)$ , де  $(\Delta x, \Delta y)$  – це початкове припущення.
5. Розрахувати:

$$G = \sum_{x=u_x-w_x}^{u_x+w_x} \sum_{y=u_y-w_y}^{u_y+w_y} g(p)g^T(p),$$

$$b = \sum_{x=u_x-w_x}^{u_x+w_x} \sum_{y=u_y-w_y}^{u_y+w_y} (I_i(p)+I_{i+1}(p+d))g(p),$$

де  $g(p) = \left[ \begin{array}{c} \frac{d}{dx} (I_i(p)+I_{i+1}(p+d)) \\ \frac{d}{dy} (I_i(p)+I_{i+1}(p+d)) \end{array} \right]$ .

6. Розв’яжіть лінійне рівняння  $Gd_i=b$ .
7. Оновлення  $d=d+d_i$ .
8. Обчисліть наступне рівняння:

$$\varepsilon(d) = \sum_{x=u_x-w_x}^{u_x+w_x} \sum_{y=u_y-w_y}^{u_y+w_y} (I_i(p)+I_{i+1}(p+d))^2.$$

9. Якщо  $\varepsilon(d) < \varepsilon$ , де  $\varepsilon$  – заздалегідь заданий поріг, перейдіть до кроку 5.
10. Оптично потік  $d$ .

Лінійна швидкість РТЗ пропорційна оптичному потоку  $d$  при заданому  $\Delta t$ . Обчислення лінійної швидкості та швидкості ковзання проводиться відповідно до алгоритму, наведеного на рис. 4.

Перевірку принципів побудови захисту від буксування (юз) проведено шляхом експерименту на рудничних електровозах АМ8Д, АРП14, К14 і роботизованій платформі з блоком відеокамер обчислювального модуля Raspbergy Pi4. Крім цього було виконано чисельний експеримент на математичній моделі електроприводів магістрального електровоза ДС3 і міського трамвая Т6В5 [14-15].

Експеримент показав, що за низьких значень коефіцієнта зчеплення у рудничних електровозів має місце одночасне буксування коліс зі швидкістю прослизання ковзання понад 2 м/с. У цьому разі виявлення буксування доцільно проводити за кутовим прискоренням, або за фрикційними коливаннями, які для рудничних електровозів становлять 25 Гц, а для магістральних електровозів 10 Гц.

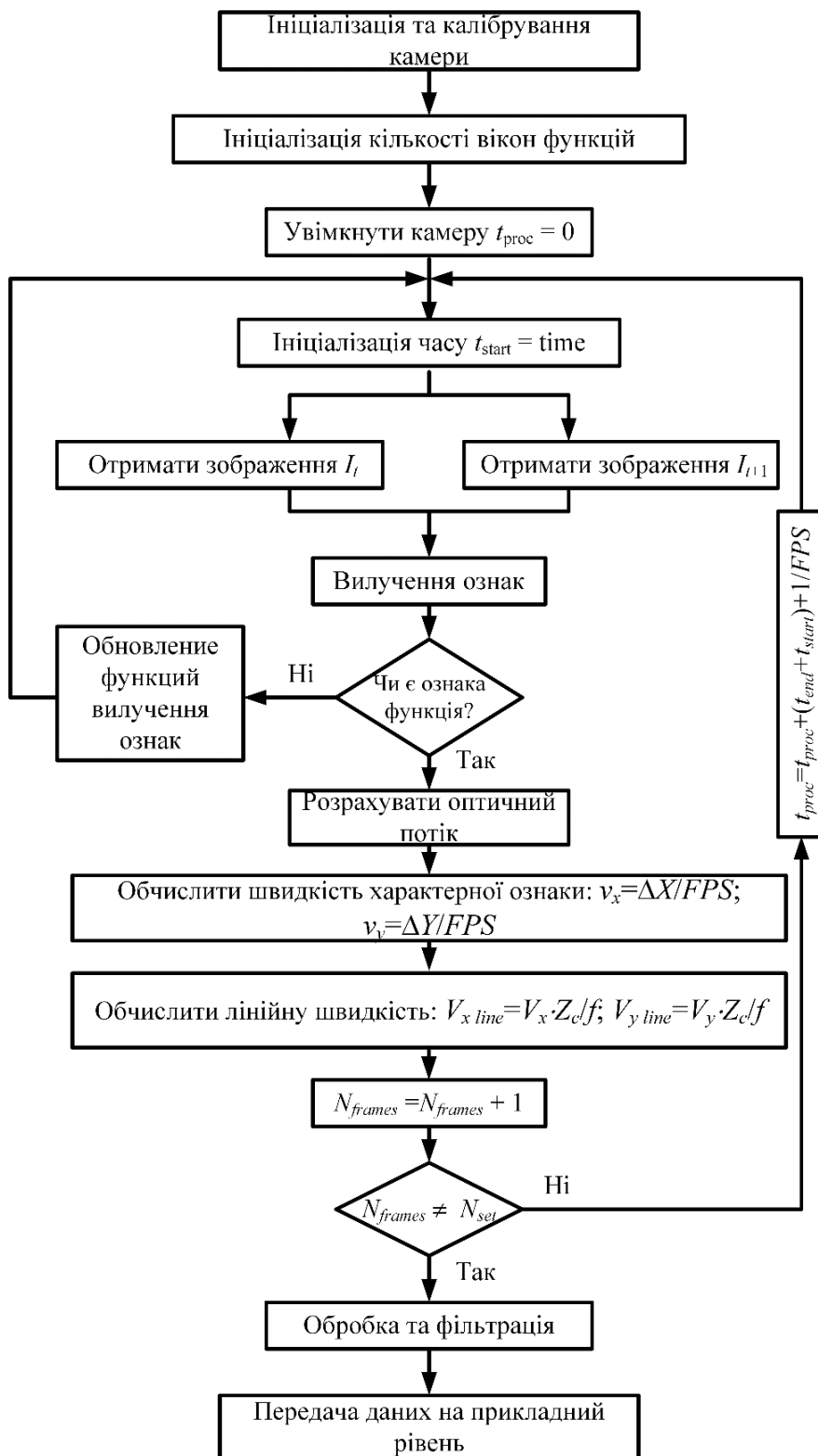


Рис. 4. Алгоритм обчислення лінійної швидкості та швидкості ковзання

Експеримент із вимірювання лінійної швидкості та обчислення швидкості ковзання виконано на експериментальному стенді [16]. Застосування сучасних технологій комп'ютерного зору дасть можливість виміряти навіть малі лінійні швидкості до 1 м/с з похибкою не більше 2 %.

**Висновки.** Вибір принципу побудови захисту від буксування (юз) здійснюється з урахуванням технічних характеристик РТЗ, умов роботи та експлуатації.

Застосування традиційних датчиків у тягових приводах РТЗ (кутової швидкості, струму, напруги) дають змогу не тільки виявити буксування (юз), а й сформувати сигнал пропорційний швидкості надлишкового ковзання, що забезпечує регулювання сили тяги за умовою зчеплення.

Для вимірювання лінійної швидкості РТЗ і визначення швидкості надлишкового ковзання можливе використання універсального датчика як відеокамера, що дає змогу вимірювати такі фізичні величини як швидкість, прискорення, шлях. Виміряні швидкості від точних оптичних кодерів порівнюються зі швидкостями, передбаченими алгоритмом оптичного потоку, показуючи дуже хорошу збіг. Також було встановлено оптимальний розмір вікна функції для оцінки швидкості оптичного потоку в реальному часі. Загалом, підхід має потенціал для точної оцінки швидкості. Тривають експерименти для різних умов реального світу, і подальші дослідження будуть спрямовані на розробку надійної автономної системи вимірювання швидкості.

#### Список використаних джерел

1. Klepikov V. B. Dynamics of electromechanical systems with nonlinear friction / V. B. Klepikov. – Kharkiv: Pidruchnyk NTU “KhPI”, 2014. – 408 p.
2. Getman, G. K. Theory of electric traction: handbook at 2 volumes. T. 2. / G. K. Getman. – Dnipropetrovsk: Accent PP, 2015. – 492 p.
3. Andrew J. Davison. Real-time simultaneous localization and mapping with a single camera / Andrew J. Davison // IEEE International Conference on Computer Vision, Nice, France, (January 2003). – Pp. 1403–1410.
4. 3d map building for a humanoid robot by using visual odometry / Y. Takaoka, Y. Kida, S. Kagami, H. Mizoguchi, T. Kanade // Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics: The Hague, (Netherlands, 10-13 October 2004). – P. 4444–4449.
5. Robust real-time visual tracking using a 2D-3D model-based approach / E. Marchand, P. Bouthemy, F. Chaumette, V. Moreau // IEEE International Conference on Computer Vision (Kerkyra, 1999). – Pp. 262–268.
6. Jung, B. Detecting moving objects using a single camera on a mobile robot in an outdoor environment / B. Jung, G. S. Sukhatme // In the 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems, (Amsterdam, 2004). – Pp. 980–987.
7. Betke, M. Multiple vehicle detection and tracking in hard real time / M. Betke, E. Haritaoglu, L. Davis // IEEE Symposium on Intelligent Vehicles, (Tokyo, 1996). – Pp. 351–356.
8. Ferryman, J. M. Visual surveillance for moving vehicles / M. J. Ferryman, S. J. Maybank, A. D. Worrall // Journal of Computer Vision. – 2000. – № 37(2). – P. 187–197.
9. Barron, J. L. Performance of optical flow techniques / J. L. Barron, D. J. Fleet, S. S. Beauchemin // International Journal of Computer Vision. – 1994 – Vis. 12(1). – Pp. 43–77.
10. Lucas B. D. An iterative image registration technique with an application to stereo vision / Bruce D. Lucas, Takeo Kanade // Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI '81). – 1981. – Pp. 121–130.
11. Cheng Yang Visual odometry on the Mars exploration rovers - a tool to ensure accurate driving and science imaging/ Yang Cheng, Mark W. Maimone, Larry Matthies // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2006. – Vol. 13, № 2. – Pp. 37–45.
12. Horn B.K.P. Determining Optical flow / B. K. P. Horn, B. G. Schunck // Artificial Intelligence. – 1981. – № 17 – Pp. 185–203.
13. Birchfield, S. KLT: An implementation of the Kanade-Lucas-Tomasi feature tracker / Stan Birchfield. – 2007.

14. Neural Network Control of a Frequency-Regulated Electric Drive of a Main Electric Locomotive / Y. Kyrylenko, Y. Kutovoj, I. Obruch, T. Kunchenko // 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), (Kremenchuk, Ukraine, 2020). – Pp. 1-4. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240880.

15. Y. Kutovoj, Y. Application of Intelligent Control Systems in Electric Drives of Rail Vehicles / Y. Kutovoj, Y. Kyrylenko, I. Obruch and T. Kunchenko // 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), (Kharkiv, Ukraine, 2021) – Pp. 709-713, DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570026.

16. Kyrylenko, Y. The Robotic Platform for Measuring Linear Velocity Using Computer Vision Algorithms/ Y. Kyrylenko, K. Yuriy and K. Tatiana // 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2022. – P. 1-4, doi: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916472.

### References

1. Klepikov, V.B. (2014). *Dynamics of electromechanical systems with nonlinear friction*. Pidruchnyk NTU “KhPI”.

2. Getman, G. K. (2015). *Theory of electric traction*. (Vol. 2). Dnipropetrovsk: Accent PP.

3. Davison, A. (2003). Real-time simultaneous localization and mapping with a single camera. *IEEE International Conference on Computer Vision, Nice, France* (pp. 1403–1410).

4. Takaoka, Y., Kida, Y., Kagami, S., Mizoguchi, H. and Kanade, T. (2004). 3d map building for a humanoid robot by using visual odometry. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. The Hague* (pp. 4444–4449).

5. Marchand, E., Bouthemy, P., Chaumette, F. and Moreau, V. (1999). Robust real-time visual tracking using a 2D-3D model-based approach. *IEEE International Conference on Computer Vision. Kerkyra* (pp. 262–268).

6. Jung, B. and Sukhatme, G. S. (2004). Detecting moving objects using a single camera on a mobile robot in an outdoor environment. *The 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems, Amsterdam* (pp. 980–987).

7. Betke, M., Haritaoglu, E. and Davis, L. (1996). Multiple vehicle detection and tracking in hard real time”, *IEEE Symposium on Intelligent Vehicles. Tokyo* (pp. 351–356).

8. Ferryman, J. M., Maybank, S. J. and Worrall, A. D. (2000). Visual surveillance for moving vehicles. *Journal of Computer Vision, 37(2)*, 187–197

9. Barron, J.L., Fleet, D.J., and Beauchemin, S.S. (1994). Performance of optical flow techniques. *Int. J. Comput. Vis., 12(1)*, 43–77.

10. Lucas B.D. and Kanade, T. (1981). An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proc. Imaging Understanding Workshop* (pp. 121–130).

11. Cheng Y., Maimone, M. W., and Matthies, L. (2006). Visual Odometry on the Mars Exploration Rovers”. *IEEE Robotics & Automation Magazine*.

12. Horn, B.K.P. and Schunck, B.G. (1981). Determining Optical flow. *Artificial Intelligence, 17*, 185-203.

13. Birchfield, S. Kanade-Lucas-Tomasi feature tracker.

14. Kyrylenko, Y., Kutovoj, Y., Obruch I., and Kunchenko, T. (2020). Neural Network Control of a Frequency-Regulated Electric Drive of a Main Electric Locomotive. *IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine* (Pp. 1-4). doi:10.1109/PAEP49887.2020.9240880.

15. Kutovoj, Y., Kyrylenko, Y., Obruch I., and Kunchenko, T. (2021). Application of Intelligent Control Systems in Electric Drives of Rail Vehicles. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). Kharkiv, Ukraine. Pp. 709-713. doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570026.*

16. Kyrylenko, Y., Yuriy, K. and Tatiana, K. (2022). The Robotic Platform for Measuring Linear Velocity Using Computer Vision Algorithms," *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). Kharkiv, Ukraine. Pp. 1-4. doi: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916472.*

Отримано 03.06.2024

**Yaroslav Kyrylenko<sup>1</sup>, Yurii Kutovyi<sup>2</sup>**<sup>1</sup>assistant of the Department Automated Electromechanical Systems

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (Kharkiv, Ukraine)

**E-mail:** [Yaroslav.Kyrylenko@ieee.khpi.edu.ua](mailto:Yaroslav.Kyrylenko@ieee.khpi.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0331-617X><sup>2</sup>PhD of Technical Sciences, Professor of the department Automated electromechanical systems

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (Kharkiv, Ukraine)

**E-mail:** [yurii.kutovyi@khpi.edu.ua](mailto:yurii.kutovyi@khpi.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0331-617X>**ON THE QUESTION OF METHODS OF BUILDING PROTECTION SYSTEMS  
AGAINST EXCESSIVE SLIPPING OF WHEELS OF RAIL VEHICLE**

*Various types of protection against skidding and the use of rail vehicles are considered, based on which the implementation of the maximum traction force under the coupling conditions is built. Slip control has always been crucial in the railway sector due to the limited friction between the wheels and the rail. This study will examine the various types of skid and skid protection for rail vehicles, on which basis the implementation of the maximum traction force in accordance with the clutch conditions will be build. Increasing the traction force is a complex problem in the design of railway vehicles; therefore, it is necessary to develop effective traction systems and algorithms. The continuous development of intelligent control systems allows building control systems based on signals from the external environment. These types of signals can be received by multifunctional sensors such as cameras. Wagons are constantly being improved to reduce time and safety. Therefore, they need a powerful traction control system to meet the increasing speed requirements. The development of a traction control strategy to achieve optimal traction ensures a safe and efficient ride and reduces unnecessary slippage between the wheel and the track. Therefore, the development of modern control systems that eliminate these problems is an urgent task. The issue of setting up an excessive slip and shake control system was specially studied from the point of view of energy efficiency in many sources. Optimal decommunization strategies were proposed to ensure a trade-off analysis between travel time and electricity costs. The results showed that this research topic was very promising and that intelligent control systems based on computer vision and machine learning must be integrated into one management system. The use of traditional sensors in railway transport traction drives (angular speed, current, voltage) makes it possible not only to detect skidding but also to generate a signal proportional to the speed of excess slip, which ensures the adjustment of the traction force under the condition of coupling. The experiment on measuring linear speed and calculating sliding speed was performed on an experimental bench. The use of modern computer vision technologies will make it possible to measure even small linear velocities up to 1 m/c with an error of no more than 2 %.*

**Keywords:** railway traction, railway vehicle, slide, slip, slip velocity, computer vision, control, intelligent control.**Fig.:** 4. **References:** 16.

## РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-2(36)-251-265

УДК 711.43

**Владислав Анатолійович Смілка**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, доцент, професор кафедри теорії архітектури  
Київський національний університет будівництва і архітектури (Україна, Київ)

E-mail: [smilka.va@knuba.edu.ua](mailto:smilka.va@knuba.edu.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7025-9398>

ResearcherID: [S-6934-2017](https://orcid.org/0000-0002-7025-9398) SCOPUSID: [57211859251](https://orcid.org/0000-0002-7025-9398)

### ЗАСТОСУВАННЯ ТРІАНГУЛЯЦІЇ ДЕЛОНЕ ДЛЯ АНАЛІЗУ ПІШОХІДНОЇ ДОСТУПНОСТІ ДО ЗАКЛАДІВ ОСВІТИ

На основі властивостей тріангуляції Делоне запропоновано методикою оцінювання оптимальності (відповідності нормативним вимогам) планувальних вирішень мережі закладів освіти, розроблено еталонні варіанти взаєморозташування таких закладів. Критерієм оптимальності є максимальне охоплення території обслуговування при мінімальній кількості закладів. З метою оцінювання оптимальності наведених пропозицій запропоновано склад показників мережі освітніх закладів, які враховують охоплення території обслуговування, геометричні параметри взаємного розташування закладів та відповідність еталонній кількості закладів. Вказані показники є базовими для розрахунку загального індикатора пішохідної доступності до освітніх закладів. Апробація розроблених пропозицій проведена для мережі освітніх закладів Солом'янського району м. Києва.

**Ключові слова:** тріангуляція; мережа освітніх закладів; радіус обслуговування; пішохідна доступність; еталонна відстань між закладами.

Рис.: 7. Табл.: 2. Бібл.: 29.

**Актуальність теми дослідження.** Розвиток мереж об'єктів обслуговування населення є важливим елементом забезпечення сталого розвитку територій населених пунктів. Доступність до основних об'єктів обслуговування населення є одним з аспектів якості життя населення за тематичною групою показників «Міське планування», що визначається міжнародним стандартом ISO 37120:2018, на основі якого прийнято національний стандарт ДСТУ ISO 37120:2019 «Сталі міста та громади. Показники міських послуг і якості життя». Державними будівельними нормами ДБН Б.2.2-12:2019 «Планування і забудова територій» встановлюються вимоги до максимально допустимих радіусів обслуговування для кожного типу об'єкта обслуговування населення. Є суттєві відмінності між вимогами до доступності певних об'єктів обслуговування в ДСТУ ISO 37120:2019 та ДБН Б.2.2-12:2019, зокрема для закладів загальної освіти. У ДСТУ ISO 37120:2019 встановлено, що доступність до початкової школи має становити 300 м, а середньої школи – 500 м, ДБН Б.2.2-12:2019 визначає максимальні радіуси обслуговування населення для початкової та середньої школи – 800 м. Ці відмінності впливають на рівень оцінки якості життя та обслуговування населення.

**Постановка проблеми.** Виникає проблема аналізу доступності до об'єктів обслуговування населення з врахуванням різних вихідних параметрів, зокрема місця розташування об'єктів обслуговування та показників доступності до цих об'єктів. На підставі результатів аналізу відповідності вихідним параметрам доступності до об'єктів можуть бути розроблені конкретні пропозиції щодо вдосконалення, розвитку мережі об'єктів обслуговування населення, а саме перепрофілювання об'єктів, визначення місця будівництва (влаштування) нових об'єктів обслуговування для найбільш повного охоплення зоною обслуговування території населеного пункту.

Тематичну мережу будь-яких об'єктів обслуговування населення можна представити у вигляді множини точок (де одна точка відповідає одному об'єкту) на плані населеного пункту, або його окремої частини території, тому для аналізу доступності до об'єктів обслуговування населення доцільно використати властивості тріангуляції.

У цьому дослідженні «доступність до об'єктів обслуговування населення» розуміємо як відстань (евклідову відстань) від житлового будинку до об'єкта, який забезпечує надання послуг населенню.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Тріангуляція є мережею найпростіших фігур-трикутників у просторі, яка формується з множини точок. Вона застосовується в багатьох прикладних сферах діяльності, зокрема геодезії, геоінформаційних системах, архітектурі, комп'ютерному моделюванні тощо.

Тріангуляція Делоне (метод побудови мережі трикутників) та діаграма Тіссена-Вороного (метод визначення зон близькості) як об'єкт дослідження активно вивчається науковцями та впроваджується в галузі просторового аналізу та моделювання [1, 2, 3], комп'ютерної геометрії [4; 5] та інших науках.

У роботах [6; 7] розглянуто прикладні питання використання тріангуляції Делоне та діаграм Тіссена-Вороного для аналізу території населеного пункту за тематикою пожежної безпеки. Публікації [8; 9; 10; 11] містять теоретичні та практичні положення використання тріангуляції для збереження біоресурсів та корисних копалин.

Розробленню підходів з оцінювання якості середовища населених пунктів присвячені роботи [12; 13; 14]. У статтях [15; 16; 17] розглянуто містобудівні фактори формування різних мереж закладів обслуговування населення в житловій забудові, натомість питання оцінювання доступності до об'єктів обслуговування населення не розглядались. Питання доступності до об'єктів обслуговування населення, зупинок громадського транспорту, місць прикладання праці та відпочинку розглядались у працях [18; 19; 20], у яких досліджувались проблеми компактності забудови населених пунктів та забезпечення сталого розвитку територій, що передбачає можливість пішохідної доступності до основних об'єктів обслуговування населення та мінімізацію транспортних переміщень.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Вищенаведені напрями досліджень охоплюють окремі аспекти вивчення проблеми формування та розвитку мереж об'єктів обслуговування населення. Інтеграція різнопланових підходів комплексного аналізу та оцінювання відповідності містобудівним вимогам мереж закладів громадського обслуговування населених пунктів забезпечує вдосконалення методів містобудівного моніторингу та інформаційної підтримки ухвалення управлінських рішень щодо сталого розвитку територій населених пунктів.

**Метою дослідження** є аналіз пішохідної доступності до комунальних закладів початкової освіти Солом'янського району міста Києва, визначення рівня фактичної відповідності забезпечення закладами середньої освіти території району нормативним вимогам, встановленим державними будівельними нормами ДБН Б.2.2-12:2019 та ДСТУ ISO 37120:2019, напрацювання пропозицій щодо вдосконалення, розвитку закладів освіти в Солом'янському районі міста Києва, напрацювання показників та індикаторів оцінювання відповідності мережі об'єктів обслуговування населення встановленим містобудівним вимогам. Підходи оцінювання мережі освітніх закладів можуть бути використані для оцінювання мереж інших видів об'єктів обслуговування населення.

**Виклад основного матеріалу.** Відповідно до даних Головного управління статистики у місті Києві [21], починаючи з 2010 року встановилась тенденція зростання кількості учнів у закладах загальної середньої освіти, цей показник щорічно зростає на 1-5 %. З 2010 року до 2022 року кількість учнів зросла з 224,8 тис. осіб до 338,6 тис. осіб, що становить понад 50 % зростання. Однак у навчальному році 2022-2023 показник очного відвідування закладів середньої освіти у порівнянні з попереднім навчальним роком знизився на 30 %, що пояснюється збройною агресією російської федерації проти України. Таким чином, при зростанні загальної кількості учнів закладів загальної середньої освіти суттєво зменшилась кількість учнів, які очно відвідують денні навчальні заклади.

Очікуючи нормалізації безпекової ситуації в Україні, необхідно моніторити рівень доступності до об'єктів обслуговування населення, розвивати мережі об'єктів обслуговування населення, зокрема закладів загальної середньої освіти, оскільки, як згадувалось, показники доступності до закладів освіти в Україні та відповідні показники у міжнародних нормах суттєво відрізняються.

Площа Солом'янського району міста Києва становить близько 5% від площі міста Києва, однак він є репрезентативним містобудівним формуванням, оскільки знаходиться в трьох планувальних зонах міста Києва – Центральній, Західній та Південній. В Солом'янському районі міста Києва налічується 33 комунальних середніх заклади освіти, які забезпечують навчання на I рівні освіти – початковій школі. З метою врегулювання проблеми наповнюваності закладів освіти в місті Києві районні державні адміністрації щорічно видають розпорядження про закріплення території обслуговування для кожного освітнього закладу, де вказують адресний перелік житлових будинків, які обслуговуються конкретним закладом освіти. У цій статті досліджується мережа освітніх закладів з 33 комунальних шкіл I рівня, для яких визначені зони обслуговування відповідно до розпорядження Солом'янської районної в місті Києві державної адміністрації від 03.04.2024 № 218 [22].

Аналіз відстаней від шкіл до житлових будинків (рис. 1), які закріплені за кожною школою відповідно до розпорядження Солом'янської районної у місті Києві державної адміністрації засвідчує, що максимальна відстань до окремих житлових будинків перевищує нормативно встановлений радіус обслуговування у 800 м для понад 40% комунальних закладів освіти району. Геоінформаційні системи дозволяють здійснювати просторовий аналіз, зокрема побудову полігонів Тіссена-Вороного. Враховуючи, що залізниця ділить район на дві частини та є штучною перешкодою для обслуговування населення на території, що нею розділяється, буфери та полігони Тіссена-Вороного побудовані для окремих територій, а потім злиті в цілісний полігональний об'єкт (рис. 2). Поділ зон близькості житлових будинків до шкіл за методом Тіссена-Вороного має більш збалансовані результати, оскільки вже для 36 % шкіл наявні максимальні радіуси обслуговування понад 800 м. Результати аналізу відстаней від шкіл до житлових будинків за показниками «максимальна відстань» наведено на рис. 1 та розподілено на групи: 1) максимальна відстань до будинків, закріплених за кожною школою відповідно до розпорядження Солом'янської районної у місті Києві державної адміністрації, 2) максимальна відстань до будинків, за методом побудови зон близькості Тіссена-Вороного. Як видно з рис. 1, жоден із підходів запропонованих моделей поділу території району на зони обслуговування не задовольняє встановленим державними будівельними нормами вимогам. У зв'язку з вищевикладеним необхідно розглядати питання ущільнення закладів загальної освіти в районі.

Солом'янський район міста Києва розташований частково в трьох планувальних районах міста Києва, які визначаються окремими містобудівними показниками та характеристиками. Встановлено, що 11 % територій житлових мікрорайонів не охоплені максимально допустимими радіусами обслуговування від закладів початкової освіти, що також свідчить про необхідність ущільнення мережі загальноосвітніх закладів. Переважна частина територій, які не охоплені максимально допустимими радіусами обслуговування від закладів освіти, є садибною забудовою, яка поступово трансформується в мало- та середньо поверхову житлову забудову, що потребує відповідної інфраструктури та об'єктів обслуговування населення.

Для забезпечення державних будівельних норм в межах району необхідно здійснити ущільнення мережі мінімум трьома освітніми закладами. В результаті вивчення ситуації



щодо забезпечення території району міста Києва освітніми закладами сформовані пропозиції щодо будівництва чотирьох нових освітніх закладів I рівня освіти (рис. 3), таким чином, проєктна кількість освітніх закладів становить 37.

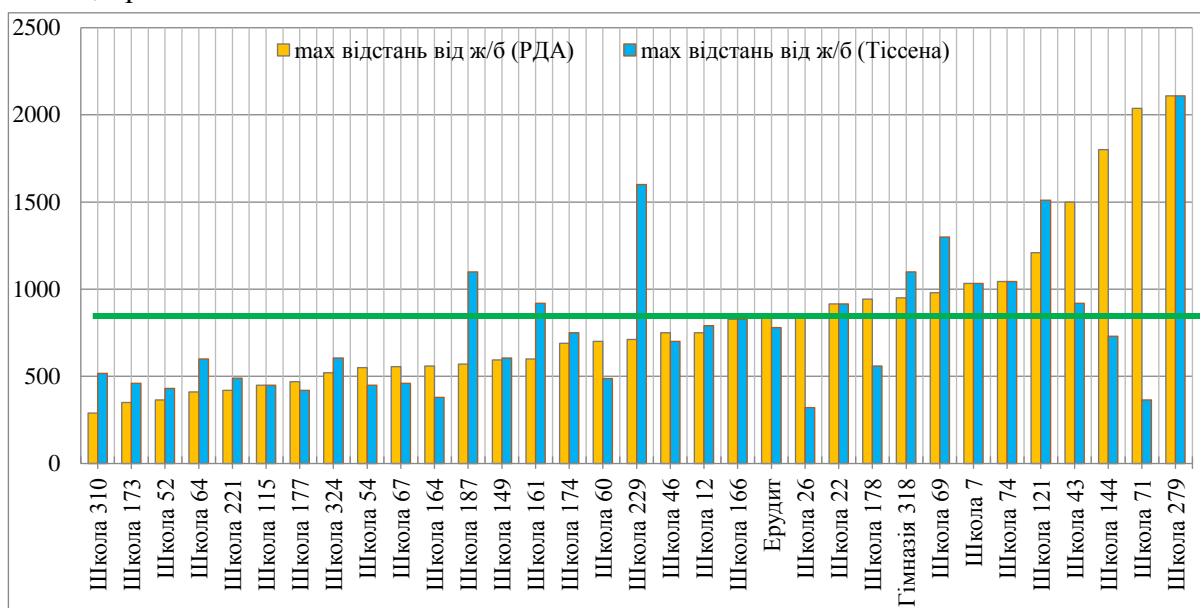


Рис. 1. Аналіз відстаней від шкіл до будинків відповідно до зон обслуговування, встановлених:

1 – райдержадміністрацією; 2 – полігонами близькості Тіссена-Вороного

Джерело: розроблено автором.

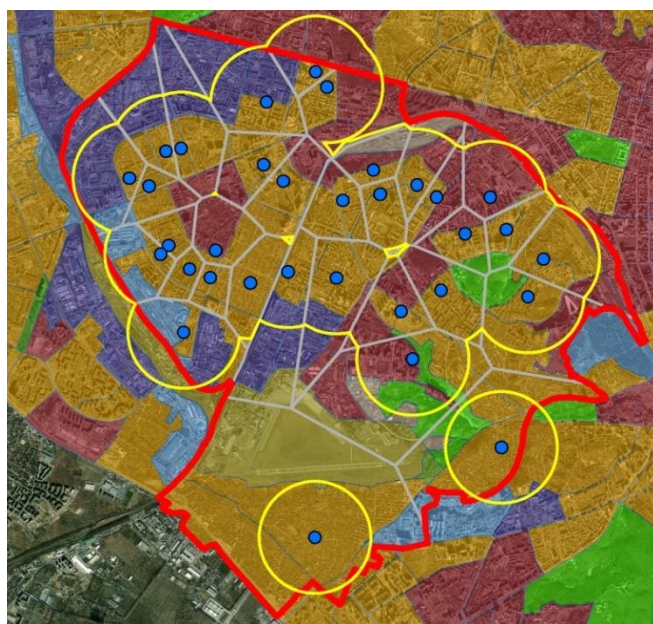


Рис. 2. Мережа закладів освіти Солом'янського району міста Києва в планувальній структурі міста із загальною зоною обслуговування та полігонами Тіссена-Вороного  
Джерело: розроблено автором.

Подальші пропозиції щодо оцінювання стійкості мережі освітніх закладів пропонується розробляти, спираючись на методи триангуляції та методи побудови зон близькості Тіссена-Вороного [23; 24]. Оскільки мережу освітніх закладів можна представити у ви-

гляді неопуклої триангуляції Делоне, відстані між закладами характеризуються властивостями трикутників. Поділ Солом'янського району міста Києва на триангуляцію освітніх закладів та зони близькості до них наведений на рис. 3 для існуючого та запропонованого стану. У зв'язку з поділом території району залізницею формуються дві окремі триангуляційні мережі освітніх закладів. Також на структуру триангуляційної мережі впливає розташування аеропорту та промислових районів у межах території, що досліджується.

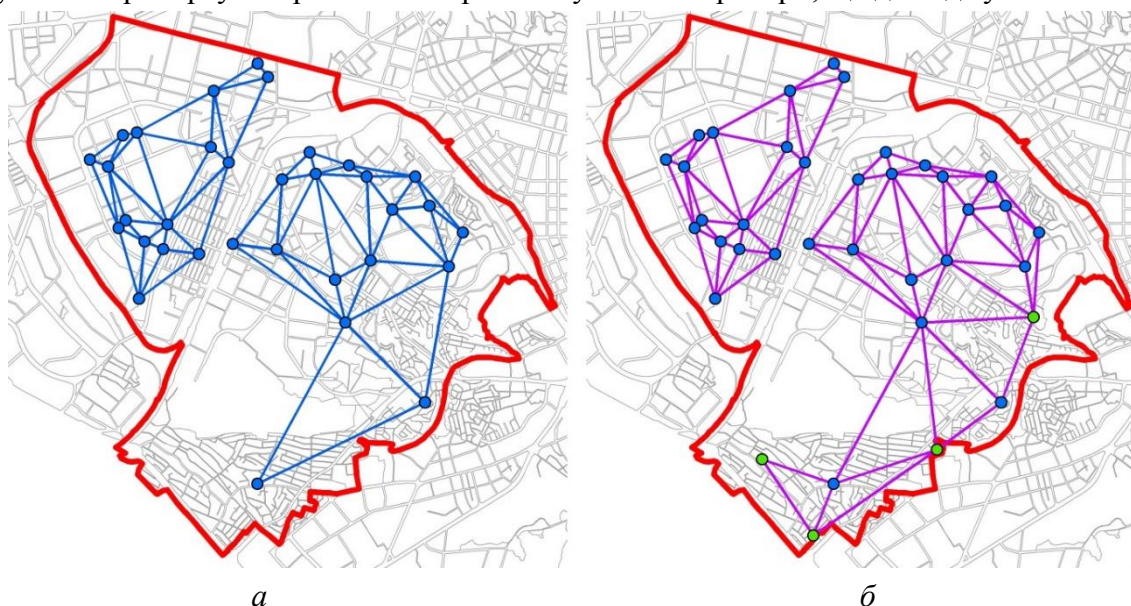


Рис. 3. Триангуляційна мережа освітніх закладів та їх зони близькості:

*а* – існуюча мережа освітніх закладів;

*б* – пропозиції з удосконалення мережі освітніх закладів

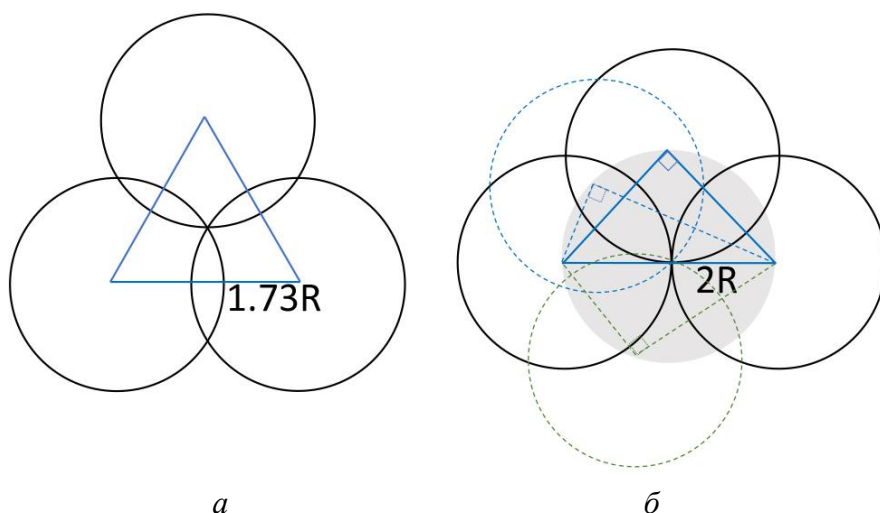
Джерело: розроблено автором.

Оскільки державними будівельними нормами регламентується максимально допустимий радіус обслуговування, для подальшого планування території та оцінювання мережі громадських установ можна визначити оптимальну відстань між найближчими закладами (установами), назовемо її «еталонна відстань між об'єктами обслуговування». Еталонна відстань між об'єктами обслуговування задовольняє умові формування безрозривної області обслуговування встановленими типами закладів (установ), фактично це є найдовша лінія трикутника. Враховуючи цю умову, оптимальним елементом триангуляції є рівносторонній трикутник, який забезпечує мінімальний перетин зон обслуговування закладів між собою (рис. 4, *а*). Іншим оптимальним елементом триангуляції є рівнобедрений прямокутний трикутник, або похідний від нього прямокутний трикутник (рис. 4, *б*). Таким чином, оптимальний розмір еталонної відстані між закладами освіти становить від  $R\sqrt{3}$  до  $2R$ , де  $R$  – це максимальний радіус обслуговування.

Важливим питанням у дослідженні є розроблення критеріїв оцінювання фактичної мережі освітніх закладів, що необхідно для оцінювання пропозицій щодо удосконалення мережі закладів. На безрозривність зон обслуговування вказує еталонна відстань між об'єктами обслуговування, сукупність найдовших ліній кожного з трикутників в неопуклій триангуляції Делоне. Побудова опуклої триангуляції забезпечить формування додаткових елементів, що додатково збільшуватимуть розмірність відстаней між закладами.

Аналіз показників елементів трикутників, що виникають в результаті побудови триангуляції, дає можливість сформулювати характеристику утвореної мережі закладів освіти, а саме цілісність та щільність їх зон обслуговування. Показниками, які характеризують трикутники та загалом триангуляцію, є довжини сторін та кути трикутників. Довжини

сторін трикутників можуть свідчити про наявність розривів між зонами закладів обслуговування населення, а кути характеризують висоту трикутників, яка вказує на ступінь перетину зон обслуговування закладів.



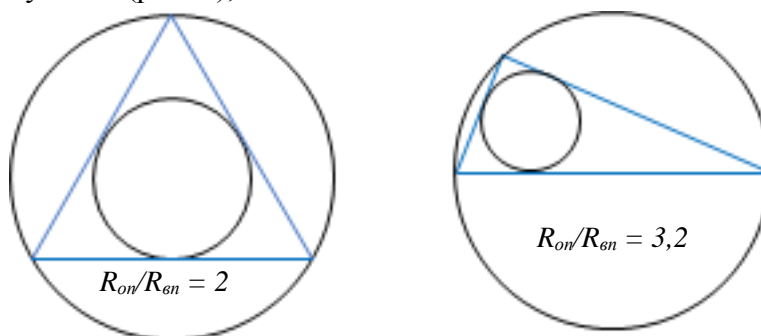
*Рис. 4. Оптимальні моделі взаєморозташування об'єктів обслуговування: а – рівносторонній трикутник; б – рівнобедрений прямокутний трикутник та похідний від нього прямокутний трикутник*

Джерело: розроблено автором.

Необхідно визначити репрезентативний загальний показник або групу показників, які характеризують довжини сторін трикутника та кути між ними, щоб узагальнено оцінити триангуляційну мережу. Такими загальними показниками мережі освітніх закладів пропонується визначити:

- співвідношення загальної площі території, фактично охопленої максимально допустимим радіусом обслуговування об'єктів, до загальної площі території, яку необхідно забезпечити освітніми закладами –  $K_p$  ;

- співвідношення середнього радіусу описаного кола до середнього радіусу вписаного кола трикутників триангуляції –  $K_k$ . Описане коло трикутника – це коло, радіус якого за визначенням є рівновіддаленим від кожної з вершин трикутника, а побудова описаних кіл є основою для формування триангуляції Делоне. Вписане коло трикутника є дотичним до всіх сторін трикутника та може характеризувати висоту трикутника. Для рівностороннього трикутника згадане співвідношення дорівнює 2, чим більше величина відношення відрізняється від цього значення, тим пропорційно меншою у порівнянні з еталонною є одна з висот трикутника (рис. 5);



*Рис. 5. Залежність між параметрами трикутника та розмірами його вписаного і описаного кіл*

Джерело: розроблено автором.

- співвідношення середньої довжини всіх ліній триангуляційної мережі до еталонної відстані між освітніми закладами  $K_L$ ;

- співвідношення кількості закладів, які складають мережу освітніх закладів, до мінімально необхідної кількості установ, які можуть задовольнити визначену територію –  $K_S$ . Останнє визначається виходячи з того, що на території обслуговування формується модель еталонної триангуляції з рівносторонніх трикутників (при  $R = 800$  м та стороні трикутника – 1385,6 м, при  $R = 300$  м та стороні трикутника – 519,6 м).

Для доведення репрезентативності цих показників пропонується паралельно вести розрахунок рівня відхилень між еталонними та фактичними довжинами та кутами трикутника. Середня квадратична похибка між еталонними параметрами трикутника та фактичними розмірами для кожного з трикутників вказуватиме на рівень відхилень фактичної конфігурації мережі освітніх закладів від її еталонної конфігурації.

Можна визначити три еталонних форми трикутника:

1) рівносторонній трикутник зі сторонами  $R\sqrt{3}$  та відповідно рівними кутами  $60^\circ$ ; радіус описаного кола  $R$ , радіус вписаного кола  $R/2$ , де  $R$  – максимально допустимий радіус обслуговування населення. Співвідношення радіусів описаного до вписаного кола становить 2;

2) рівнобедрений прямокутний трикутник зі сторонами  $2R$ ,  $R\sqrt{2}$ ,  $R\sqrt{2}$  та кутами  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $45^\circ$ ; радіус описаного кола  $R$ , радіус вписаного кола  $R/(\sqrt{2}+1)$ . Співвідношення радіусів описаного до вписаного кола становить 2,41;

3) прямокутний трикутник зі сторонами  $2R$ ,  $\sqrt{(2R)^2 - a^2}$ ,  $\sqrt{(2R)^2 - b^2}$ ; радіус описаного кола  $R$ , радіус вписаного кола змінюється залежно від довжини катетів.

Визначення показників для розрахунку співвідношення зони обслуговування в межах району до площі району ( $K_P$ ) здійснюється методами просторового аналізу за допомогою геоінформаційних систем.

Середній радіус описаного та вписаного кола для кожного з трикутників триангуляційної мережі освітніх закладів району визначається за допомогою формул тригонометрії.

Вихідні дані для цих розрахунків формуються після побудови триангуляції Делоне в середовищі геоінформаційних системи.

Еталонна кількість закладів визначається як доданок існуючої кількості закладів мережі та їх додаткової кількості, для забезпечення умови сто відсоткового охоплення території, що досліджується, зонами обслуговування установ. Додаткова кількість установ відповідає вимогам еталонної моделі мережі. Визначення еталонної кількості закладів є різновидом задачі оптимізації [25]. До наявної кількості закладів додається розрахункова кількість закладів, які необхідно розмістити на території, що не охоплена додатково. Первинно визначається еталонна кількість закладів за ідеальних умов для всієї території, що розглядається. Це дає можливість розрахувати площу зони обслуговування на один об'єкт обслуговування населення. Такий показник дає можливість визначити додаткову кількість закладів, яку необхідно розмістити в межах території, що досліджується. Виходячи з цього, еталонна кількість закладів для кожного етапу удосконалення мережі буде розраховуватись окремо, як наслідок значення цього показника буде унікальним для кожної ітерації розрахунку.

Еталонна кількість закладів освіти за ідеальних умов розраховується із залежності:

$$S_t = S_o \cdot (d - m - h),$$

де  $S_t$  – площа території, що досліджується (житлової території району);

$S_o$  – площа кола, утвореного еталонною відстанню між об'єктами обслуговування;

$d$  – кількість об'єктів обслуговування;

$m$  – площа території, що потрапляє в межі обслуговування декількох закладів освіти;

$h$  – площа, яка виходить за межі території, що досліджується.

У свою чергу площа території, що потрапляє в межі обслуговування декількох закладів освіти, визначається як кількість граней триангуляції помножена на 0,058 (площа перетину зон обслуговування об’єктів, утворених вздовж однієї грані (рис. 4, а)). Кількість граней можна розрахувати за формулою складності триангуляції [25; 26]  $n \cdot \log_{10} n$ , де,  $n$  – кількість трикутників. Придатність формули була перевірена емпіричним шляхом.

Площа, яка виходить за межі території, визначається як відношення периметру території до еталонної відстані між об’єктами обслуговування, поділене на 2.

Таким чином, кількість об’єктів обслуговування в межах досліджуваної території визначається за формулою:

$$d = \frac{S_t}{S_o} + 0,058 \cdot \frac{S_t}{S_{\Delta}} \log_{10} \frac{S_t}{S_{\Delta}} + \frac{P_t}{a_e}$$

Вихідними показниками є  $S_t$  та  $P_t$ , площа та периметр території, що досліджується, а змінним параметром мережі об’єктів обслуговування є  $a_e$  – еталонна відстань між об’єктами обслуговування. Від еталонної відстані визначаються  $S_o$  – площа еталонного описаного кола та  $S_{\Delta}$  – площа еталонного трикутника.

Паралельно з визначенням розмірів вписаного та описаного кіл трикутників і середньої довжини ліній триангуляції виконано розрахунок середніх квадратичних відхилень довжин сторін трикутників від еталонних відстаней між закладами обслуговування населення (табл. 1). Оцінювання пропонується здійснювати для двох еталонних моделей, за вимогами ДБН Б.2.2-12:2019 ( $R = 800$  м) та вимогами ДСТУ ISO 37120:2019 ( $R = 300$  м). Вихідними даними для розрахунків є площа житлової та житлово-громадської території району – 2767,3 га, периметр цієї території 34610 м. Як свідчать результати порівняння розрахунків мережі закладів освіти, показники мережі покращилися після удосконалення мережі в порівнянні з фактичними показниками.

Таблиця 1 – Загальні розрахунки мережі освітніх закладів

Показник	Фактичний стан	Етап удосконалення	Еталонна модель (800)	Еталонна модель (300)
1	2	3	4	5
Площа, що обслуговується закладами в межах району, га	2905,7	3393,4	3067,2	2850,4
Житлові території, не охоплені зоною обслуговування 800, га	424,6	165,1	0	0
Житлові території, не охоплені зоною обслуговування 300, га	2043,9	1930,9	0	0
<b>Відношення площі зони обслуговування 800 в межах району до площі району (житлової території) (<math>K_p</math>)</b>	<b>0,846</b>	<b>0,940</b>	<b>1</b>	-
<b>Відношення площі зони обслуговування 300 в межах району до площі району (житлової території) (<math>K_p</math>)</b>	<b>0,261</b>	<b>0,302</b>	-	<b>1</b>
Середній радіус описаного кола трикутників, м	691,3	706,8	800	300
Середній радіус вписаного кола трикутників, м	198,8	205,1	400	150
<b>Середнє значення відношення середнього радіусу описаного кола до середнього радіусу вписаного кола (<math>K_k</math>)</b>	<b>4,453</b>	<b>4,418</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
СКП відхилення описаного радіусу до еталонного описаного радіусу 800, м	340,3	316,0	0	-
СКП відхилення вписаного радіусу до еталонного описаного радіусу 800, м	235,4	224,4	0	-
СКП відхилення описаного радіусу до еталонного описаного радіусу 300, м	507,0	506,6	-	0
СКП відхилення вписаного радіусу до еталонного описаного радіусу 300, м	131,5	124,1	-	0
Середня довжина ліній триангуляційної мережі	948,5	972,2	1385,6	519,6
<b>Відношення середньої довжини всіх ліній триангуляційної мережі до еталонної відстані між освітніми закладами 800 (<math>K_L</math>)</b>	<b>0,684</b>	<b>0,702</b>	<b>1</b>	-

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5
<b>Відношення середньої довжини всіх ліній триангуляційної мережі до еталонної відстані між освітніми закладами 300 (K<sub>L</sub>)</b>	<b>1,825</b>	<b>1,871</b>	<b>-</b>	<b>1</b>
СКП відхилення найдовшої, середньої та найменшої сторін трикутника від 1-ого еталонного розміру трикутника (800), м	528,6 603,2 847,2	503,0 545,0 817,9	0 0 0	- - -
СКП відхилення найдовшої, середньої та найменшої сторін трикутника від 2-ого еталонного розміру трикутника (800), м	627,4 483,0 626,0	594,4 419,3 594,2	214,4 254,3 254,3	- - -
СКП відхилення найдовшої, середньої та найменшої сторін трикутника від 1-ого еталонного розміру трикутника (300), м	867,8 670,0 370,6	885,0 643,6 350,7	- - -	0 0 0
СКП відхилення найдовшої, середньої та найменшої сторін трикутника від 2-ого еталонного розміру трикутника (300), м	683,6 741,6 406,3	819,0 720,2 393,1	- - -	80,4 95,4 95,4
Кількість закладів мережі	33	37	30	164
Еталонна кількість закладів мережі 800	38	39	30	-
Еталонна кількість закладів мережі 300	154	152	-	164
<b>Відношення кількості закладів до еталонної кількості закладів 800 (K<sub>s</sub>)</b>	<b>0,868</b>	<b>0,949</b>	<b>1</b>	<b>-</b>
<b>Відношення кількості закладів до еталонної кількості закладів 300 (K<sub>s</sub>)</b>	<b>0,214</b>	<b>0,243</b>	<b>-</b>	<b>1</b>

Джерело: розроблено автором.

Для удосконаленої моделі мережі освітніх закладів розраховано відстані від шкіл до житлових будинків. Результати свідчать, що для 7 шкіл (21 % від кількості шкіл в районі) максимальні відстані пішохідної доступності перевищують 800 м у діапазоні 800-1050 м, (рис. 6). Загалом, наведені розрахунки свідчать, що запропонований перерозподіл доступності до об'єктів обслуговування є оптимальним, розроблені пропозиції щодо удосконалення мережі освітніх закладів вагомі, а інформативність показників оцінювання пішохідної доступності до об'єктів обслуговування населення є дієвою.

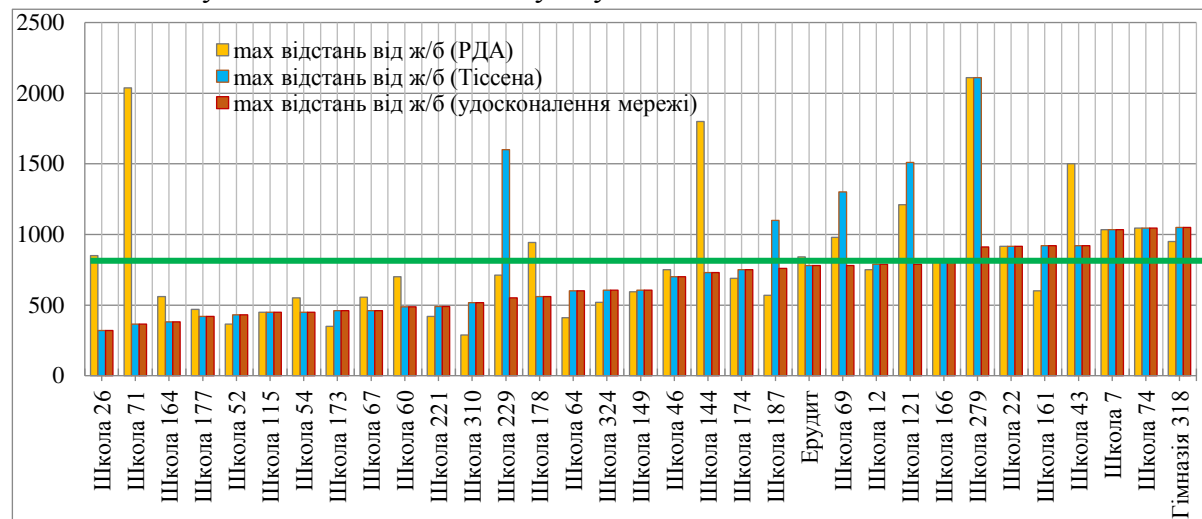


Рис. 6. Аналіз відстаней від шкіл до будинків відповідно до: документу адміністрації, зон полігонів близькості Тіссена-Вороного, удосконаленої моделі мережі

Джерело: розроблено автором.

На основі загальних показників мережі освітніх закладів пропонується використовувати узагальнений індикатор пішохідної доступності до освітніх закладів (табл. 2), що визначається як середнє арифметичне значення чотирьох нормалізованих показників ме-

режі: 1) співвідношення загальної площі території, фактично охопленої максимально допустимим радіусом обслуговування об'єктів, до загальної площі території, яку необхідно забезпечити освітніми закладами  $K_P$ , 2) співвідношення середнього радіусу описаного кола до середнього радіусу вписаного кола трикутників триангуляції  $K_K$ , 3) співвідношення середньої довжини всіх ліній триангуляційної мережі до еталонної відстані між освітніми закладами  $K_L$ ; 4) співвідношення кількості закладів, які складають мережу освітніх закладів, до мінімально необхідної кількості установ, які можуть задовольнити визначену територію  $K_S$ .

Таблиця 2 – Розрахунок індикатора пішоїдної доступності до освітніх закладів

Показники	Для еталонної моделі 800		Для еталонної моделі 300	
	Фактичний стан	Етап удосконалення	Фактичний стан	Етап удосконалення
Нормалізоване значення відношення зони обслуговування в межах району до площі району ( $K_P$ )	0,846	0,940	0,261	0,302
Нормалізоване значення відношення середнього радіусу описаного кола до середнього радіусу вписаного кола ( $K_K$ )	0,101	0,102	0,101	0,102
Нормалізоване значення відношення середньої довжини всіх ліній триангуляційної мережі до еталонної відстані між освітніми закладами ( $k_L$ )	0,684	0,702	0,300	0,286
Нормалізоване значення відношення кількості закладів до еталонної кількості закладів ( $K_S$ )	0,868	0,949	0,214	0,243
<b>Індикатор пішоїдної доступності до мережі освітніх закладів</b>	<b>0,625</b>	<b>0,673</b>	<b>0,219</b>	<b>0,233</b>

Джерело: розроблено автором.

Нормалізація показників мережі освітніх закладів району здійснюється відносно еталонних показників мережі за умов, що «1» є еталонним (бажаним) значенням, при  $P < E$ ,  $P_n = P/E$ , при  $P > E$ ,  $P_n = E/P^2$ , де  $P$  – показник мережі,  $E$  – еталонний показник мережі,  $P_n$  – нормалізований показник мережі. Будь-які відхилення від еталонних показників (у більшу або меншу сторону) є невідповідністю бажаних значень, графік нормалізованих значень наведено на рис. 7.

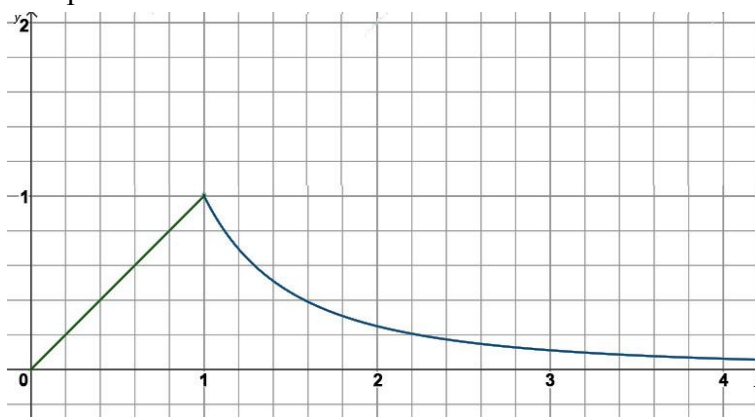


Рис. 7. Графік нормалізації показників мережі освітніх закладів

При узагальненому оцінюванні мережі запропонований метод враховує ступінь охоплення території зонами обслуговування закладів, показники геометрії закладів та відповідності еталонній кількості закладів. Таким чином, значення співвідношення зони обслуговування в межах району до площі району ( $K_P$ ), співвідношення середнього радіусу описаного кола до середнього радіусу вписаного кола ( $K_K$ ), співвідношення середньої довжини всіх ліній триангуляційної мережі до еталонної відстані між освітніми закладами

( $K_L$ ), співвідношення кількості закладів до еталонної кількості закладів ( $K_S$ ) є репрезентативними для об'єктів обслуговування та базовими для розрахунку індикатора доступності до мережі освітніх закладів.

З метою оцінювання індикатора доступності пропонується використовувати оціночну шкалу Харрінгтона [27]:

- від 0,01 до 0,2 – низький рівень;
- від 0,2 до 0,37 – понижений рівень;
- від 0,37 до 0,63 – середній рівень;
- від 0,63 до 0,8 – достатній рівень;
- від 0,8 до 1,0 – оптимальний рівень.

За шкалою Харрінгтона існуючий стан пішохідної доступності до закладів освіти за вимогами ДБН Б.2.2-12:2019 у Солом'янському районі міста Києва оцінюється як «середній» (на верхній його межі), а проектне удосконалення мережі шляхом будівництва 4-х нових закладів освіти забезпечить для цього індикатора значення «достатній». Пішохідна доступність до закладів освіти за вимогами ДСТУ ISO 37120:2019 для існуючого та проектного удосконаленого стану оцінюється на рівні «понижений» на нижній його межі. Таким чином, необхідно здійснювати ущільнення мережі освітніх закладів в місті Києві та прагнути досягнути вимог пішохідної доступності за ДСТУ ISO 37120:2019, що підвищить якість міських послуг та якість життя мешканців столиці України.

**Висновки.** Розроблений метод оцінювання пішохідної доступності до освітніх закладів може бути використаний для оцінювання різних видів об'єктів обслуговування населення, для яких визначено нормативні вимоги доступності.

Геоінформаційні технології надають можливість автоматизації запропонованого методу, що дозволить на основі вихідних даних, які описують фактичне та проектне положення закладів, здійснити швидкий розрахунок показників та індикатора мережі об'єктів обслуговування населення та визначити оптимальне проектне рішення математичним способом.

Зазначені підходи можуть бути застосовані при:

- встановленні зон обслуговування освітніх закладів державними районними адміністраціями;
- оцінюванні варіантів удосконалення мереж об'єктів обслуговування при містобудівному проектуванні [28];
- оцінюванні впливу проектного закладу обслуговування на загальну пішохідну доступність до мережі об'єктів обслуговування при об'єктному проектуванні;
- проведенні містобудівного моніторингу, виявленні проблемних питань у обслуговуванні населення [29];
- розробленні пропозицій для удосконалення мереж об'єктів обслуговування населення.

У зазначеному дослідженні розглянуто лише питання доступності до закладів освіти, однак не враховано показники потужності освітніх закладів та ресурсний потенціал закладів для задоволення потреб населення у встановленій зоні обслуговування. Зазначені питання планується розглянути в подальшому дослідженні.

### Список використаних джерел

1. Методи та моделі розроблення комп'ютерних систем і мереж : монографія / В. С. Пономаренко, С. В. Мінухін, С. В. Кавун, та ін.; заг. ред. В. С. Пономаренка. – Харків : ХНЕУ, 2008. – 316 с.
2. Midtbo, T. Spatial Modeling by Delaunay Networks of Two and Three Dimensions : Dr. Ing. Thesis / T. Midtbo. – Norwegian Institute of Technology, University of Trondheim, 1993. – 157 p.
3. De Floriani L. Compressing Triangulated Irregular Networks / De L. Floriani, P. Magillo, E. Puppo // Geoinformatica. – 2000. – Vol. 1, № 4. – Pp. 67-88.
4. Watson, D. F. Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi polytopes / D. F. Watson // The Computer Journal. – 1981. – Vol. 24, № 2. – Pp. 167-172.



5. Sloan, S. W. A fast algorithm for constructing Delaunay triangulations in the plane / S.W. Sloan // *Adv. Eng. Software*. – 1987. – Vol. 9, № 1. – Pp. 34-55.
6. Кузик, А. Д. Аналіз зон покриття гідрантами території міста (на прикладі Новояворівська) / А. Д. Кузик, О. М. Трусевич, О. О. Карабин // *Пожежна безпека : зб. наук. праць*. – Львів : ЛДУ БЖД, 2009. – № 15. – С. 71-77.
7. Кузик, А. Д. Аналіз зон обслуговування пожежно-рятувальних частин за допомогою діаграм Вороного / А. Д. Кузик, О. О. Карабин, О. М. Трусевич // *Пожежна безпека : зб. наук. праць*. – Львів : ЛДУ БЖД, 2008. – № 13. – С. 73-78.
8. Терентьев, А. Ю. Використання сучасних ГІС-технологій для розрахунку площі живлення дерев у лісових насадженнях / А. Ю. Терентьев // *Науковий вісник НЛТУ України*. – 2014. – Вип. 24.5. – С. 111-115.
9. Рудько, Г. І. Геоінформаційні технології в надрокористуванні (на прикладі ГІС К – MINE) / Г. І. Рудько, ред. М. В. Назаренко. – Київ : Академпред, 2011. – 336 с.
10. Кохан, С. С. Географічні інформаційні системи : посібник / С. С. Кохан ; за ред. М. Ван Мервіна. – Київ : НАУ. 2003. – 206 с.
11. Геоінформаційні системи в агросфері / В. В. Морозов, Н. М. Шапоринська, О. В. Морозов, В. І. Пічура. – Київ : Аграрна освіта, 2010. – 269 с.
12. Горбань, О. М. Основи теорії систем і системного аналізу / О. М. Горбань, В. Є. Бахрушин. – Запоріжжя : ГУ «ЗІДМУ», 2011. – 204 с.
13. Плешкановська, А. М. Аналіз різноманітності структури міської системи на основі моделі Шеннона / А. М. Плешкановська // *Містобудування та територіальне планування*. – 2014. – Вип. 51. – С. 452-457.
14. Ligmann-Zielinska, A. Sustainable urban land use allocation with spatial optimization / A. Ligmann-Zielinska, R. Church, P. Jankowski // *8th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*. – 2005. – Pp. 1-18.
15. Ковальський, Л. М. Проблеми реконструкції мережі дошкільних навчальних закладів в ущільненій житловій забудові / Л. М. Ковальський, Г. Л. Ковальська, Д. С. Саєнко // *Досвід та перспективи розвитку міст України*. – 2016. – Вип. 31. – С. 164-174.
16. Булах, І. В. Передумови реорганізації мережі дитячих лікувальних закладів України / І. В. Булах // *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. – 2017. – № 47. – С. 444-450.
17. Кузьміна, Г. В. Питання організації мережі підприємств дрібнороздрібної торгівлі / Г. В. Кузьміна // *Перспективні напрямки проектування житлових та громадських будівель*. – 2003. – Спец. вип. : Сучасні тенденції в архітектурі та будівництві. – С. 176-178.
18. Cabrera-Jara, N. Assessing sustainable urban densification using geographic information systems / N. Cabrera-Jara, D. Orellana, M. Hermida // *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*. – 2017. – Vol. 8, No. 2. – Pp. 237-243. DOI: <https://doi.org/10.12972/susb.20170021>.
19. Smilka, V. Settlement compactness as a quality characteristic of land use / V. Smilka // *Baltic Journal of Real Estate Economics and Construction Management*. – 2020. – № 8. – P. 34-44. DOI: 10.2478/bjreecm-2020-0004.
20. Kovalska, G.L. Construction management in Ukraine / G. L. Kovalska, V. A. Smilka // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. – 2019. – Vol. 9, № 1. – Pp. 1593-1600. DOI: 10.35940/ijitee.A4563.119119.
21. Офіційний сайт Головного управління статистики у м. Києві [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.kyiv.ukrstat.gov.ua>.
22. Офіційний сайт Шевченківської районної в місті Києві державної адміністрації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://shev.kyivcity.gov.ua>.
23. Zamirets, O. Building triangulation irregular network model based on regular GRID data / O. Zamirets // *Science looks ahead*. – 2012. – № 11 – P. 12.
24. Voronoi, G. Nouvelles applications des parameters continues a la theorie des formes quadratiques. Deuxieme Memorie: Recherches sur les parralleloedres primitifs / G. Voronoi // *J. reine angew.* – 1908. – № 134. – Pp. 198-287.
25. Терещенко, В. М. Аналіз методів розв'язання оптимізаційних задач обчислювальної геометрії / В. М. Терещенко Київ : ВПЦ «Київський університет», 2022. – 112 с.

26. Давидов, О. П. Комплексна система обробки зображень на основі алгоритмів триангуляції / О. П. Давидов // Комп'ютерна математика. – 2018. – № 2. – С. 48-59.
27. Harrington, E. C. The desirable function / E. C. Harrington // *Industrial Quality Control*. – 1965. – Vol. 21(10). – Pp. 494-498.
28. Смілка, В. А. Структура містобудівного моніторингу / В. А. Смілка // *Сучасні проблеми архітектури і містобудування*. – 2015. – Вип. 38. – С. 292-296.
29. Smilka, V. The Role of Monitoring in Sustainable Development / V. Smilka // *Baltic Journal of Real Estate Economics and Construction Management*. – 2019. – № 7 (1) – Pp. 245-254. DOI:10.2478/bjreem-2019-0015.

### References

1. Ponomarenko, V.S. (Ed.), Minukhin, S.V., & Kavun, S.V. (2008). *Metody ta modeli rozroblennia kompiuternykh system i merezh [Methods and models of development of computer systems and networks]*. KhNEU.
2. Midtbo, T. (1993). *Spatial Modeling by Delaunay Networks of Two and Three Dimensions*. Dr. Ing. thesis. Department of Surveying and Mapping, Norwegian Institute of Technology, University of Trondheim.
3. De Florian, L., Magillo, P., & Puppo, E. (2000). Compressing Triangulated Irregular Networks. *Geoinformatica*, 1(4), 67–88.
4. Watson, D.F. (1981). Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi polytopes. *The Computer Journal*, 24(2), 167–172.
5. Sloan, S. W. (1987). A fast algorithm for constructing Delaunay triangulations in the plane. *Adv. Eng. Software*, 9(1), 34–55.
6. Kuzyk, A.D., Trusevych, O.M., & Karabyn, O.O. (2009). Analysis of hydrant coverage areas of the city (on the example of Novoyavorivsk) [Analiz zon pokryttia hidrantamy terytorii mista (na prykladi Novoiavorivska)]. *Pozhezhna bezpeka – Fire Security*, 15, 71–77. <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/1244>.
7. Kuzyk, A.D., Karabyn, O.O., & Trusevych, O.M. (2008). Analiz zon obsluhovuvannia pozhezhno-riatuvalnykh chastyn za dopomohoiu diahram Voronoho [Analysis of service areas of fire and rescue units using Voronoi diagrams]. *Pozhezhna bezpeka – Fire Security*, 13, 73-78.
8. Terentiev, A.Yu. (2014). Vykorystannia suchasnykh HIS-tekhnologii dlia rozrakhunku ploshchi zhyvlennia derev u lisovykh nasadzhenniakh [The use of modern GIS technologies for calculating the area of tree nutrition in forest plantations]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy – Scientific bulletin of NLTU of Ukraine*, 24.5, 111-115. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnlntu\\_2014\\_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnlntu_2014_24).
9. Rudko, H.I., Nazarenko, M.V. (Ed.). (2011). *Heoinformatsiini tekhnologii v nadrokorystuvanni (na prykladi HIS K – MINE) [Geoinformation technologies in subsoil use (on the example of GIS K – MINE)]*. Akadempres.
10. Kokhan, S.S., M. Van Mervin (Ed.). (2003). *Heohrafichni informatsiini systemy [Geographic information systems]*. NAU.
11. Morozov, V.V., Shaporynska, N.M., Morozov, O.V., & Pichura, V. I. (2010). *Heoinformatsiini systemy v ahrosferi [Geoinformation systems in agriculture]*. Ahrarna osvita.
12. Horban, O.M., & Bakhrushyn, V.Ye. (2011). *Osnovy teorii system i systemnoho analizu [Fundamentals of systems theory and system analysis]*. HU «ZIDMU».
13. Pleshkanovska, A.M. (2014). Analiz riznomanitnosti struktury miskoi systemy na osnovi modeli Shennona [Analysis of the diversity of the urban system structure based on the Shannon model]. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia – Urban planning and territorial planning*, 51, 452-457. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP\\_2014\\_51\\_62](http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2014_51_62).
14. Ligmann-Zielinska, A., Church, R., & Jankowski, P. (2005). Sustainable urban land use allocation with spatial optimization. *8th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation* (pp. 1-18).
15. Kovalskiy, L.M., Kovalska, H.L., & Saienko, D.S. (2016). Problemy rekonstruktsii merezhi doshkilnykh navchalnykh zakladiv v ushchilnenii zhytlovi zabudovi [Problems of reconstruction of the network of pre-school educational institutions in a compact residential building]. *Dosvid ta perspektyvy rozvytku mist Ukrainy – Experience and prospects of the development of Ukrainian cities*, 31, 164-174.

16. Bulakh, I.V. (2017). Peredumovy reorhanizatsii merezhi dytiachykh likuvalnykh zakladiv Ukrainy [Prerequisites for Reorganization of Children's Medical Institution Network in the Ukraine]. *Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia – Modern Problems of Architecture and Urban Development*, 47, 444-450.
17. Kuzmina, H.V. (2003). Pytannia orhanizatsii merezhi pidpriemstv dribnorozdribnoi torhivli [The issue of organization of a network of retail trade enterprises]. *Perspektyvni napriamky proektuvannia zhytlovykh ta hromadskykh budivel – Prospective directions for the design of residential and public buildings. Modern trends in architecture and construction* (pp. 176-178).
18. Cabrera-Jara, N., Orellana, D., & Hermida, M. (2017). Assessing sustainable urban densification using geographic information systems. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 8(2), 237-243. <https://doi.org/10.12972/susb.20170021>.
19. Smilka, V.A. (2020). Settlement compactness as a quality characteristic of land use. *Baltic Journal of Real Estate Economics and Construction Management*, 8, 34-44. <https://doi.org/10.2478/bjreecm-2020-0004>.
20. Kovalska, G.L., & Smilka, V.A. (2019). Construction management in Ukraine. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 9(1), 1593-1600. <https://doi.org/10.35940/ijitee.A4563.119119>.
21. Ofitsiyni sait Holovnoho upravlinnia statystyky u m. Kyievi [The official website of the Main Directorate of Statistics in Kyiv]. (n.d.). <http://www.kyiv.ukrstat.gov.ua>.
22. Ofitsiyni sait Shevchenkivskoi raionnoi v misti Kyievi derzhavnoi administratsii [The official website of the Solomian district state administration in the city of Kyiv]. (n.d.). <https://solom.kyivcity.gov.ua/content/rozporyadzhennya.html>.
23. Zamirets, O. (2012). Building triangulation irregular network model based on regular GRID data. *Science looks ahead*, 11, 12-25.
24. Voronoi, G. (1908). Nouvelles applications des parameters continues a la theorie des formes quadratiques. *Deuxieme Memorie: Recherches sur les parralleloeddres primitifs*, 134, 198-287.
25. Tereshchenko, V.M. (2022). *Analiz metodiv rozviazannia optyimizatsiinykh zadach obchysliuvalnoi heometrii [Analysis of development methods for optimization of general geometry problems]*. VOC «Kyiv University».
26. Davydov, O.P. (2018). Kompleksna systema obrobky zobrazhen na osnovi alhorytmiv trianhuliatsii [Complex image processing system based on triangulation algorithms]. *Kompiuterna matematika – Computer Mathematics*, 2, 48-59.
27. Harrington, E.C. (1965). The desirable function. *Industrial Quality Control*, 21(10), 494-498.
28. Smilka, V.A. (2015). Struktura mistobudivnoho monitorynhu [Structure of urban planning monitoring]. *Suchasni problemy arkhitektury i mistobuduvannia – Modern problems of architecture and urban planning*, 38, 292-296.
29. Smilka, V. A. (2019). The Role of Monitoring in Sustainable Development. *Baltic Journal of Real Estate Economics and Construction Management*, 7(1), 245-254. <https://doi.org/10.2478/bjreecm-2019-0015>.

Отримано 16.05.2024

UDC 711.43

**Vladyslav Smilka**

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Architectural Theory  
Kyiv National University of Construction and Architecture (Ukraine, Kyiv)

E-mail: [smilka.va@knuba.edu.ua](mailto:smilka.va@knuba.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7025-9398>

ResearcherID: S-6934-2017. SCOPUSID: 57211859251

## APPLICATION OF DELONE TRIANGULATION FOR THE ANALYSIS OF PEDESTRIAN ACCESSIBILITY TO EDUCATIONAL INSTITUTIONS

*Accessibility to the main objects of public service is one of the aspects of the quality of life of the population according to the thematic group of indicators "Urban planning", which is defined by the international standard ISO 37120:2018, on the basis of which the state standard of Ukraine ISO 37120:2019 was adopted. There are significant differences between the requirements for the accessibility of a number of public service facilities in state standard of Ukraine ISO 37120:2019 and state*

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

building regulations B.2.2-12:2019, in particular for general education institutions. There is a problem of analyzing accessibility to public service facilities taking into account various initial parameters, in particular the location of public service facilities and indicators of accessibility to these facilities.

The purpose of the study is the analysis of pedestrian accessibility to communal primary education institutions of the Solomyan district of Kyiv, determination of the level of compliance of secondary education institutions in the area with the requirements established by state building regulations B.2.2-12:2019 state standard ISO 37120:2019. Based on the properties of Delaunay's triangulation, a methodology for evaluating the optimality (compliance with regulatory requirements) of planning solutions of educational institution's network is proposed, and reference options for the mutual location of such institutions are developed. The optimality criterion is the maximum coverage of the service territory with the minimum number of establishments. In order to evaluate the optimality of the above proposals, the composition of indicators of the network of educational institutions is proposed, which take into account the coverage of the service territory, the geometric parameters of the mutual location of institutions and compliance with the reference number of institutions. Indicators of the ratio of the area of the service area within the district to the area of the district ( $K_R$ ), the ratio of the average radius of the circumscribed circle to the average radius of the inscribed circle ( $K_K$ ), the ratio of the average length of the network line to the reference distance between objects ( $K_L$ ), the ratio of the number of establishments to the reference number of institutions ( $K_S$ ) are basic for calculating the general indicator of walking accessibility to educational institutions. It is proposed to evaluate the results of the calculations according to the Harrington scale. Approbation of the developed proposals was carried out for the network of educational institutions of the Solomyan district of Kyiv. Geoinformation technologies provide an opportunity to automate the proposed method, which will allow, on the basis of initial data describing the actual and design position of institutions, to perform a quick calculation of indicators and indicators of the network of public service facilities and to mathematically determine the optimal design solution.

**Keywords:** triangulation; network of educational institutions; radius of service; pedestrian accessibility; reference distance between institutions; indicators of the network of educational institutions; urban planning monitoring.

Fig.: 7. Table: 2. References: 29.

**Vitalii Zatserkovnyi<sup>1</sup>, Victor Vorokh<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor, Head the Department of Geoinformatics  
Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [vitalii.zatserkovnyi@gmail.com](mailto:vitalii.zatserkovnyi@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5187-6125>. Scopus ID: [57200165109](https://scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57200165109)

<sup>2</sup>Graduate Student of the Department of Geoinformatics

Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)

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

**ERS TECHNOLOGIES IN PRECISION FARMING**

*One of the urgent tasks of modern agricultural production is the problem of further development for ensuring the growing demand for food and other agricultural products on an innovative platform of precision agriculture. Precision farming involves the use of geographic information technologies, earth remote sensing (ERS) technologies, the Internet of Things (IoT), big data technologies and artificial intelligence (AI) aimed at increasing crop production and reducing costs.*

*The use of ERS technologies for precision farming tasks is due to the unprecedented availability of high spatial diversity images (spatial, spectral and temporal) and, accordingly, the ability to monitor crops, in irrigation management, nutrient input, pest and plant disease control, yield forecasting, etc.*

*The article provides an overview of the most commonly used ERS systems used in precision farming technologies. This makes it possible to optimize the use of agricultural resources for each section of the field and improve plant productivity based on data on soil structure, pH, nutrients and yield maps, plant protection products (PPP), irrigation in accordance with soil properties, topography, meteorological conditions and a number of other factors.*

*The use of satellite data requires further research aimed at improving the technology for storing and processing such data, namely cloud computing and machine learning. Given the certain complexity of image processing and the need for certain training of specialists, it is important to test simple but reliable algorithms for the application of remote sensing in real time, which will allow the wider implementation of ERS technologies in precision farming.*

**Keywords:** precision farming; geographic information technologies; remote sensing of the Earth; nutrient management, vegetation indices.

Fig.: 10. References: 14.

**Relevance of the research topic.** Relevance of the research topic. Due to the increase in the population of the Earth, which today is close to 7 billion and continues to grow rapidly and the decline in land resources due to their depletion, degradation, desertification, etc., the pressure on productive lands is becoming greater. Scientists predict [1] that arable land per capita will decrease from 0.23 hectares in 2000 to 0.15 hectares in 2050. The demand for food and agricultural products is projected to grow by 1.5-2.0 times by 2050 [2].

The problem can be solved by intensifying agriculture, introducing modern technologies, increasing the use of fertilizers, pesticides, irrigation, etc. However, this way of farming does not correspond to the concept of sustainable socio-economic rural development, and the irrational use of plant protection products (PPP) and mineral fertilizers, their imperfection leads to negative pressure on the environment, namely, on deforestation, resistance of pests and weeds to chemicals, soil degradation. Expansion of territories for intensive agriculture leads to the destruction of wildlife, water pollution, etc. [3].

Taking into account the above, an urgent task is the use of such technologies that can increase agricultural production by increasing the efficiency of resource use and reducing environment pollution [4]. Today, such technologies are precision farming technologies, which involve the use of a variety of geospatial information, taking into account the characteristics of each section of the field (making exactly the nutrients that plants need) and reducing the pressure on the environment, parallel driving, saving fertilizers, PPP, seeds, etc. [5].

The use of precision farming technologies will allow agricultural producers to reduce the negative environmental impact of intensive agriculture, optimize production, improving product quality and minimizing costs based on: the use of effective means of production, advanced methods of labor organization and the achievements of scientific and technological progress (STP); monitoring of fields using satellites and UAVs allows farmers to monitor the situation in real time; the use of sensors to obtain information about the state of crops in the field; the

use of satellite navigation system (GPS) allows you to obtain accurate data on the location of objects, to conduct field zoning for more effective control of crop and soil condition; applications for smartphones and tablets help to control and manage agricultural operations, order deliveries, plan product sales and track the transportation of goods over the Internet. This allows us to more fully take into account the resource potential of agricultural enterprises, the variety of soil, meso- and microclimatic features of each section of the field, to control the implementation of operations in the course of the machine's movement in the field (fertilization or PPP).

**Problem statement.** An important role in crop production is played by the assessment and consideration of meteorological, agrochemical, agrophysical, agrotechnical soil conditions for crop productivity, crop monitoring and yield forecasting. This indicates the urgent need to create comprehensive information and analytical systems to support precision farming, management of agro-industrial production, based on the use of GIS, ERS, GPS technologies and navigation software and hardware. And this cannot be done without using ERS data, generating a large amount of geospatial, often unique data that can be successfully used in precision farming technologies for managing agricultural enterprises, analyzing the state of fields, identifying crop problems, searching for the causes of these problems and developing effective solutions.

The use of ERS methods and technologies makes it possible to systematically analyze the state of the field, starting from the relief, heterogeneity of soils, their composition, the state of crops to multispectral field diagnostics, crop rotation and retrospective analysis for several years. With the help of retrospective analysis, it is possible to identify outdated problems: soil compaction, the consequences of improper treatment, lack of nitrogen and moisture, the impact of topography, etc. Retrospective analysis is used in the study of the current state of territories to assess the dynamics of its development.

One of the main advantages of applying the ERS data is the ability to compare crop yields over a long period of time, compare farming methods, weather conditions, varieties, etc. with the harvest obtained at the end of the season.

**Analysis of recent research and publications.** Scientists L. Moldovan, L. Novakovsky, B. Paskhaver, P. Sabluk, A. Tretyak, O. V. Shubravska and others made a significant contribution to the analysis of the development of the agro-industrial complex of Ukraine. The problems of introducing precision farming technologies are studied in the works of L. Anishevich, D. Voityuk, V. Garam, M. Makarenko, O. Tkachenko, M. Tsyganenko. Nevertheless, recognizing the scientific and practical value of the developments of these authors, it should be noted that the problem of using precision farming technologies in the system of modern crop production is far from being solved and requires scientific research. The article is aimed at analyzing, generalizing and evaluating approaches to the introduction of ERS technologies in precision farming technology.

**The article is aimed** at highlighting the real state of use of ERS technologies in crop monitoring tasks, assessing the state of fields, searching for reasons, providing recommendations for solving possible problems and preventing the occurrence of such problems in the future.

**Presentation of the main material.**

To improve the efficiency of agricultural business, advanced in economic and technological terms, the countries of the world - the USA, Japan, China, Germany, Great Britain, Denmark, the Netherlands, France, since the 80s of XX century, and since the 90s of 20th century Eastern European countries as well widely use precision farming technologies, the Internet of Things and wireless smart networks, which are becoming increasingly popular every year. This allows these countries to reach a qualitatively new level of production and successfully compete in the world market.

Precision Farming (Precision Agriculture) is a complex of high-tech and efficient technologies for the production and management of crop yields, taking into account within-field variability using information and geographic information technologies (GIT), remote sensing technologies of the Earth (ERS) and global positioning (GPS). This allows not only to automate and optimize production processes, but also to significantly reduce costs, increase the profitability of production and the quality of the final product. Precision farming technologies allow plants to obtain exactly the nutrients that they need.

A significant role in precision farming technologies is occupied by the Internet of Things, which provides agricultural enterprises with real data for making effective decisions. Today, even robots for weeding weeds are already available, which are programmed to move and weed within the specified coordinates. The robot drives between rows and pulls out weeds. Previously, this could not be imagined. Tractors with microprocessors are also common. This allows not only to control and adjust the process parameters, but also to show the actual operating speed, the amount of work performed, engine parameters and fuel consumption. All these smart technologies help to redistribute costs and optimize profits from each part of the field. In general, precision farming systems pay off quite quickly: costs are reduced, yields and land quality are increased [6].

All these listed technologies, as international experience shows, allow achieving a greater economic effect, increasing the reproduction of soil fertility and the level of ecological purity of agricultural production.

Due to the fact that each field is a set of inhomogeneities within one field -different relief (Fig. 1), various agricultural soils, chemical composition of soils (Fig. 2), nutrient content in the soil (Fig. 3), the degree of moisture, etc., in order to obtain maximum yields, various spatial information is needed about each section of the field and even about each square meter of this field (on the similarity of crops, the presence of nutrients, moisture, weeds, pests, plant diseases, etc.).

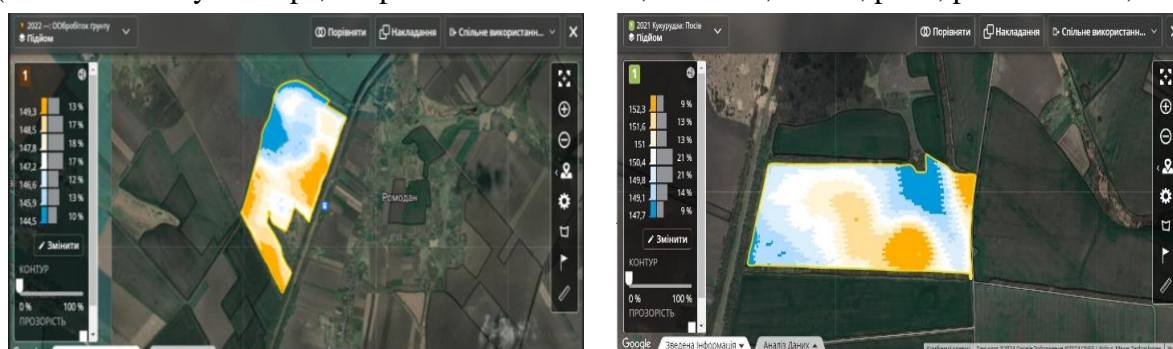


Fig. 1. Example of heterogeneity of field relief



Fig. 2. Example of different agrochemical properties of soils



Fig. 3. Example of alkaline properties of soils

The agrochemical survey technique in precision farming technology involves linking each soil sample taken to a single geolocation system carried out using a navigation system. This makes it possible to more accurately assess the results of surveys, to carry out a detailed account of the variability of the plant environment in space and in time, and to quickly control the productivity of crops on the field.

Monitoring of sown areas is a rather time-consuming process, both for large fields and for small plots scattered throughout the territory of territorial communities. If the crops are young, then monitoring can be carried out by walking or driving through the field, but if the plants have reached a height of 1-2 meters, this is already much more difficult to do. And the lack of information on the entire area of the field is usually a potential loss. Therefore, it is clear that there is an urgent need for the use of ERS technologies to monitor the condition of acreage.

Modern technologies of precision farming for monitoring can and use different methods of obtaining and processing spatial data, namely:

- ground - using various instruments (analysis of soil samples, sheet diagnostics, etc.);
- aerial photography using aircraft, unmanned aerial vehicles (UAV);
- space survey using satellites [7].

Each of these methods has both advantages and disadvantages, and can be quite effective only under certain circumstances.

Agroecological ground monitoring makes it impossible to obtain operational spatial information about the state of agricultural production in space and time in large areas, since the total area of agricultural land in Ukraine reaches more than 42 million hectares, and the area of arable land is 32.5 million hectares.

Taking into account the trends of intensification of agricultural production and global climatic changes, ERS technologies, in front of all satellite ones, become a necessary component of the agro-ecological monitoring system. Using special sensors and programs, global positioning systems (GPS), aerial photographs and satellite images, etc., it is possible to assess the biochemical properties of soils and control their fertility. An important issue is finding the optimal level of use of fertilizers and chemicals. With the help of pictures, you can find out that there are plenty of fertilizers in a certain area, on the other - on the contrary, they are not enough. That is, a differentiated approach is applied to each individual site. This allows you to effectively distribute resources and save fertilizers, plant protection products (PPP), watering, etc. In addition to soil analysis, using special software, you can program a seeder or sprayer for differential application of seeds, fertilizers, water, etc.

The use of remote sensing technologies (ERS) to monitor crops is widely used in many countries around the world and has a constant tendency to increase them.

ERS data of different spatial and temporal distinctions together with terrestrial data provide a lot of valuable and informative data for making reasonable optimal (rational decisions) in the process of management, resource allocation and crop optimization both at the level of countries and at the level of individual farms. The use of GPS devices integrated with smartphones or



handheld devices allows you to effectively map fields and individual areas. The use of GIS technologies provides a powerful toolkit for monitoring the stages of harvesting, combating plant diseases, assessing yields, etc.

As a result of the war unleashed by Russia, many agricultural enterprises faced the inability to carry out economic activities on part or all of the lands due to occupation, mining, constant shelling, etc.; staff shortage due to the outflow of the able-bodied population into the ranks of the Armed Forces of Ukraine, or to other units, safer regions; deficit of working capital and inventory; limited opportunities to sell grown products. This forced them to abandon a number of secondary technological operations and the introduction of only extremely necessary plant protection products, that is, the use of a differentiated approach to sowing and the economical introduction of nutrients.

The availability of high-resolution satellite images (spatial, spectral, and temporal) and their extensive archives contribute to the use of ERS in many precision farming programs and technologies, including crop monitoring, irrigation management, nutrient application, disease and pest control, and yield prediction, etc.

Flying over a certain area and performing a space survey of different differences, the satellite captures the necessary areas of the field. Using these images and special software, it becomes possible to map a variety of vegetation indices that can help understand the space-time variability of the conditions of the future harvest. Among the widely used indices are [7]:

- *normalized relative vegetation index (NDVI)*, allows to know the amount of photosynthetic active biomass in plants [8], is a measure of the difference in reflectivity between the red band (RED) and the near infrared band (NIR) images. NDVI ranges from -1 to +1, where positive values indicate areas covered with vegetation, and negative values indicate areas without vegetation. It is calculated by the formula:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}, \quad (1)$$

where *NIR* – reflection coefficient in the near infrared zone;

*RED* – reflection coefficient in the red spectral zone.

The main products calculated based on the NDVI index are crop status maps and productivity maps at a particular time or in dynamics. They are necessary for obtaining electronic map tasks and introducing precision farming tools. Today, there are quite a lot of satellites in orbit for shooting the Earth's surface, which differ in the frequency of passing over a specific territory of the Earth and ending with the spectrum of shooting the camera, diversity and cost. Based on data on biomass activity, the index is used in assessing the state of crops. Characterizing the density of vegetation, NDVI indicates those areas of the field that require sowing, application of PPP and fertilizers;

- *leaf area index (LAI)*, shows the ratio of total leaf area to land area. In turn, the area of leaves depends on the amount of intercepted light, accumulated nitrogen, respectively, surface temperature, etc. [7]. This index is a dimensionless coefficient, but its dimension can be reduced ( $m^2/m^2$ , ha/ha);

- *soil-adjusted vegetation index (SAVI)*, used to diagnose water stress and soil moisture conditions for many crops. Can be used for irrigation planning. It is calculated by the formula:

$$SAVI = \frac{(NIR-RED)(1+L)}{(NIR+RED+L)}, \quad (2)$$

where *L* – index of soil improvement;

– *normalized relative water index (NDWI)*, measures the amount of water in vegetation. It is used to assess water stress in plants, as well as to identify areas with a high water content in vegetation. It is calculated by the formula:






$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \tag{3}$$

– *normalized red margin difference (NDRE)*, measures the amount of chlorophyll in the leaves of plants. NDRE is often used to estimate nitrogen stress regardless of the amount of nitrogen in the soil. Often used to create variable rate nutrient input maps. It is calculated by the formula:

$$NDRE = \frac{NIR - REDedge}{NIR + REDedge} \tag{4}$$

The main characteristics of satellites used in precision farming are presented in Table 1.

Table 1 – Main characteristics of satellites used in precision farming

Indicator	Sentinel 2 	Landsat 8 	Landsat 9 	MODIS 	EOS SAT-1 
Spatial diversity, m/pixel	10 – 60	30	30	250-1000	1,4/2,8
Number of spectral channels	13	11	11	36	11
Shooting frequency, per day	5	8	8	4 times per day	daily up to 1 mln km <sup>2</sup>
Retrospective	From August 2015	From August 2013	September, 27 2021	From 1999	From January 2023
Quantity of photos per season	From March to October 54 photos	From March to October 34 photos	From March to October 34 photos	365	365
Products possible to get	Images in natural colors Vegetation index <i>NDVI</i>	Image in natural colors Vegetation index <i>NDVI</i> Soil temperature Snowiness	Image in natural colors Vegetation index <i>NDVI</i> Soil temperature Snowiness The smallest changes in lakes, rivers, forests and seas around the world	Image in natural colors NDVI vegetation index (change in dynamics by field for comparison with other fields)	Irrigation management, identifying problems that threaten crops, analyzing fertilizer and seed use, monitoring climate change, identifying plant stress from heat, cold and water, and monitoring crop growth

One of the priorities in the implementation of the concept of precision farming is the definition of the main stages of the project and their sequence. Thus, a logical model was built that demonstrates the basic steps necessary to introduce this technology and obtain data for further work with them Fig. 4.

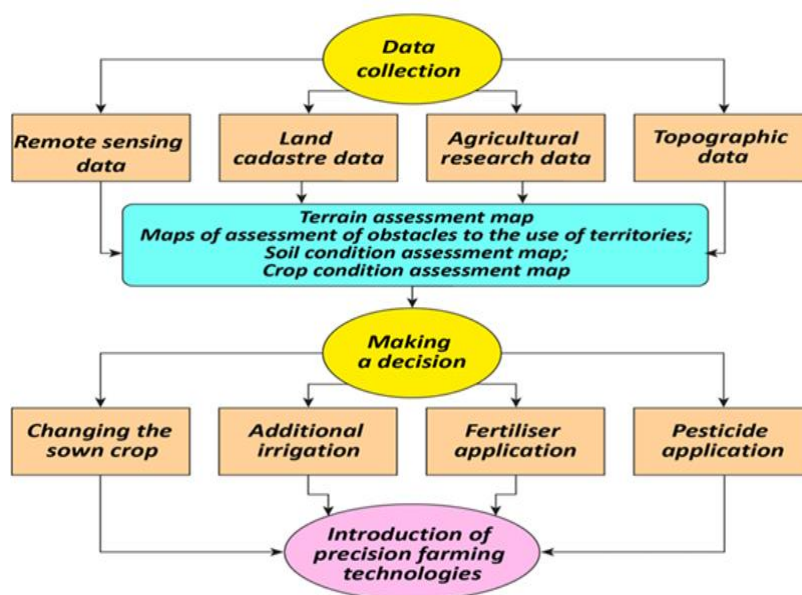


Fig. 4. Logical model of the sequence of stages for the introduction of precision farming technologies

After analyzing the current products and capabilities of ERS, the main vegetation indices that make it possible to conduct precision farming, the analysis was carried out using the methods considered. The objects of the study were agricultural fields of the Dnipropetrovsk region - the leader in sown areas in 2023 in Ukraine (1560.1 thousand hectares) [9].

Fig. 5, as an example, shows a snapshot of the territory of the Sinelnikovskiy district of the Dnipropetrovsk region.

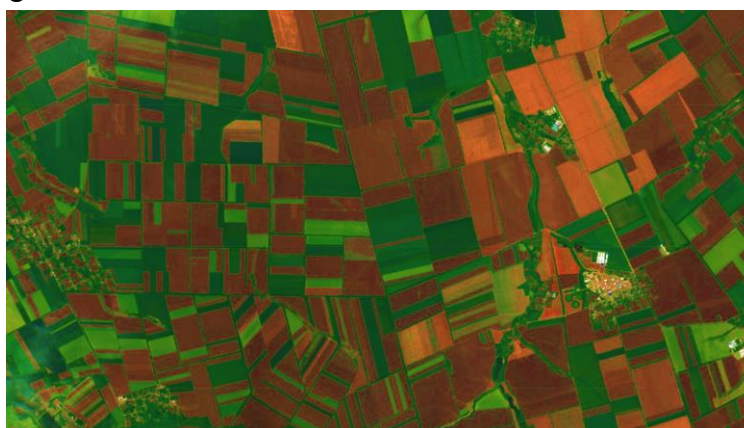


Fig. 5. A snapshot of the territory of Sinelnikovskiy district, Dnipropetrovsk region 21.05.2023, data of the Sentinel-2 MSI satellite, Level 2-A

The first step was to analyze the state of the crop using the NDVI calculation. As it is known, the values of the normalized differential vegetation index can be from -1 to + 1, where the values are (-1 - 0) infrastructure and water, and the values are (0 - + 1) plants [11].

So, plants that have NDVI values from 0 to 0.3 are probably not healthy and are usually negatively affected by the environment (lack of moisture, sun, fertilizers, etc.) [12]. In turn, plants with a value of 0.3 and above are healthy and feel great.

Maps of the distribution of NDVI values, made according to the Sentinel-2 MSI satellite, Level 2-A are shown in Fig. 6.

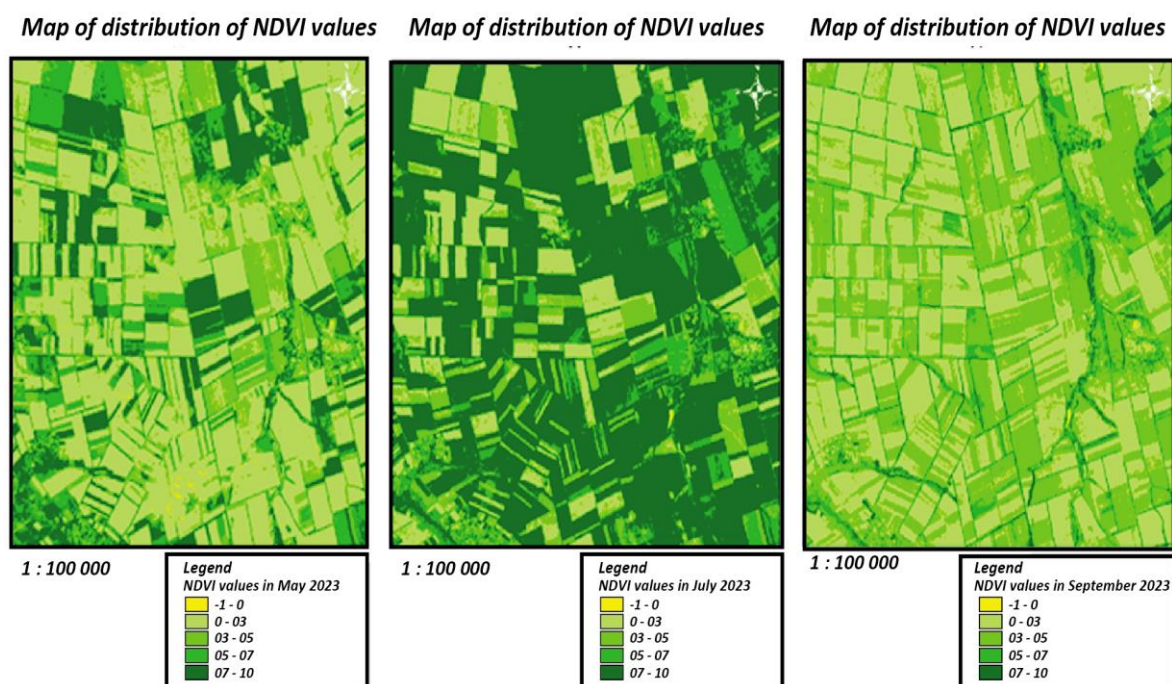


Fig. 6. NDVI maps, based on Sentinel-2 MSI, Level 2-A

At the beginning of the season, NDVI can demonstrate how the plant feels after wintering, also, as already mentioned, you can monitor the development and condition of plants during the season, as well as find out which fields are ready for harvesting at the end of the season - the lower the NDVI value, the closer to ripening is the culture [8].

Thus, according to the most uneven distribution of vegetation index values, the boundaries of one field were chosen, on the example of which further analysis of Fig. 7 was carried out.

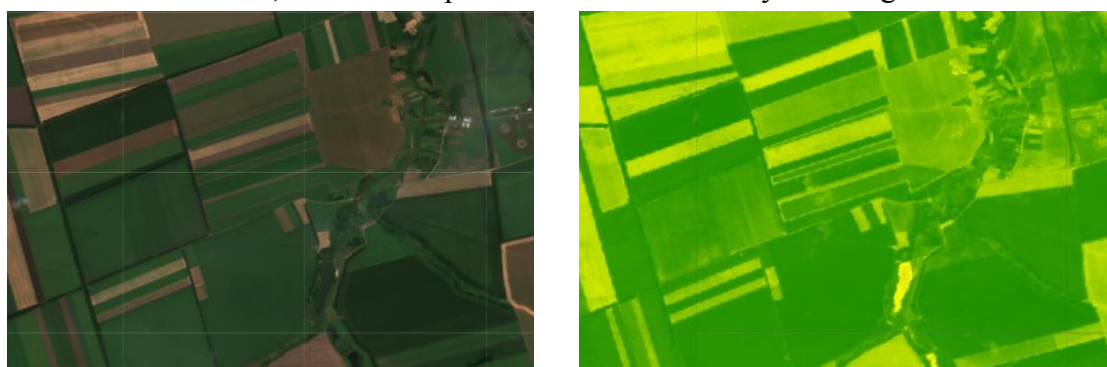


Fig. 7. Distribution of NDVI values in one of the fields in the Sinelnikovsky district in June 2023, data from the Sentinel-2 MSI satellite, Level 2-A

Analyzing maps of the distribution of active photosynthetic biomass, spots of lower values in the fields were found, signaling the heterogeneity of crop development.

The first step in this situation is to analyze the humidity of vegetation to eliminate the problem of insufficient irrigation. Since early detection of water shortages can prevent many negative impacts on crops.

So, using formula (3), distribution maps were calculated and constructed and the value of the normalized relative water index was estimated (Fig. 8).

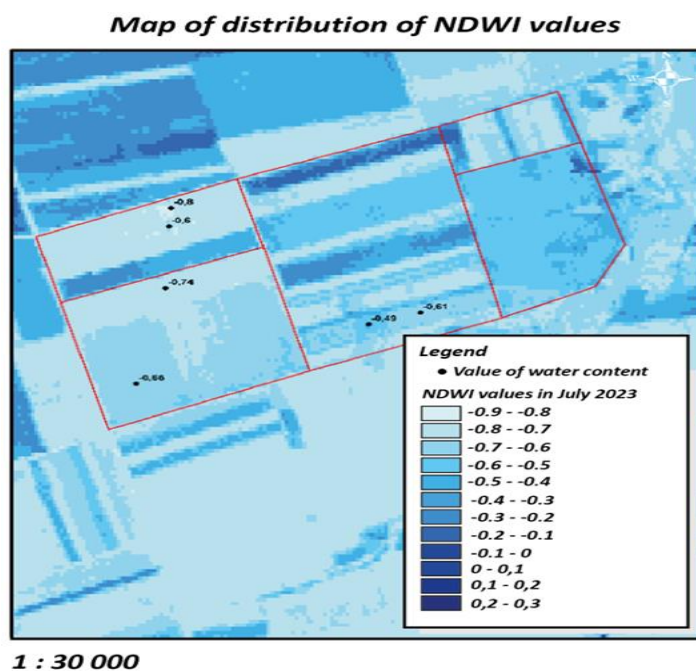


Fig. 8. Map of the distribution of NDWI values, made according to the Sentinel-2 MSI satellite, Level 2-A, own development

From the resulting map, clearly visible value difference within the individual fields. The largest was a difference of 0.2 units for the same crop, which may indicate both waterlogging and insufficient irrigation of certain areas of the field. In any case, this can be useful information for farmers who will make further decisions.

A similar situation was observed when calculating the soil-adjusted vegetation index (SAVI), which can also be used to diagnose water stress and soil moisture conditions for many crops and to plan irrigation. To assess nitrogen stress regardless of the amount of nitrogen in the soil and create nutrient input maps, it is also advisable to calculate the normalized red edge difference (NDRE). Being similar to NDVI, NDRE is a good option for monitoring crops at a late stage of their development, since closer to maturation the chlorophyll content increases, at which NDVI reaches a maximum value of 1.0 and, therefore, is saturated, which in turn avoids the use of NDRE [13; 14].

That is why the data for August 2023 in the field area of the previously considered Fig. 9 and Fig. 10 were further analyzed.

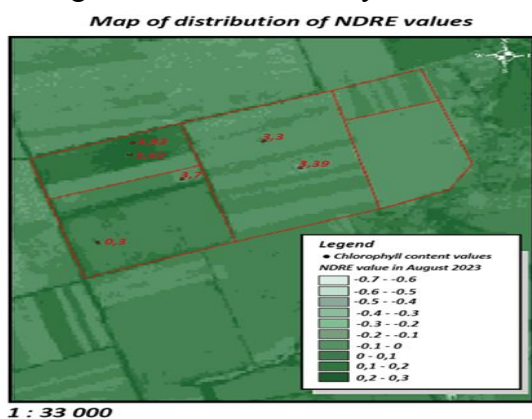


Fig. 9. NDRE map, based on Sentinel-2 MSI, Level 2-A



Fig. 10. Map of the distribution of values of vegetation indices, made according to the Sentinel-2 MSI satellite, Level 2-A, own development

**Conclusions.** Based on the collected and analyzed information, a logical model was developed that demonstrates the stages of introducing precision farming technologies. The primary stage is the collection of ERS data, since they enable both a quick preliminary review of territories and a detailed in-depth analysis with subsequent decision-making to support the development of crops.

Using statistical data on the amount of acreage in Ukraine, the territory was selected for the study, during which the values of the main indices of vegetation in this region were analyzed and fields were found that demonstrate a heterogeneous distribution of these values, respectively, may indicate the negative impact of certain factors on plant development.

This algorithm can be applied to other agricultural fields, it is also possible to modify it with the addition of more vegetation indices for the introduction of precision farming.

These results demonstrate the effectiveness of ERS technologies and GIS tools in precision farming.

### References

1. Lal, R. (1991). Tillage and Agricultural Sustainability. *Soil and Tillage Research*, 20, 133–146. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(91\)90036-W](https://doi.org/10.1016/0167-1987(91)90036-W).
2. Wik, M., Pingali, P., & Brocai, S. (2008). Global Agricultural Performance: Past Trends and Future Prospects. *World Bank Group*. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/9122>.
3. Hendricks, G. S., Shukla, S., Roka, F. M., Sishodia, R. P., Obreza, T. A., Hochmuth, G. J., & Colee, J. (2019). Economic and environmental consequences of overfertilization under extreme weather conditions. *Journal of Soil and Water Conservation*, 74(2), 160–171. <https://doi.org/10.2489/jswc.74.2.160>.
4. Delgado, J. A., Short, N. M., Roberts, D. P., & Vandenberg, B. C. (2019). Big data analysis for sustainable agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3, 54. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00054>.
5. Aubert, B. A., Schroeder, A., & Grimaudo, J. (2012). IT as enabler of sustainable farming: An empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture technology. *Decision Support Systems*, 54(1), 510–520. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dss.2012.07.002>.
6. Pavlenko, O. (2016, November 21). Zemlerobstvo maibutnoho ta ukrainski realii [Agriculture of the future and Ukrainian realities]. *LB.ua*. [https://lb.ua/blog/opavlenko/351352\\_zemlerobstvo\\_maybutnogo.html](https://lb.ua/blog/opavlenko/351352_zemlerobstvo_maybutnogo.html).
7. Zatserkovnyi, V. (2018). *Dystantsiine zonduvannia Zemli. Fizychni osnovy* [Remote sensing of the Earth. Physical basis]. Nizhyn Mykola Gogol State University.
8. OneSoil Company. (2018). *What the NDVI index is and how it makes a farmer's life easier*. <https://blog.onesoil.ai/en/what-is-ndvi>.
9. Latifundist Media. (2024). *Posivna onlain 2022/23* [Sowing campaign online 2022/23]. <https://latifundist.com/posevnaya-online-2023>.
10. Tsyliuryk, O. (2023, July 19). Dotsilnist i efektyvnist zastosuvannia tekhnolohii tochnoho zemlerobstva [Feasibility and efficiency of applying precision agriculture technologies]. *Ahronomiia Sohodni*. <https://agronomy.com.ua/statti/1785-dotsilnist-i-efektyvnist-zastosuvannia-tekhnolohii-tochnoho-zemlerobstva.html>.
11. Farmonaut Technologies Private Limited. (n.d.). *NDVI vs NDRE and Their Applications in Agriculture*. <https://farmonaut.com/blogs/ndvi-vs-ndre-and-their-applications-in-agriculture>.
12. Tsyliuryk, O. (2023, July 19). Dotsilnist i efektyvnist zastosuvannia tekhnolohii tochnoho zemlerobstva [Feasibility and efficiency of applying precision agriculture technologies]. *Ahronomiia Sohodni*. <https://agronomy.com.ua/statti/1785-dotsilnist-i-efektyvnist-zastosuvannia-tekhnolohii-tochnoho-zemlerobstva.html>.
13. Lapchynskyi, V., & Boiko, O. (2011). Mozhlyvosti vykorystannia HIS/DZZ tekhnolohii u tochnomu zemlerobstvi [Potential use of GIS / remote sensing technologies in precision agriculture]. *Journal of the Dnipro State Agrarian and Economic University*, 1, 81-84. [https://www.researchgate.net/publication/317121895\\_Mozhlyvosti\\_vikoristanna\\_GISDZZ\\_tekhnologij\\_u\\_tocnomu\\_zemlerobstvi](https://www.researchgate.net/publication/317121895_Mozhlyvosti_vikoristanna_GISDZZ_tekhnologij_u_tocnomu_zemlerobstvi).
14. Farmonaut Technologies Private Limited. (n.d.). *NDVI vs NDRE and Their Applications in Agriculture*. <https://farmonaut.com/blogs/ndvi-vs-ndre-and-their-applications-in-agriculture>.

**Список використаних джерел**

1. Lal, R. Tillage and Agricultural Sustainability / R. Lal // Soil and Tillage Research. – 1991. – № 20. – Pp. 133-146. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(91\)90036-W](https://doi.org/10.1016/0167-1987(91)90036-W).
2. World Bank Group [Electronic resource]. – Access mode: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/9122>
3. Economic and environmental consequences of overfertilization under extreme weather conditions / G. S. Hendricks, S. Shukla, F. M. Roka, R. P. Sishodia, T. A. Obreza, G. J. Hochmuth, J. Colee // J. Soil Water Conserv. – 2019. – № 74. – Pp. 160-171.
4. Big data analysis for sustainable agriculture / J. Delgado, N. M. Short, D. P. Roberts, B. Vandenberg // FSUFS. – 2019. – № 3. – Pp. 54.
5. Aubert, B. A. IT as enabler of sustainable farming: An empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture technology / B. A. Aubert, A. Schroeder, J. Grimaudo // Decis. Support Syst. – 2012. – № 54. – Pp. 510-520.
6. Землеробство майбутнього та українські реалії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://lb.ua/blog/opavlenko/351352\\_zemlerobstvo\\_maybutnogo.html](https://lb.ua/blog/opavlenko/351352_zemlerobstvo_maybutnogo.html).
7. Зацерковний, В. І. Дистанційне зондування Землі. Фізичні основи : навч. посіб. / В. І. Зацерковний. – Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2018. – 380 с.
8. Компанія OneSoil. What the NDVI index is and how it makes a farmer's life easier [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу: <https://blog.onesoil.ai/en/what-is-ndvi>.
9. Latifundist Media, 2013 -2024. Посівна онлайн 2022/23 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://latifundist.com/posevnaya-online-2023>.
10. Компанія «Агрономія сьогодні», 2023. Доцільність і ефективність застосування технологій точного землеробства [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://agronomy.com.ua/statti/1785-dotsilnist-i-efektyvnist-zastosuvannia-tekhnologii-tochnoho-zemlerobstva.html>.
11. Farmonaut Technologies Private Limited, 2023. NDVI vs NDRE And Their Applications in Agriculture [Electronic resource]. – Access mode: <https://farmonaut.com/blogs/ndvi-vs-ndre-and-their-applications-in-agriculture>.
12. Компанія «Агрономія сьогодні», 2023. Доцільність і ефективність застосування технологій точного землеробства [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://agronomy.com.ua/statti/1785-dotsilnist-i-efektyvnist-zastosuvannia-tekhnologii-tochnoho-zemlerobstva.html>.
13. Лапчинський, В. Можливості використання ГІС/ДЗЗ технологій у точному землеробстві. [Електронний ресурс] / В. Лапчинський, О. Бойко. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/317121895\\_Mozlivosti\\_vikoristanna\\_GISDZZ\\_tehnologij\\_u\\_tocnomu\\_zemlerobstvi](https://www.researchgate.net/publication/317121895_Mozlivosti_vikoristanna_GISDZZ_tehnologij_u_tocnomu_zemlerobstvi).
14. Farmonaut Technologies Private Limited, 2023. NDVI vs NDRE And Their Applications in Agriculture. [Electronic resource]. – Access mode: <https://farmonaut.com/blogs/ndvi-vs-ndre-and-their-applications-in-agriculture>.

Отримано 21.05.2024

УДК 631.58:528.8

**Віталій Іванович Зацерковний<sup>1</sup>, Віктор Васильович Ворох<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор, зав. кафедра геоінформатики  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

<sup>2</sup>аспірант кафедри геоінформатики  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

**ТЕХНОЛОГІЇ ДЗЗ У ПРЕЦИЗІЙНОМУ ЗЕМЛЕРОБСТВІ**

Одним з актуальних завдань сучасного аграрного виробництва є проблема подальшого розвитку спрямованого на забезпечення зростаючого попиту на продукти харчування та інші сільськогосподарські продукти на інноваційній платформі прецизійного землеробства. Прецизійне землеробство передбачає застосування геоінформаційних технологій, технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), Інтернет речей (IoT), технологій великих масивів даних та штучного інтелекту (ШІ), спрямованих на збільшення виробництва продукції рослинництва та зменшення витрат.

*Застосування технологій ДЗЗ для задач прецизійного землеробства обумовлене безпрецедентною доступністю знімків високої просторової розрізненості (просторової, спектральної та часової) і відповідно можливістю здійснювати моніторинг посівів, в управлінні зрошенням, внесенням поживних речовин, боротьбі зі шкідниками та хворобами рослин, прогнозуванні урожайності тощо.*

*У статті наданий огляд найбільш уживаних систем ДЗЗ, що використовуються в технологіях прецизійного землеробства. Це дозволяє оптимізувати використання ресурсів сільськогосподарських підприємств для кожної ділянки поля і покращити продуктивність рослин на підставі даних про структуру ґрунту, рН, поживних елементів та карт врожайності, засобів захисту рослин (ЗЗВ), зрошення відповідно до властивостей ґрунту, рельєфу, метеорологічних умов та ряду інших факторів.*

*Використання супутникових даних потребує подальших досліджень спрямованих на вдосконалення технологій збереження та обробки таких даних, а саме хмарних обчислень та машинного навчання. Враховуючи певну складність обробки зображень і необхідність певної підготовки фахівців, важливо апробувати прості, але надійні алгоритми для застосування дистанційного зондування в режимі реального часу, що дозволить більш широке впровадження технологій ДЗЗ у прецизійне землеробство.*

**Ключові слова:** *прецизійне землеробство; геоінформаційні технології; дистанційне зондування Землі; управління поживними речовинами, вегетаційні індекси.*

*Рис.: 10. Бібл.: 14.*



**Олександр Сергійович Прокопенко<sup>1</sup>, Віталій Іванович Зацерковний<sup>2</sup>**<sup>1</sup>магістр, геолог, ТОВ «Геологічна сервісна компанія ГСК» (Київ, Україна)**E-mail:** alex.prokop2206@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6817-1696><sup>2</sup>доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Геоінформатики

Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

**E-mail:** vitalii.zatserkovnyi@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-5187-6125>**ОЦІНКА ЗАПАСІВ АНАДОЛЬСЬКОГО РОДОВИЩА РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ РУД НА ОСНОВІ КАРКАСНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

Ця стаття присвячена оцінці запасів Анадольського родовища рідкісноземельних руд за допомогою каркасного моделювання з використанням програмного забезпечення Micromine. Проаналізовано геологічні дані, включаючи результати опробування свердловин та каналів, для створення тривимірної моделі рудного тіла. Оцінка запасів показала, що залучення сучасних технологій значно підвищує точність та ефективність геологорозвідувальних робіт. Отримані результати використовуються для геолого-економічної оцінки родовища, сприяючи подальшому ефективному видобутку.

**Ключові слова:** каркасна модель; рідкоземельні елементи; просторове моделювання; Анадольське родовище; Micromine.

Рис.: 4. Табл.: 1. Бібл.: 3.

**Актуальність теми дослідження** зумовлена необхідністю застосування передових технологій для точної оцінки запасів рідкісноземельних руд, що є критично важливим для подальшої ефективної розробки Анадольського родовища. В умовах зростаючої конкуренції та динамічних ринкових змін, галузь гірництва та геологорозвідки стикається з постійною потребою в оптимізації виробничих процесів. Сучасне програмне забезпечення, таке як Micromine, пропонує комплексні інструменти для каркасного моделювання, що дозволяє значно підвищити точність і достовірність оцінки запасів. Це дослідження має велике практичне значення для геологів та інженерів, які працюють у геологорозвідувальній та видобувній сфері, оскільки впровадження таких технологій сприяє підвищенню ефективності робіт і конкурентоспроможності підприємств.

**Постановка проблеми.** При підрахунку родовищ корисних копалин в Україні використовують аналогові методи, основною ціллю даної статті є залучення цифрових технологій в основі яких є просторове моделювання. Це дасть з більшою точністю оцінити ресурсну базу Анадольського родовища рідкісноземельних руд.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Багато наукових праць і досліджень було покладено в розробку сучасних інструментів, в основі яких лежить моделювання. Під час розвідки та розробки родовищ корисних копалин, також широко використовуються різні типи моделей. Сучасні програмні продукти, такі як: Micromine, Datamine, Leapfrog Geo, Geoteric, GOCAD, Petrel, Gemcom Surpac, Maptek Vulcan мають інтегровані інструменти для ручного, геостатистичного та умовного моделювання. В основу цих інструментів лягли наукові дослідження першопрохідців: George M. Matheron, André G. Journel, Michel David, Gustafson, L.B, Armstrong, M. та Dowd, P.A. Ці вчені відіграли ключову роль у вдосконаленні методів оцінки родовищ корисних копалин, що допомагає підвищити точність прогнозів та приймати більш обґрунтовані рішення в галузі гірничої промисловості.

Вивченням рідкоземельного зруденіння Азовського блоку Українського щита та зокрема Анадольського родовища займалися М. Козар [1], Г. Кульчицька, Д. Возняк [2] та інші.

**Мета статті.** Метою статті є оцінка запасів Анадольського родовища рідкісноземельних руд в основі якої лежить просторова модель. Побудова просторової моделі рудного тіла, більш чітко відображає реальну геоморфологію покладу, що своєю чергою дає можливість з кращою точністю оцінити запас корисної копали та її середній вміст.

**Виклад основного матеріалу.** Геологічне моделювання – це процес, за допомогою якого здійснюється реконструкція родовища корисних копалин, створюючи тривимірну віртуальну модель. Ця модель відображає як морфологічні характеристики, так і фізичні

властивості родовища. Використання тривимірного моделювання забезпечує загальне уявлення про родовище, а також дозволяє визначити його розмір, геометричну форму, умови залягання та просторовий розподіл мінералізації.

Розвиток гірничого підприємства дуже тривалий процес, який займає від років до десятиліть. За цей період підприємство проходить кілька етапів, від картування території до видобутку та виробництва. Одним з найскладніших етапів є геолого-економічна оцінка, для цього проводять величезну кількість досліджень різного роду, щоб визначити чи є доцільним освоєння цього родовища. Загалом ці дослідження проводяться різнопрофільними командами, які використовують геологічну модель для розробки технічних, економічних та екологічних проєктів. Ця модель також є основою для планування видобувних робіт, тому важливо, щоб вона була максимально точною та достовірною.

Геологічне моделювання є одним з обов'язкових та важливих етапів геолого-економічної оцінки родовищ корисних копалин [3].

Проте геологічна модель будується на основі обмежених даних вибірки, отриманих з керну свердловин. Такий підхід отримання даних є дороговартісним, тому геологорозвідувальна мережа свердловин планується з розрахунку співвідношення вартості до кількості отриманої корисної інформації в ході геологорозвідувальних робіт. Отже, загальний обсяг вибірки зазвичай дуже малий у порівнянні з розміром родовища, лише достатній для забезпечення представництва змінних, що досліджуються.

Для моделювання Анадольського родовища обрано метод каркасного моделювання. Каркасне моделювання, відоме також як метод паралельних розрізів, демонструє геометрію мінералізованої зони через серію вертикальних або горизонтальних розрізів, які систематично перетинають рудне тіло. Зазвичай вертикальні розрізи збігаються з геологорозвідувальними профілями, а горизонтальні створюються на певних абсолютних відмітках, використовуючи інтерпольовану інформацію з вертикальних розрізів.

Такі розрізи часто інтерпретуються вручну, із залученням програмного забезпечення. Під час цього процесу враховується накопичена інформація про геологічні особливості, геоморфологію, літологію, структуру та мінералізацію. Послідовне просторове поєднання цих секцій створює тривимірну модель рудного тіла.

Анадольське рудовмісне поле в металогенічному відношенні (Ce, La, Pr, Nd) приурочене до північно-східного флангу Криворізько-Павловської металогенічної зони.

Геологічна будова ділянки доволі проста. Тут розвинуті гранітоїди та мігматити анадольського комплексу з чисельними ксенолітами порід токмацького комплексу та темрюцької світи. Останні присутні іноді у вигляді лінз та смуг, шириною 50-250 м і протяжністю 350-1500 м. Породи анадольського комплексу (PR<sub>1an</sub>) розповсюджені по всій площі та вміщують інші комплекси порід, включаючи рудні тіла та метасоматити.

Породи анадольського комплексу вміщують рудне тіло та навколорудні метасоматити. Рудне тіло жильного типу, суттєво ортитового складу, яке простежено гірничими виробками поблизу із зоною агматитів (мілонітів). Простягання рудного тіла 310-325°, на флангах напрямом змінюється на субмеридіональний (330-350°). Падіння похиле – 21-49° на південь-захід [1].

Геологічна карта Анадольського родовища представлена на рис. 1.

Першим кроком при створенні просторової моделі родовища є аналіз та обробка всіх вхідних даних на основі яких була створена база даних в середовищі Micromine.

Дані, що використовувались для підрахунку запасів та внесені в базу даних:

- просторове розміщення 19 свердловин;
- просторове розміщення 20 канав та траншей;
- результати лабораторних досліджень – 375 значень (хімічне опробування) та 468 (спектральний аналіз);
- літологія свердловин і канав 195 зразків.

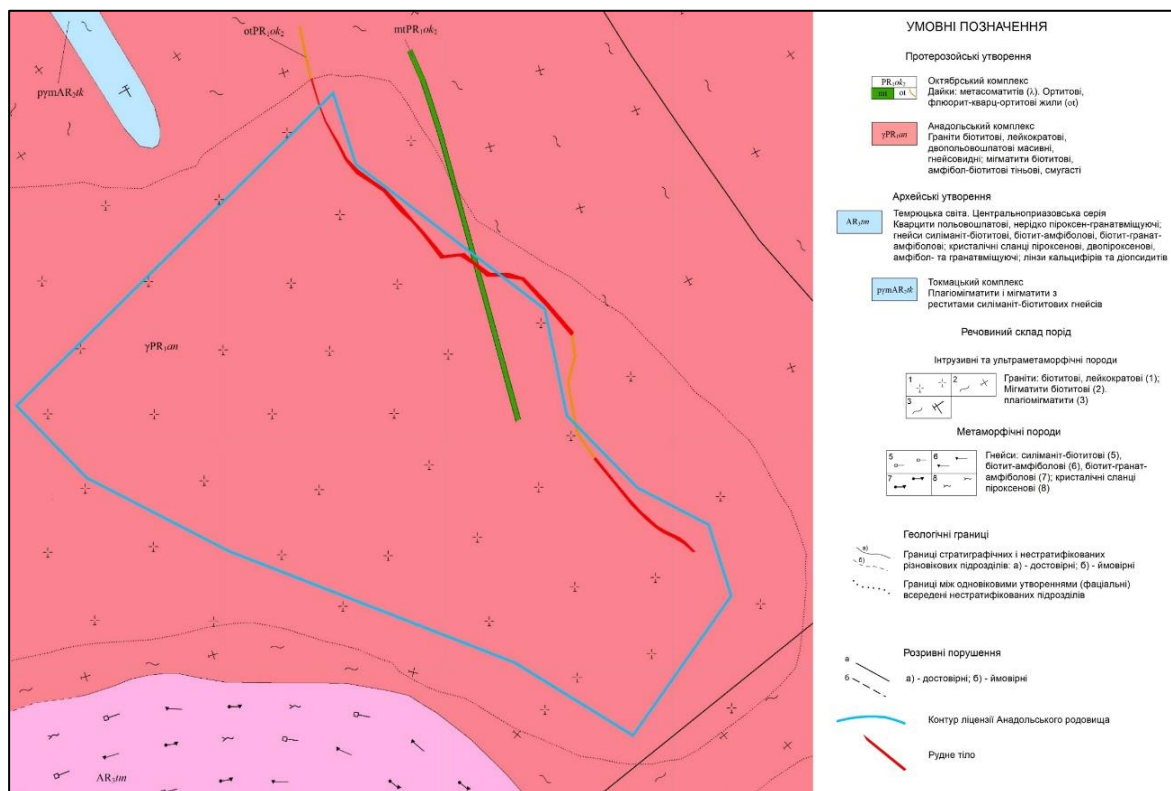


Рис. 1. Геологічна карта Анадольського родовища

Джерело: розроблено авторами.

Анадольське родовище розвідане 5 геологічними профілями, які розташовані в перекресток простягання рудного тіла. Відстань між профілями складає від 60 до 150 м. У кожному профілі було від 2 до 5 свердловин.

Перед оконтуренням було створено рудні композити по кожній свердловині та канаві. Для створення композитів було використано параметри кондицій:

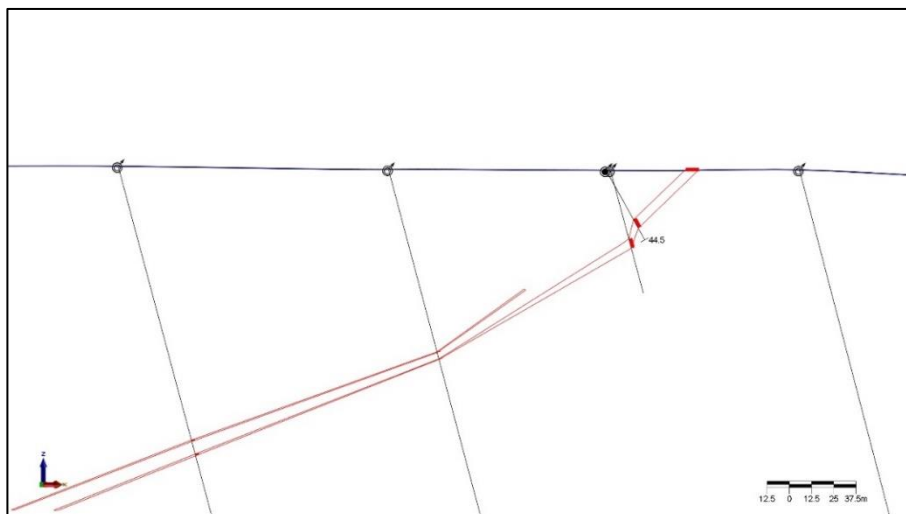
1. Бортовий вміст суми оксидів РЗЕ в пробі, що включається до підрахунку запасів при оконтурюванні рудного покладу по потужності – 0,1 %;

2. Мінімальна потужність рудних покладів у перетинах, що включаються в контур підрахунку запасів – 1 м. При меншій 1 м потужності проводити перерахунок вмісту суми оксидів рідкоземельних елементів(РЗЕ) на 1 м потужності за умови, що метрвідсоток забезпечує вміст суми оксидів РЗЕ – 0,1 %;

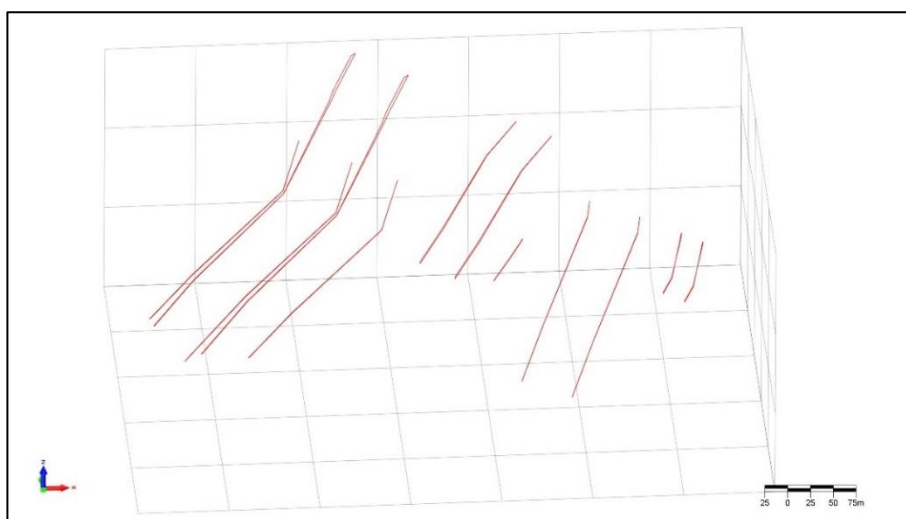
3. Максимальна потужність прошарків пустих порід або некондиційних руд, що включаються до підрахунку запасів – 2,0 м.

У результаті інтерпретації було створено контури рудного тіла в кожному геолого-розвідувальному профілі, а також було створено додаткові контури в ділянках екстраполяції для замикання на них моделі, загальна кількість контурів 12 (рис. 2, рис. 3).

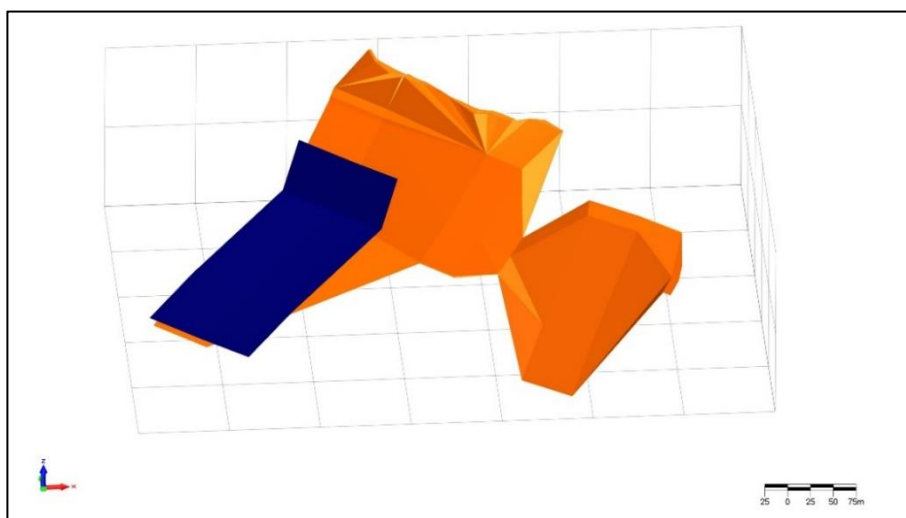
Наступним кроком є почергове об'єднання контурів у суцільну каркасну модель, яка є кінцевою ціллю каркасного моделювання. Створення каркасу відбувається на основі триангуляції точок у стрінгах контурів рудного тіла в сусідніх розрізах (рис. 4).



*Рис. 2. Свердловини I профілю з композитами та контур рудного тіла*  
Джерело: розроблено авторами.



*Рис. 3. Набір контурів рудного тіла для побудови моделі*  
Джерело: розроблено авторами.



*Рис. 4. Каркасна модель Анадольського родовища рідкоземельних руд*  
Джерело: розроблено авторами.

У результаті об'єднання контурів у каркас, було створено 2 каркаси, які оконтурюють поклади рідкісноземельних елементів (табл. 1).

*Таблиця 1 – Результати підрахунку запасів по каркасній моделі Анадольського родовища рідкоземельних руд*

Рудне тіло, №	Запаси, т	Середній вміст оксидів РЗЕ, %	Запаси оксидів РЗЕ, т
1	555325,7	1,6	8750,1
2	72172,7	0,5	351,2
Разом	627498,4	1,45	9101,3

Джерело: розроблено авторами.

**Висновки.** У роботі вперше було підраховано запаси Анадольського родовища основаного на просторовій моделі. Залучення сучасних технологій у процес оцінки запасів прискорює та збільшує точність отриманих результатів. Використання просторових моделей, допомагає якісно відобразити геометрію рудних тіл, що є вкрай важливим, як для оцінки, так і для їх розробки в майбутньому. Результати отримані у ході підрахунку запасів на каркасній моделі побудованій автором є порівнянними з підрахунком традиційним способом і різниця складає 11 %, що є допустимо з урахуванням різниці в підходах, які лежать в основі цих методів. Результати цього дослідження були використані при детальній геолого-економічній оцінці Анадольського родовища рідкоземельних руд.

#### Список використаних джерел

1. Козар, М. І. Попередня геолого-економічна оцінка запасів та ресурсів Анадольського родовища рідкісних земель : звіт станом на 01.01.19 / М. І. Козар. – Київ : ТОВ «РМ МАЙНІНГЗ», 2019. – Фонди ДНВП «Геоінформ України». Інв. № 66174.
2. Про умови утворення Анадольської аланітової “дайки” (Східне Приазов'я) / Г. Кульчицька, Д. Возняк, Ю. Галабурда, В. Бельський, С. Остапенко // Мінералогічний збірник. – 2012. – № 62.
3. Variatska, N. Micromine Tools for Geological and Economic Assessment of Mineral Projects / N. Variatska // 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. DOI: <http://dx.doi.org/10.3997/2214-4609.2022580150>.

#### References

1. Kozar, M. I. Preliminary geological and economic assessment of reserves and resources of the Anatolian deposit of rare earths (as of 01.01.19). RM MININGS LLC, 2019. Funds DNVP «Geoinform Ukraine». Inv. № 66174.
2. Kulchytska, H., et al. (2012). Formation conditions of the Anatolian allanite "dyke" (Eastern Azov Region). *Mineralogical Review*, 62(2), 141–147.
3. Variatska, N. (2022). Micromine Tools for Geological and Economic Assessment of Mineral Projects. *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. (Vol. 2022, pp. 1-5). <http://dx.doi.org/10.3997/2214-4609.2022580150>.

Отримано 22.05.2024

UDC 504.062.2:553.4.04:622.34(477.7)

#### **Oleksandr Prokopenko<sup>1</sup>, Vitalii Zatserkovnyi<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Master's Degree, Geologist, Geological Service Company LLC (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [alex.prokop2206@gmail.com](mailto:alex.prokop2206@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6817-1696>

<sup>2</sup> Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Geoinformatics  
Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [vitalii.zatserkovnyi@gmail.com](mailto:vitalii.zatserkovnyi@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5187-6125>

### **RESERVES CALCULATION OF THE ANADOL RARE EARTH ORE DEPOSIT BASED ON WIREFRAME MODELING**

*The necessity of applying advanced technologies for the accurate estimation of rare earth ore reserves is critically important for the further efficient development of the Anadol deposit. In the face of increasing competition and dynamic market changes, the mining and geological exploration industry faces a constant need to optimize production processes.*

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

*Modern software, such as Micromine, offers comprehensive tools for wireframe modeling, significantly enhancing the accuracy and reliability of reserve estimates. This research holds great practical significance for geologists and engineers working in the exploration and mining sector, as the implementation of such technologies improves operational efficiency and enterprise competitiveness.*

*In Ukraine, the calculation of mineral deposits typically employs analog methods. The primary aim of this article is to introduce digital technologies based on spatial modeling. This approach will allow for a more precise assessment of the resource base of the Anadol rare earth deposit.*

*The objective of this work is to estimate the reserves of the Anadol rare earth deposit using wireframe modeling methodology. The construction of a spatial model of the ore body more accurately reflects the actual geomorphology of the deposit, which in turn enables a more precise estimation of the mineral reserves and their average content.*

*Geological data were analyzed, and a database was created containing all available geological information, including the results of borehole and trench sampling, lithological descriptions of rocks, and mineralogical and geochemical studies of ore and surrounding rocks. This data was used to create 3D model of the ore body.*

*Using Micromine software and the manual (wireframe modeling) methodology, a spatial model of the ore deposits was created, and their reserves were estimated.*

*For the first time, the reserves of the Anadol deposit were calculated based on a 3D model. The use of modern technologies in the reserve estimation process accelerates and increases the accuracy of the results obtained. The application of 3D models helps to qualitatively represent the geometry of ore bodies, which is crucial for both the estimation and future development of the deposits. The results of this study were used in the detailed geological and economic evaluation of the Anadol rare earth deposit.*

**Keywords:** wireframe model; rare earth elements; spatial modeling; Anadol deposit; Micromine.

*Fig.: 4. Table: 1. References: 3.*

**Василь Васильович Гой<sup>1</sup>, Сергій Анатолійович Халіков<sup>2</sup>,  
Роман Сергійович В'яткін<sup>3</sup>, Ігор Юрійович Бурвіков<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>кандидат економічних наук, докторант кафедри економіки та маркетингу  
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)  
**E-mail:** [vasssgoi@gmail.com](mailto:vasssgoi@gmail.com) **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1822-4478>

<sup>2</sup>аспірант кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем  
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)  
**E-mail:** [serhii.khalikov@kname.edu.ua](mailto:serhii.khalikov@kname.edu.ua) **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-7439-9864>

<sup>3</sup>доктор філософії, асистент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем  
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)  
**E-mail:** [viatkinr@gmail.com](mailto:viatkinr@gmail.com) **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8807-9988>

<sup>4</sup>магістрант кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем  
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)  
**E-mail:** [scbkha@gmail.com](mailto:scbkha@gmail.com) **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-2821-901X>

## **ПРОСТОРОВІ ЧИННИКИ ГЕОПРОСТОРОВОГО РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД**

*Доведена актуальність визначення просторових чинників геопросторового розвитку територіальних громад. У результаті дослідження досягнута мета та вирішені завдання. У більшості регіонів визначено посереднє просторове забезпечення. На несуттєвому або незначному рівнях встановлено формування та використання просторового забезпечення територіальних громад у Донецькому та Луганському регіонах. Запропоновані заходи для підвищення ефективності формування та використання просторових чинників щодо забезпечення геопросторового розвитку територіальних громад.*

**Ключові слова:** геопросторовий розвиток; територіальні громади; теоретичні положення; оцінка; просторові чинники; експертні методи.

Табл.: 3. Бібл.: 9.

**Актуальність теми дослідження.** Сучасні трансформаційні умови, поглиблення змін у місцевому самоврядуванні, зростання значення територіальних громад (ТГ) потребують переосмислення підходів до забезпечення їх розвитку. Поряд з цим, відбувається гальмування представленого процесу внаслідок агресії РФ, зниження ефективності використання земельно-майнового комплексу, на недостатньому рівні сформовано просторове забезпечення для прийняття рішень щодо розвитку територіальних громад. Крім того, поглиблюють представлені процеси відсутність системи геопросторового розвитку ТГ на основі застосування сучасних геоінформаційних систем.

Крім того, особливого значення має використання математичних методів для створення та побудови кількісної основи просторового забезпечення у системі геопросторового розвитку територіальних громад.

Таким чином, тема дослідження щодо формування та використання просторового забезпечення геопросторового розвитку ТГ є актуальною, яка спрямована на зростання ефективності їх функціонування та впливає на рівень застосування земельно-майнового комплексу як одного з важливих елементів.

**Постановка проблеми.** В умовах поглиблення децентралізаційних процесів, розвитку територіальних громад, проблемним питанням залишається формування та використання земельно-майнового комплексу як основи забезпечення ефективності їх функціонування. У цьому контексті створення та реалізація геопросторового забезпечення шляхом застосування сучасних геоінформаційних систем (ГІС) дозволяє вирішити проблемні питання формування напрямів геопросторового розвитку ТГ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Просторові аспекти та особливості для забезпечення територіального розвитку виокремлюються у роботах [1–2].

Для забезпечення розвитку застосовуються просторові параметри та напрями його забезпечення. У цьому контексті заслуговують на увагу наукові розробки [3–7].

Слід зазначити, що для просторового розвитку територіальних громад виокремлені наступні чинники: природно-ресурсні та кліматичні; транспортно-географічні; демографічні; екологічні; інфраструктурні; виробничо-промислові; фінансово-економічні; військово-політичні; регуляторні; громадської, культурної та соціальної діяльності; техніко-технологічні; ринкові та інвестиційні; продовольчої безпеки; інформаційні; інституціональні; розвиткові; людські та соціальні; територіальні; інклюзивні [8–9].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** В існуючих дослідженнях відсутні єдині підходи до визначення геопросторового розвитку ТГ як системної категорії, що забезпечує ефективність їх функціонування та побудови якісно нового стану їх застосуванням сучасних геоінформаційних систем. На недостатньому рівні сформовані та реалізуються можливості застосування ГІС для забезпечення функціонування територіальних громад. На низькому рівні розроблено геопросторове забезпечення та інформаційні параметри побудови геопросторової системи управління земельно-майновим комплексом територіальних громад. Не виокремлено чинники, що впливають на геопросторовий розвиток ТГ, знижуючи можливості застосування кількісної основи ГІС.

**Метою статті** є визначення просторових чинників у системі забезпечення геопросторового розвитку територіальних громад. Для досягнення поставленої мети вирішуються завдання:

- оцінка просторових чинників у системі забезпечення геопросторового розвитку територіальних громад;
- розробка заходів для підвищення ефективності формування та використання просторових чинників для забезпечення геопросторового розвитку територіальних громад.

**Виклад основного матеріалу.** Узагальнюючи чинне нормативно-правове забезпечення, теоретико-методичні положення, виокремлені просторові чинники забезпечення геопросторового розвитку територіальних громад, а саме рівні: забезпечення картографічною та геодезичною інформацією, наявність землевпорядної документації, встановлення меж територіальних громад, ефективності використання об'єктів земельно-майнового комплексу, формування та використання геоінформаційних систем і інфраструктури геопросторових даних, ефективності функціонування організаційних структур у ТГ для формування й використання просторових чинників.

Для оцінки просторових чинників у системі забезпечення геопросторового розвитку ТГ застосовується метод експертних оцінок. Формування експертної групи здійснюється відповідно до критеріїв:

- рівень професійної освіти;
- наявність вченого звання та наукового ступеня;
- досвід реалізації проєктів у сфері функціонування територіальних громад;
- досвід реалізації проєктів для забезпечення геопросторового розвитку;
- досвід участі для проведення експертних оцінок;
- рівень участі в командах щодо забезпечення регіонального й територіального розвитку;
- рівень та можливості використання геоінформаційних технологій.

Оцінка просторових чинників для забезпечення геопросторового розвитку територіальних громад здійснюється відповідно розроблено шкали, значення якої варіюється від 0 до 10. Значення можливих результатів оцінки просторових чинників представлені в табл. 1.

*Таблиця 1 – Значення можливих результатів оцінки просторових чинників для забезпечення геопросторового розвитку територіальних громад, відн. од.*

Значення просторового чинника	Рівень
1	2
0	відсутній
1	низький
2	незначний



Закінчення табл. 1

1	2
3	несуттєвий
4	несуттєвий помірний
5	помірний
6	суттєвий помірний
7	суттєвий
8	значний
9	високий
10	абсолютний

Джерело: розроблено авторами.

Результати експертного опитування просторових чинників у системі геопросторового розвитку територіальних громад узагальнюються на регіональному рівні й представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати експертного опитування просторових чинників у системі геопросторового розвитку територіальних громад на регіональному рівні, відн. од.

Регіони	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$	$E_6$	$E_7$	$E_8$	$E_9$	$E_{10}$
Вінницький	7	6	7	7	6	6	7	6	8	7
Волинський	6	6	6	6	6	6	7	6	7	7
Дніпропетровський	6	7	7	7	6	6	7	6	7	7
Донецький	4	4	4	4	4	3	4	3	4	3
Житомирський	5	6	6	6	5	6	6	5	7	6
Закарпатський	7	7	8	8	7	7	8	7	8	8
Запорізький	7	6	6	7	7	6	7	6	7	7
Івано-Франківський	7	7	7	7	7	7	8	7	7	7
Київський	6	6	6	7	6	6	7	6	6	7
Кіровоградський	5	5	5	6	5	6	6	5	5	5
Луганський	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3
Львівський	9	9	8	8	8	8	8	7	9	9
Миколаївський	7	6	7	6	6	7	6	5	7	7
Одеський	9	9	8	8	8	8	8	7	8	8
Полтавський	8	7	7	7	8	7	7	6	8	8
Рівненський	6	6	7	6	6	6	6	5	7	7
Сумський	6	6	6	6	6	6	7	6	6	6
Тернопільський	6	7	6	7	7	7	6	6	7	7
Харківський	8	8	7	7	7	7	7	6	8	8
Херсонський	7	7	6	7	7	6	6	5	6	7
Хмельницький	6	6	6	6	7	6	6	6	7	7
Черкаський	6	7	6	6	6	6	6	6	6	6
Чернівецький	7	7	7	7	7	7	7	7	8	8
Чернігівський	6	6	6	6	6	6	6	6	7	6

Джерело: розроблено авторами.

Для визначення узагальнюючого безпекового чинника визначаються шляхом застосування моделі середньоарифметичної ( $\overline{GD}_j$ ):

$$\overline{GD}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n E_i. \quad (1)$$

Результати оцінки узагальнюючого безпекового чинника у системі геопросторового розвитку територіальних громад на регіональному рівні представлені у табл. 3.

Таблиця 3 – Результати оцінки узагальнюючого безпекового чинника у системі геопросторового розвитку територіальних громад на регіональному рівні, відн. од.

Регіони	Значення узагальнюючого показника
Вінницький	6,7
Волинський	6,3
Дніпропетровський	6,6
Донецький	3,7
Житомирський	5,8
Закарпатський	7,5
Запорізький	6,6
Івано-Франківський	7,1
Київський	6,3
Кіровоградський	5,3
Луганський	2,9
Львівський	8,3
Миколаївський	6,4
Одеський	8,1
Полтавський	7,3
Рівненський	6,2
Сумський	6,1
Тернопільський	6,6
Харківський	7,3
Херсонський	6,4
Хмельницький	6,3
Черкаський	6,1
Чернівецький	7,2
Чернігівський	6,1

Джерело: розроблено авторами.

**Висновки.** Таким чином, у результаті дослідження визначено, що суттєвим або значним рівнем просторового забезпечення характеризується функціонування територіальних громад у регіонах: Закарпатському, Івано-Франківському, Львівському, Одеському, Полтавському, Чернівецькому. У більшості регіонів визначаються посереднім просторовим забезпеченням. Поряд з цим, на несуттєвому або незначному рівнях характеризується формування та використання просторового забезпечення територіальних громад у Донецькому та Луганському регіонах.

Заходами для підвищення ефективності формування та використання просторових чинників для забезпечення геопросторового розвитку територіальних громад є:

- проведення робіт щодо реалізації проєктів просторового забезпечення територіальних громад;
- встановлення меж земельних ділянок ТГ;
- розробка та впровадження комплексних планів розвитку територіальних громад;
- формування картографічного забезпечення ТГ;
- розширення можливостей застосування геоінформаційних систем і технологій для формування просторового забезпечення територіальних громад;
- формування та застосування сучасної геопросторової та інструментальної бази для забезпечення геопросторового розвитку ТГ;
- побудова системи геопросторового розвитку територіальних громад.

#### Список використаних джерел

1. Мезенцева, Н. І. Суспільно-географічні дослідження формування середнього класу в Україні / Н. І. Мезенцева, О. М. Гнатюк, В. М. Андріянова, Г. М. Плаксієнко // Економічна та соціальна географія. – 2011. – Вип. 62. – С. 69-177.

2. Мельник, І. Г. Суспільно-географічні аспекти старіння населення в Україні / І. Г. Мельник // *Економічна та соціальна географія*. – 2011. – Вип. 62. – С. 73-84.
3. Васильченко, Г. Планування розвитку територіальних громад. Навчальний посібник для посадових осіб місцевого самоврядування / Г. Васильченко, І. Парасюк, Н. Єременко // Асоціація міст України. – Київ : ТОВ «Підприємство «ВІ ЕН ЕЙ», 2015. – 256 с.
4. Дорош, А. Й. Нові підходи до територіального планування в Україні з врахуванням децентралізаційних процесів та досвіду Австрії / А. Й. Дорош // *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*. – 2016. – № 3. – С.78-85.
5. Третяк, А. М. Територіально-просторове планування використання земель в Україні: понятійний базис в контексті безпеки життєдіяльності людей / А. М. Третяк, В. М. Третяк, Т. М. Прядка, Ю. Л. Скляр, Н. О. Капінос // *Агросвіт*. – 2021. – № 15. – С. 3-13.
6. Busck, A. G. Planning approaches for rural areas: Case studies from Denmark, Sweden and the Netherlands / A. G. Busck // *Geografisk Tidsskrift – Danish Journal of Geography*. – 2009. – № 109(1). – Pp. 15-32.
7. Kahila–Tani M. Let the Citizens Map – Public Participation GIS as a Planning Support System in the Helsinki Master Plan Process / M. Kahila–Tani // *Planning Practice & Research*. – 2015. – Pp. 1–20.
8. Кизим, М. О. Чинники просторового розвитку територіальних громад у системі публічного управління територіями / М. О. Кизим, І. Б. Семигуліна, І. В. Ярошенко // *Регіональна економіка. Проблеми економіки*. – 2022. – № 2 (52). – С. 83-92.
9. Пігуль, Н. Г. Соціальна інфраструктура: функціональне призначення та особливості розвитку / Н. Г. Пігуль // *Економічний аналіз*. – 2014. – Т. 16. – № 1. – С. 117-122.

### References

1. Mezentseva, N.I., Hnatiuk, O.M., Andriianova, V.M., Plaksienko, H.M. (2011). *Suspilno-geografichni doslidzhennia formuvannia serednoho klasu v Ukraini* [Socio-geographic studies of the formation of the middle class in Ukraine]. *Ekonomichna ta sotsialna heohrafiia – Economic and social geography*, 62, 69–177.
2. Melnyk, I.H. (2011). *Suspilno-geografichni aspekty starinnia naselennia v Ukraini* [Socio-geographic aspects of population aging in Ukraine]. *Ekonomichna ta sotsialna heohrafiia – Economic and social geography*, 62, 73–84.
3. Vasylichenko, H., Parasiuk, I., Yeremenko, N. (2015). *Planuvannia rozvytku terytorialnykh hromad* [Planning the development of territorial communities]. *Asotsiatsiia mist Ukrainy*.
4. Dorosh, A.Y. (2016). *Novi pidkhody do terytorialnoho planuvannia v Ukraini z vrakhuvanniam detsentralizatsiynykh protsesiv ta dosvidu Avstrii* [New approaches to territorial planning in Ukraine, taking into account decentralization processes and the experience of Austria]. *Zemleustriy, kadastr i monitorynh zemel – Land management, cadastre and land monitoring*, 3, 78–85.
5. Tretiak, A.M., Tretiak, V.M., Priadka, T.M., Skliar, Yu.L. Kapinos, N.O. (2021). *Terytorialno-prostorove planuvannia vykorystannia zemel v Ukraini: poniatiynyy bazys v konteksti bezpeky zhyttiediiialnosti liudey* [Territorial and spatial planning of land use in Ukraine: a conceptual basis in the context of the safety of people's livelihoods]. *Ahrosvit – Agrosvit*, 15, 3–13.
6. Busck, A. G. (2009). *Planning approaches for rural areas: Case studies from Denmark, Sweden and the Netherlands*. *Geografisk Tidsskrift – Danish Journal of Geography*, 109(1), 15–32.
7. Kahila–Tani, M. (2015). *Let the Citizens Map – Public Participation GIS as a Planning Support System in the Helsinki Master Plan Process*. *Planning Practice & Research*, 1–20.
8. Kyzym, M.O., Semyhulina, I.B., Yaroshenko, I.V. (2022). *Chynnyky prostorovoho rozvytku terytorialnykh hromad u systemi publicnogo upravlinnia terytoriiamy* [Factors of spatial development of territorial communities in the system of public management of territories]. *Rehionalna ekonomika. Problemy ekonomiky – Regional economics. Problems of the economy*, 2(52), 83–92.
9. Pihul, N.H. (2014). *Sotsialna infrastruktura: funktsionalne pryznachennia ta osoblyvosti rozvytku* [Social infrastructure: functional purpose and features of development]. *Ekonomichniy analiz – Economic analysis*, 16(1), 117–122.

Отримано 28.05.2024

**Vasyl Goi<sup>1</sup>, Serhii Khalikov<sup>2</sup>, Roman Viatkin<sup>3</sup>, Igor Burvikov<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Economic Science, Doctoral Candidate at the Department of Economics and Marketing  
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)  
**E-mail:** [vasssgoi@gmail.com](mailto:vasssgoi@gmail.com) **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1822-4478>

<sup>2</sup>Graduate student of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems  
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)  
**E-mail:** [serhii.khalikov@kname.edu.ua](mailto:serhii.khalikov@kname.edu.ua) **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-7439-9864>

<sup>3</sup>Doctor of Philosophy, assistant of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems  
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)  
**E-mail:** [viatkinr@gmail.com](mailto:viatkinr@gmail.com) **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8807-9988>

<sup>4</sup>Master's student of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems  
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)  
**E-mail:** [scbkha@gmail.com](mailto:scbkha@gmail.com) **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-2821-901X>

**SPATIAL FACTORS OF GEOSPATIAL DEVELOPMENT  
OF TERRITORIAL COMMUNITIES**

*The relevance of determining the spatial factors of the geospatial development of territorial communities has been proven. As a result of the study, the goal of the study to determine spatial factors in the system of ensuring geospatial development of territorial communities was achieved. To achieve the set goal, the following tasks were solved: assessment of spatial factors in the system of ensuring geospatial development of territorial communities; development of measures to increase the efficiency of the formation and use of spatial factors to ensure the geospatial development of territorial communities. Of particular importance is the use of mathematical methods for creating and building a quantitative basis for spatial support in the system of geospatial development of territorial communities.*

*As a result of the study, it was determined that the functioning of territorial communities in the regions: Zakarpattia, Ivano-Frankivsk, Lviv, Odesa, Poltava, Chernivtsi is characterized by a significant or significant level of spatial support. In most regions, they are determined by mediocre spatial provision. Along with this, the formation and use of spatial provision of territorial communities in the Donetsk and Luhansk regions is characterized at an insignificant or insignificant level.*

*Measures to increase the effectiveness of the formation and use of spatial factors to ensure the geospatial development of territorial communities are: carrying out work on the implementation of projects of spatial provision of territorial communities; establishment of boundaries of land plots; development and implementation of comprehensive plans for the development of territorial communities; formation of cartographic support; expanding the possibilities of using geoinformation systems and technologies for the formation of spatial provision of territorial communities; formation and application of a modern geospatial and instrumental base to ensure geospatial development; building a system of geospatial development of territorial communities.*

**Keywords:** *geospatial development; territorial communities; theoretical positions; assessment; spatial factors; expert methods.*  
*Table: 3. References: 9.*

**Михайло Леонідович Багін**

кандидат економічних наук, здобувач кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем  
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)

E-mail: [bahin.m@ukr.net](mailto:bahin.m@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0178-6194>

**НАУКОВО ОБҐРУНТОВАНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
ІНВЕСТИЦІЙНОЇ ПРИВАБЛИВОСТІ ЗЕМЕЛЬ РЕГІОНІВ**

*Доведено, що зростання значення земельних відносин у сучасній системі місцевого самоврядування, потребує переосмислення підходів до забезпечення інвестиційної привабливості земель на регіональному рівні. У сучасних надзвичайних умовах спостерігається зниження ефективності використання земель, скорочення можливостей залучення інвестицій у сферу земельних відносин, що негативно впливає на розвиток регіонів. Поглиблюють представлені процеси негативний вплив зовнішніх і внутрішніх чинників, наслідки агресії РФ, розбалансування регіональних й стейкхолдерних зв'язків. Для вирішення представлених питань запропоновані науково обґрунтовані рекомендації щодо забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів.*

**Ключові слова:** використання земель; інвестиційна привабливість земель; регіони; науково обґрунтовані рекомендації.

Бібл.: 10.

**Актуальність теми дослідження.** Зростання значення земельних відносин у сучасній системі місцевого самоврядування, потребує переосмислення підходів до забезпечення інвестиційної привабливості земель на регіональному рівні. У сучасних надзвичайних умовах спостерігається зниження ефективності використання земель, скорочення можливостей залучення інвестицій у сферу земельних відносин, що негативно впливає на розвиток регіонів. Поглиблюють представлені процеси негативний вплив зовнішніх і внутрішніх чинників, наслідки агресії РФ, розбалансування регіональних й стейкхолдерних зв'язків. Для вирішення представлених питань запропоновані науково обґрунтовані рекомендації щодо забезпечення інвестиційної привабливості (ІІ) земель регіонів.

**Постановка проблеми.** Формування напрямів створення та використання вітчизняних й міжнародних інвестицій є важливим, проте і проблемним питанням, вирішення якого дозволяє забезпечити зростання інвестиційної привабливості земель регіонів. На недостатньому рівні обґрунтовані чинники, що впливають на цей процес, та відсутні чіткі кількісні параметри оцінки ІІ земель регіонів. Крім того, не запропоновані науково обґрунтовані рекомендації щодо забезпечення інвестиційної привабливості використання земель регіонів, враховуючи сучасний геопросторовий інструментарій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Напрями та особливості забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів представлені в розробках [1–3].

На функціональних напрямках формування та забезпечення інвестиційної привабливості земель наголошується в роботах [4–5].

Оцінні та рейтингові параметри інвестиційної привабливості представлені в роботах [6].

Формування та виокремлення чинників щодо визначення ризиків забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів висвітлені в роботі [7].

Системний підхід, який визначає інвестиційну привабливість як комплексну категорію, реалізовано в розробці [8].

У результаті дослідження сформовано категоріальний апарат щодо визначення інвестиційної привабливості земель регіонів, який базується на сукупності взаємопов'язаних просторових, економічних, містобудівних, екологічних, інноваційних, безпекових, нормативно-правових чинників та сучасному інструментарію геоінформаційних систем, методів, моделей, що дозволило побудувати кількісну основу розробки прийняття обґрунтованих рішень відносно залучення інвестицій у сферу земельних відносин на регіональному рівні.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Узагальнюючи наукові розробки, потребує подальшого удосконалення категоріальний апарат щодо визначення інвестиційної привабливості земель регіонів. Проблемними залишаються вирішення питань щодо виокремлення чинників та побудови багаторівневої системи показників оцінки ПП земель регіонів. Це дозволяє сформувати кількісну основу та побудувати геоінформаційну систему використання земель регіонів. Крім того, особливого значення набуває розробка та реалізація механізму формування та використання інвестиційної привабливості земель регіонів.

**Метою статті** є розробка науково обґрунтованих рекомендацій забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів. Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання:

- обґрунтування заходів зростання чинників інвестиційної привабливості земель регіонів;

- визначено інструментарій забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів.

Отже, представлена тема є актуальною й вирішує складне завдання щодо забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження процесів формування інвестиційної привабливості земель регіонів, враховуючи вітчизняний і міжнародний досвід, дозволило виокремити особливості її забезпечення, враховуючи рівень та напрями землекористування та використання нормативно-правового забезпечення. Разом з цим, базуючись на існуючому законодавчому забезпеченні й результатах систематизації теоретичних положень відносно визначення інвестиційної привабливості земель регіонів, дозволило виокремити просторові, містобудівні, економічні, екологічні, інноваційні, безпекові й нормативно-правові чинники. Крім того, побудована багаторівнева система показників та розроблено інтегральний метод оцінки рівня інвестиційної привабливості, який включає перелік взаємопов'язаних заходів:

- формування інформаційно-аналітичного забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів;

- виокремлення просторових, містобудівних, економічних, екологічних, інноваційних, безпекових й нормативно-правових чинників, що впливають на формування інвестиційної привабливості земель регіонів;

- побудова багаторівневої системи показників оцінки рівня інвестиційної привабливості земель регіонів;

- оцінка локальних показників із застосуванням експертних і аналітичних методів;

- розробка системної моделі оцінки на основі використання методу середньої геометричної;

- визначення системного показника оцінки рівня інвестиційної привабливості земель регіонів;

- побудова інтегральної моделі оцінки із застосуванням системних показників і вагових коефіцієнтів, які визначаються на основі методу аналізу ієрархій;

- визначення вагових коефіцієнтів;

- оцінка інтегрального показника забезпечення рівня інвестиційної привабливості земель регіонів;

- інтерпретація отриманих результатів.

Застосування представленого методу дозволило сформувати кількісну основу для математичного моделювання впливу системних просторових, містобудівних, економічних, екологічних, інноваційних, безпекових й нормативно-правових чинників на інтегральний показник забезпечення рівня інвестиційної привабливості земель регіонів. Математичне моделювання здійснюється із використання кореляційно-регресійного аналізу, коефіцієн-

тів кореляції та детермінації, критеріїв адекватності математичних моделей (F-критерій Фішера, t-критерій Стьюдента, критерій Дарбіна-Уотсона, критерій Спірмена). Встановлено на основі математичного моделювання високий або суттєвий рівень впливу системних чинників на інтегральний показник при виконанні умов адекватності математичних моделей. Представлені моделі сформували основу для прогнозування змін інтегрального показника забезпечення рівня інвестиційної привабливості залежно від змін системних просторових, містобудівних, економічних, екологічних, інноваційних, безпекових й нормативно-правових чинників. Результати прогнозування змін чинників дозволили визначити їх «точки» зростання відповідно забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів й розробити відповідні науково обґрунтовані рекомендації. Зокрема, виникає необхідність збільшення системного просторового чинника не менше, ніж на 4 % за рахунок:

- формування та врахування структурного забезпечення просторових параметрів інвестиційної привабливості земель регіонів;
- підвищення ефективності використання земель сільськогосподарського призначення;
- зростання повноти та якості картографічного забезпечення;
- підвищення ефективності реалізації напрямів при розробці комплексних планів просторового розвитку, забезпечення їх впровадження на регіональному рівні із застосуванням сучасних геоінформаційних систем;
- забезпечення ефективності взаємодії стейкхолдерів при формуванні просторового забезпечення;
- зростання ефективності розробки та застосування сучасної геоінформаційної системи формування та використання просторової інформації на регіональному рівні;
- забезпечення перманентної роботи щодо встановлення меж населених пунктів;
- зростання рівня інструментального забезпечення для формування й використання просторової інформації регіонів;
- підвищення ефективності використання земель на регіональному рівні;
- забезпечення наявності та доступності інформації відносно формування геопросторового забезпечення;
- зростання можливостей застосування програмного й інструментального забезпечення;
- збільшення рівня розробки й використання локальних та місцевих ГІС для побудови регіональних геоінформаційних систем використання земельно-майнового комплексу;
- забезпечення формування та впровадження архітектури ГІС;
- зростання рівня формування та використання інформаційно-аналітичного та просторового забезпечення для регіонального розвитку;
- забезпечення взаємодії та формування та використання інституційного забезпечення регіонального розвитку та відновлення та ін.

Для зростання рівня інвестиційної привабливості земель регіонів запропоновано збільшити системний економічний чинник не менше ніж на 20 %, що встановлено за результатами математичного моделювання та прогнозування. Формування та реалізація напрямів зростання екологічного забезпечення та безпеки на регіональному рівні більше ніж на 15 %. Забезпечення напрямів формування та реалізації інноваційної політики для зростання інвестиційної привабливості земель на регіональному рівні в розмірі 2 % і більше.

Забезпечення активізації безпекових заходів на основі зростання системного чинника на 2 % і більше:

- врахування особливостей функціонування сектору безпеки та оборони регіонів;
- забезпечення планування у сфері національної безпеки й оборони;
- перманентна розробка та реалізація державних програм у сферах національної безпеки й оборони;
- формування фінансового забезпечення сектору безпеки та оборони;

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

- спрощення процедурних напрямів щодо спрощення земельних відносин для безпекових потреб;
- створення умов для підвищення ефективності договірних відносин щодо оренди земельних ділянок;
- забезпечення врахування особливостей державної реєстрації зміни цільового призначення земельної ділянки без внесення відомостей про це до Державного земельного кадастру;
- забезпечення можливостей функціонування Державного земельного кадастру;
- забезпечення та удосконалення регулювання земельних відносин під час дії воєнного стану;
- формування та реалізація здійснення дій щодо використання земель у період можливого припинення або скасування воєнного стану;
- зростання рівня наявності відповідних безпекових споруд, їх використання;
- зростання рівня професійної підготовки формування та використання відповідного персоналу, який впливає на створення підґрунтя щодо забезпечення інвестиційної привабливості регіонів, враховуючи безпекові параметри;
- забезпечення, наявність та зростання рівня використання військового потенціалу, що забезпечує внутрішню та зовнішню безпеку на регіональному рівні;
- зростання рівня функціонального та інструментального забезпечення безпекової діяльності, наявності та можливостей застосування сучасних технологій, техніки, обладнання.

Удосконалення системи нормативно-правового забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів, що визначається відповідним системним показником не менше ніж на 6 %. Причому реалізуються наступні дії:

- забезпечення повноти формування та застосування відповідного нормативно-правового забезпечення;
- врахування особливостей застосування нормативно-правового забезпечення у сфері забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів;
- забезпечення використання міжнародного та провідного вітчизняного досвіду щодо формування нормативно-правового забезпечення;
- створення та реалізація можливостей впливу на розробку нормативно-правового забезпечення різних груп стейкхолдерів, що сприяє підвищенню інвестиційної привабливості земель регіонів;
- забезпечення можливостей удосконалення системи нормативно-правового забезпечення;
- зростання якості нормативно-правового забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів.

Визначена необхідність зміни траєкторії та напрямів формування інвестиційної привабливості земель у системі регіонального розвитку. У цьому контексті особливого значення має перманентний моніторинг змін інвестиційної привабливості та їх чинників і забезпечення відповідних трансформацій. Причому використовується метод інтегральної оцінки.

На сучасному етапі, не здійснюючи відповідних дій шляхом розробки та впровадження науково обґрунтованих рекомендацій, реалізується песимістичний сценарій, який характеризується негативними процесами у сфері забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів, знижується ефективність землекористування, враховуючи вплив просторових, економічних, містобудівних, екологічних, інноваційних, безпекових і нормативно-правових чинників. Причому знижується можливість використання сучасного інструментарію формування геопросторового забезпечення, звужуються напрями визначення джерел й рівня використання інвестицій, скорочується інвестиційна активність у сфері земельних відносин.



Для зміни траєкторії та напрямів забезпечення інвестиційної привабливості земель необхідно впроваджувати сценарій стабілізації, де основі зусилля спрямовуються на уповільнення негативних явищ, їх нівелювання, перебудови відповідної моделі, де інтегральний показник інвестиційної привабливості негативно впливає на узагальнюючий критерій регіонального розвитку. Крім того, створюють умови для забезпечення зростання чинників інвестиційної привабливості до визначеної межі.

У подальшому впроваджується сценарій розвитку, у рамках якого запропоновано впровадити науково обґрунтовані рекомендації для зростання чинників інвестиційної привабливості земель регіонів за встановлені межі. Важливого значення має збільшення інтегрального показника до помірного рівня і вище. Реалізація сценарію розвитку передбачає встановлення причинно-наслідкових зв'язків і розробки математичної моделі між узагальнюючим критерієм регіонального розвитку (індексом зміни валового регіонального продукту на одну особу) й інтегральним показником інвестиційної привабливості земель регіонів, які мають позитивні прямопропорційні зв'язки. Крім того, застосовуються геоінформаційні моніторингові карти для перманентного визначення тенденцій змін показників інвестиційної привабливості земель регіонів. Застосування геоінформаційних систем у сфері земельних відносин обґрунтовується у розробках [9–10].

**Висновки.** Таким чином, для розробки науково обґрунтованих рекомендацій реалізуються процеси математичного моделювання чинників інвестиційної привабливості земель регіонів на основі застосування кореляційно-регресійного аналізу, критеріїв адекватності моделей, що надало можливості встановити причинно-наслідкові зв'язки між показниками інвестиційної привабливості.

Запропоновані математичні моделі залежності між інтегральним чинником інвестиційної привабливості земель регіонів й індексом зміни валового регіонального продукту на одну особу для визначення прогнозних тенденцій.

Представлені результати прогнозування інтегрального показника інвестиційної привабливості земель регіонів на основі результатів математичного моделювання, що дозволило сформулювати кількісне підґрунтя забезпечення інвестиційної привабливості.

Запропоновані науково обґрунтовані рекомендації забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів, що базуються на результатах оцінки, математичного моделювання та прогнозування для забезпечення інвестиційної привабливості, враховуючи сценарії та заходи її зростання, можливості застосування геоінформаційних моніторингових карт.

### Список використаних джерел

1. Карпова, І. В. Ринок землі в Україні як чинник розвитку іпотечного кредитування аграрного сектору економіки / І. В. Карпова // Молодий вчений. 2017. – № 3 (43). – С. 664–667.
2. Мартинюк, М. П. Теоретичні засади регулювання земельних відносин в Україні / М. П. Мартинюк // Економіка АПК. – 2016. – № 7. – С. 10–15.
3. Майстро, С. В. Необхідність та напрями удосконалення механізму державного регулювання розвитку ринку земель сільськогосподарського призначення в Україні / С. В. Майстро // Теорія та практика державного управління. – 2015. – № 2 (49). – С. 143–150.
4. Алібекова, К. В. Інвестиційна привабливість підприємства / К. В. Алібекова // Управління розвитком. – 2014. – № 13. – С. 6–9.
5. Бланк, І. О. Інвестиційний менеджмент: підручник / І. О. Бланк. – Київ : Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2003. – 398 с.
6. Хром'як, Й. Я. Організаційно-економічний механізм інвестиційної діяльності органів місцевого самоврядування / Й. Я. Хром'як, О. Б. Доскач, Н. М. Лисяк // Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України. – 2014. – Вип. 5(109). – С. 119–130.
7. Данилишин, Б. Земельні відносини як чинник розвитку / Б. Данилишин // Урядовий кур'єр. – 2006. – № 91. – С. 6.

8. Борсук, О. М. Чинники формування інвестиційної привабливості аграрних підприємств / О. М. Борсук // БНАУ. – Червень. – 2010. – № 07. – С. 29.
9. Мамонов, К. А. Моніторинг використання земель регіонів: геоінформаційні аспекти / К. А. Мамонов, Р. С. В'яткін, В. О. Фролов // Комунальне господарство міст. Серія: Економіка. – 2023. – Т. 6. – Вип. 180. – С. 98–102.
10. Mamonov, K. Geospatial analysis: theory, technology and software. Monograph / K. Mamonov, Liu Chang, V. Troian, L. Kovalenko. – Kharkiv : O. M. Beketov NUUE, 2023. – 580 p.

### References

1. Karpova, I. V. (2017). Rynok zemli v Ukraini yak chynnyk rozvytku ipotechnoho kredytuvannya ahrarnoho sektoru ekonomiky [The land market in Ukraine as a factor in the development of mortgage lending in the agricultural sector of the economy]. *Molodyi vchenyi – Young scientist*, 3(43), 664–667.
2. Martyniuk, M. P. (2016). Teoretychni zasady rehuliuвання zemelnykh vidnosyn v Ukraini [Theoretical principles of regulation of land relations in Ukraine]. *Ekonomika APK – Economy of agro-industrial complex*, 7, 10–15.
3. Maistro, S. V. (2015). Neobkhdnist ta napriamy udoskonalennia mekhanizmu derzhavnoho rehuliuвання rozvytku rynku zemel silskohospodarskoho pryznachennia v Ukraini [The necessity and directions of improvement of the mechanism of state regulation of the development of the agricultural land market in Ukraine]. *Teoriia ta praktyka derzhavnoho upravlinnia – Theory and practice of regional management*, 2(49), 143–150.
4. Alibekova, K. V. (2014). Investytsiina pryvablyvist pidpriemstva [Investment attractiveness of the enterprise]. *Upravlinnia rozvytkom – Development management*, 13, 6–9.
5. Blank, I. O. (2003). *Investytsiinyi menedzhment [Investment management]*. Kyiv National University of Trade and Economics.
6. Khromiak, Y. Ya., Doskach, O. B., Lysiak, N. M. (2014). Orhanizatsiyno-ekonomichnyy mekhanizm investytsiynoi diialnosti orhaniv mistsevoho samovriaduvannya [Organizational and economic mechanism of investment activity of local self-government bodies]. *Sotsialno-ekonomichni problemy suchasnoho periodu Ukrainy – Socio-economic problems of the modern period of Ukraine*, 5(109), 119–130.
7. Danylyshyn, B. (2006). Zemelni vidnosyny yak chynnyk rozvytku [Land relations as a development factor]. *Uriadovyi kurier – Government courier*, 91, 6.
8. Borsuk, O. M. (2010). Chynnyky formuvannya investytsiynoi pryvablyvosti ahrarnykh pidpriemstv [Factors of formation of investment attractiveness of agrarian enterprises]. *BNAU*, 7, 29.
9. Mamonov, K. A., Viatkin, R. S., Frolov, V. O. (2023). Monitorynh vykorystannia zemel rehioniv: heoinformatsiini aspekty [Monitoring of regional land use: geoinformational aspects]. *Komunalne hospodarstvo mist – Communal management of cities*, 6(180), 98–102.
10. Mamonov, K., Liu Chang, Troian, V., Kovalenko, L. (2023). *Geospatial analysis: theory, technology and software*. O. M. Beketov NUUE.

Отримано 28.05.2024

UDC 528.4:332.3

### Myhailo Bahin

PhD in Economic Sciences, graduate student of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems  
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)  
E-mail: bahin.m@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0178-6194>

### SCIENTIFICALLY BASED RECOMMENDATIONS FOR ENSURING THE INVESTMENT ATTRACTIVENESS OF REGIONAL LANDS

*It has been proven that the growing importance of land relations in the modern system of local self-government requires a rethinking of approaches to ensuring the investment attractiveness of land at the regional level. In today's extraordinary conditions, there is a decrease in the efficiency of land use, a reduction in the opportunities for attracting investments in the field of land relations, which negatively affects the development of regions. The presented processes deepen the negative impact of external and internal factors, the consequences of the aggression of the Russian Federation, the imbalance of regional and stakeholder relations. Scientifically based recommendations on ensuring the investment attractiveness of the lands of the regions are proposed to solve the presented issues.*

*The purpose of the study is to develop scientifically based recommendations for ensuring the investment attractiveness of the lands of the regions. To achieve the set goal, the following tasks are solved: substantiation of measures to increase the factors of investment attractiveness of the lands of the regions; the toolkit for ensuring the investment attractiveness of the lands of the regions is defined.*

*In order to develop scientifically based recommendations, the processes of mathematical modelling of investment attractiveness factors of regional lands are implemented based on the application of correlation-regression analysis, model adequacy criteria, which made it possible to establish cause-and-effect relationships between indicators of investment attractiveness. Mathematical models of the dependence between the integral factor of the investment attractiveness of the lands of the regions and the index of changes in the gross regional product per person are proposed to determine forecast trends.*

*The results of forecasting the integral indicator of the investment attractiveness of the lands of the regions based on the results of mathematical modeling are presented, which made it possible to form a quantitative basis for ensuring investment attractiveness.*

*Scientifically based recommendations for ensuring the investment attractiveness of the lands of the regions are proposed, based on the results of assessment, mathematical modeling and forecasting to ensure investment attractiveness, taking into account the scenarios and measures of its growth, the possibility of using geo-informational monitoring maps.*

**Keywords:** land use, investment attractiveness of land, regions, scientifically based recommendations.

**References:** 10.

**Сергій Валерійович Левщанов**

Інженер, Freelance consulting (Київ, Україна)

E-mail: [devops8me@proton.me](mailto:devops8me@proton.me)

## ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ У БУДІВЕЛЬНІЙ ІНДУСТРІЇ

Нові технології, такі як безпілотні літальні апарати (БПЛА), відіграють ключову роль в автоматизації процесів моніторингу та інших операцій у будівельній індустрії. Ця стаття показує огляд за основними напрямками використання БПЛА разом з іншими технологіями в будівництві та експлуатації за останні 5 років.

У результаті цієї роботи було вивчено потенціал використання БПЛА в будівельній галузі, і знайдено відповіді на такі запитання: Які переваги використання БПЛА - дронів у будівельній індустрії порівняно з традиційними методами? З якими проблемами та недоліками стикається технологія дронів на шляху її впровадження в будівельну індустрію?

Стаття є оглядово-інформаційною.

**Ключові слова:** дрон; безпілотний літальний апарат; БПЛА; машинне навчання; інформаційне моделювання будівель і споруд; машинний зір; штучний інтелект; моніторинг будівельних процесів та інфраструктури.

Рис.: 3. Табл.: 1. Бібл.: 11.

**Актуальність теми дослідження.** Будівельна галузь є однією з основних опор економіки, яка потребує автоматизації процесів для економії ресурсів і часу. Одними з основних проблем галузі у 2024 році є: проблеми охорони праці та техніки безпеки на будівельних майданчиках; відставання у впровадженні сучасних технологій, оскільки будівельна галузь повільно адаптує нові технології [1].

**Постановка проблеми.** Будівельна ділянка - це середовище, у якому у зв'язку з високою інтенсивністю робіт і задіяння великої кількості машин і механізмів, виникають високі ризики для безпеки здоров'я будівельників. Унаслідок цього виникає необхідність у постійному моніторингу умов праці працівників у режимі реального часу [2]. Будівництво є складним процесом, що вимагає ретельного обстеження майданчика перед початком робіт, моніторингу будівельних робіт, перевірок стану експлуатованих будівель і споруд. Це так само вимагає ефективного і постійного моніторингу [4]. Візуальний огляд стану багатопверхових будівель здійснюється за допомогою промислових альпіністів, які можуть виконати візуальну перевірку, однак вартість такого методу і кількість витраченого часу значно вища порівняно з використанням БПЛА для вирішення цього завдання [9]. Виявлення потенційних проблем на ранній стадії в будівництві або експлуатації дозволяють значно зменшити вартість ремонту [8]. Істотним фактором, що стримує широке впровадження БПЛА в будівельну індустрію, є низька обізнаність про технологію БПЛА серед фахівців індустрії [3; 10].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У даній статті використані дослідницькі роботи в період з 2019 по 2023 роки, щодо практики застосування дронів у будівництві та експлуатації. У цих дослідженнях описано типи застосовуваних БПЛА в будівельній галузі. Методика і приклади практичного застосування дронів, зокрема спільно з іншими новими технологіями, зокрема ВІМ-інформаційне моделювання будівель і споруд, штучний інтелект, машинне навчання і машинний зір. У цих роботах також описано проблеми, з якими зіткнулися дослідники та практикуючі фахівці при впровадженні БПЛА в будівельній сфері [2-11].

**Виділення не досліджених частин загальної проблеми.** Процес впровадження використання БПЛА в будівельній галузі триває, оскільки це нова технологія. І вона досі не вивчена повністю. У процесі впровадження відбувається вдосконалення практики використання. З'являються нові напрямки використання і технології з якими збільшуються ефективність і можливості використання. З огляду на вищевикладене, виникла потреба в аналізі наукових публікацій з цієї тематики за минулі 5 років. Для детального висвітлення таких

тем: 1) огляд типів дронів, що застосовуються; 2) напрями застосування дронів для будівництва та експлуатації; 3) переваги використання цієї технології порівняно з традиційними методами; 4) поточні проблеми й обмеження використання БПЛА в галузі.

**Метою дослідження** є визначення поточних тенденцій щодо застосування цієї технології, технічних вимог і проблем на шляху її впровадження, що підвищить обізнаність про застосування цієї технології серед фахівців галузі та прискорить її впровадження. Результати цієї роботи також дозволять дослідникам краще визначити сучасні потреби галузі.

**Виклад основного матеріалу.** У будівельній індустрії широкого застосування набули три типи БПЛА, це: дрони роторного типу (з гвинтами) (рис. 1); літакового з нерухомим крилом (рис. 2); гібридного (з гвинтами та крилами) (рис. 3).



*Рис. 1. Дрони роторного типу, зліва на право квадрокоптер із 4 гвинтами, гексакоптер із 6 гвинтами, октокоптер із 8 гвинтами.*  
Джерело: [10].



*Рис. 2. Дрон літакового типу з нерухомим крилом*  
Джерело: [10].



*Рис. 3. Дрон гібридного типу (з гвинтами і крилами)*  
Джерело: [10].

Велика кількість гвинтів у роторних дронів збільшує їхню маневреність, що робить їх ідеальними для застосування в обмеженому просторі або всередині будівлі чи споруди за рахунок їхньої можливості зависання над об'єктом моніторингу. Водночас велика кількість гвинтів не дає їм високу швидкість порівняно з типом БПЛА з нерухомим крилом. Який за рахунок своєї конструкції ідеально підходить для швидкого польоту на великі відстані. Що робить цей тип дрона ідеальним для інспекції віддалених об'єктів, автомагістралей, залізниць або будь-яких інших лінійних споруд.

Гібридні дрони мають нерухоме крило, що забезпечує їм можливість далеких польотів на високій швидкості, а гвинти дають змогу зависати над досліджуваним об'єктом. Що робить їх універсальними, але й складнішими в експлуатації та дорожчими, ніж вище перераховані типи дронів [2-3] [7-8] [10]. Напрями застосування БПЛА в будівництві та експлуатації показані в табл. 1.

Таблиця 1 – Застосування БПЛА для будівництва та експлуатації

Процеси будівництва та експлуатації	Застосування БПЛА	Посилання на джерела
Збір даних для проектування	Картографія	[3] [8]
	Топографічне знімання	[3]
	Збір візуальної інформації з недоступних місць	[3] [5]
	Створення 3D-моделі	[5-6] [7] [9]
	Розрахунок земляних робіт	[3] [8]
	Аерофотозйомка	[6] [10]
	Геодезичні роботи	[10]
Будівництво	Моніторинг процесу будівництва в режимі реального часу	[3-6]
	Такелажні та монтажні роботи	[3-4]
	Виявлення візуальних дефектів, тріщини, корозії тощо.	[4] [6-8]
	Виявлення пустот у бетоні.	[3-4]
	Порівняння наявного об'єкта з його BIM-моделлю за допомогою збору хмари точок наявної конструкції.	[4] [10]
Охорона праці та техніка безпеки	Моніторинг безпеки праці та дотримання техніки безпеки на будівельних ділянках.	[2-3] [5-6] [8]
Експлуатація будівель і споруд	Візуальний огляд стану будівель і споруд з подальшим опрацюванням даних на предмет пошкоджень.	[4-5] [8] [11]
	Моніторинг енергоефективності будівель, оцінка цілісності теплоізоляції, перевірка на протікання, витік газу.	[3-5]
	Оцінка стану будівель і споруд після природної або техногенної катастрофи	[3] [5]

Джерело: розроблено автором.

**Переваги використання БПЛА в будівельній галузі.** Як видно з табл. 1, дрони широко застосовуються в різних процесах будівництва та експлуатації.

Сучасні БПЛА мають можливості працювати разом із технологіями штучного інтелекту, машинного навчання та технічного зору. Це дає змогу здійснювати збір та аналіз даних, у режимі реального часу допомагаючи більш ефективно контролювати виконання персоналом правил охорони праці та техніки безпеки на будівельних майданчиках. Що дуже важливо для забезпечення безпеки персоналу і зниження ризиків травм під час виконання робіт [2-3; 5-6; 8].

Істотно скорочують час і витрати при виконанні вишукувальних, будівельних, і експлуатаційних завдань у порівнянні з традиційними методами [2; 6-9; 11]. Дають змогу отримати доступ і збір даних із важкодоступних місць у споруджуваних та існуючих будівлях і спорудах [3-4; 11]. Можна використовувати незалежно від місця розташування та відсутності інфраструктури [3].

БПЛА можуть бути інтегровані з різноманітним сучасним програмним забезпеченням і апаратними компонентами, такими як BIM, LIDAR, георадар, тепловізор, і різними датчиками для збору даних, які можна використовувати для оцінки якості та стану об'єкта. Наприклад, прикріпивши до дронів датчики, що вловлюють метан, можна знайти витіки газу на газопроводах з можливістю точного визначення місць і навіть виміряти обсяг витоків [3; 6].

На етапі збору даних для проектування БПЛА ефективний для збору необхідної інформації для проектування і створення точних 3D-моделей [4; 8-9]. А також моніторингу в режимі реального часу всіх етапів будівництва [4-5; 8]. Вантажопідйомність дає змогу

дронам виконувати деякі такелажні та монтажні роботи [4; 6]. Дрони дуже ефективні для проведення перевірок і технічного обслуговування будівельних об'єктів. З їхньою допомогою проводять планові перевірки споруд, будівель та інфраструктури [6-8; 11].

**Проблеми та обмеження використання БПЛА в будівельній галузі.** Погодні умови, такі як туман, снігопад, дощ і висока швидкість вітру впливають на якість одержуваних зображень і даних та безпеку польоту. А використання БПЛА в обмеженому просторі поблизу інших перешкод (будівель, кранів, дерев, металевих конструкцій), може спричинити навігаційні та експлуатаційні труднощі, як-от збій у роботі GPS або магнітні перешкоди, тоді дрон може втратити керування. Це може спричинити небезпечні ситуації для людей [3-4; 6; 8-10].

Оператори дронів повинні мати необхідні знання та навички, щоб вирішувати технічні проблеми, які можуть виникнути під час експлуатації, такі як втрата сигналу, перешкоди, відмова вбудованих датчиків та передчасна розрядка акумулятора. Працівники на ділянках повинні мати правильне розуміння проблем безпеки, пов'язаних із польотами БПЛА на будівельних майданчиках. Наприклад, робота БПЛА на будівельних майданчиках може відвертати водія, що може стати причиною аварії [3-6].

Оператори або їхні асистенти повинні вміти витягувати й обробляти дані, які збирають БПЛА [3; 10].

У різних країнах світу впровадження БПЛА в галузь ускладнюється питаннями юридичного характеру, такими як вторгнення в приватне життя. Наприклад, незважаючи на отримання дозволу від різних учасників будівельного проекту. При управлінні БПЛА на будівельних майданчиках, можуть виникнути проблеми конфіденційності через прилеглі об'єкти, або пішоходів, які можуть заявити про зазіхання на їхні громадянські права і свободи. Оскільки БПЛА здатні отримувати зображення і відео в місцях, де люди очікують деякої конфіденційності. Ці питання, поки залишаються невирішеними [3-5].

У деяких країнах світу є обмеження на використання БПЛА в нічний час. Що робить неможливим їх використання для цілодобового моніторингу будівництва. Так само, наприклад, у США правила комерційного використання дронів не дозволяють вилітати з поля зору оператора, що є обмеженням для деяких випадків використання. Наприклад, обстеження лінійних споруд або віддалених об'єктів [3-5].

Істотним фактором, що стримує широке впровадження БПЛА в будівельну індустрію, є низька обізнаність про технологію серед фахівців індустрії. Незважаючи на великі дослідження, що вивчають застосування БПЛА в будівництві за останнє десятиліття, їх практичне впровадження ще не повністю досягнуто [3; 10].

Більшість комерційних БПЛА мають невелику ємність акумуляторної батареї, що обмежує час їх застосування. У зв'язку з цим деякі завдання не можливо виконати за один політ [4] [6-9].

Вантажопідйомність дронів не дуже велика, у зв'язку з цим для виконання такелажних або монтажних робіт іноді потрібно задіяти кілька дронів [4; 6].

У зв'язку з високою вартістю БПЛА з високою роздільною здатністю камер, програмного забезпечення для обробки даних і необхідністю навчання персоналу використанню БПЛА для збору та обробки даних, отримання для них ліцензій і сертифікатів. Роблять витрати, пов'язані з впровадженням БПЛА в будівельні компанії, величезними, і у зв'язку з цим деякі власники не хочуть робити ці інвестиції [10]. А використання дешевого обладнання для дронів призводить до втрат у точності даних і якості зйомки [7; 9].

**Висновки.** З розглянутих матеріалів було складено детальний огляд і аналіз закордонного досвіду застосування БПЛА в галузі за останні 5 років. Ці матеріали допоможуть вітчизняним фахівцям швидше впровадити цю технологію. Так само було отримано відповіді на поставлені вище запитання. Технології БПЛА сприяють підвищенню продуктивності, економії часу і ресурсів, підвищують безпеку персоналу, а також мінімізують людські помилки порівняно з традиційними методами. Під час вибору БПЛА важливим

є розуміння для яких конкретно цілей його буде використано. Оскільки конструктивні особливості кожного типу БПЛА суттєво впливають на можливість та ефективність застосування. Водночас дрони становлять загрозу безпеці, оскільки вони можуть впасти під час польоту і великою проблемою залишається порушення конфіденційності людей.

### Список використаних джерел

1. Biggest Challenges Facing the Construction Industry / Abdullah Alsharif, Anto Ovid, S. M. Jamil Uddin, Alex Albert // *Construction Research Congress*, 2024. – Pp. 652-660. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784485286.065>.
2. Unmanned Aerial Systems and Deep Learning for Safety and Health Activity Monitoring on Construction Sites / Aliu Akinsemoyin, Ibukun Awolusi, Debaditya Chakraborty, Ahmed Jalil Al-Bayati, Abiola Akanmu // *Sensors*. – 2023. – № 23(15). DOI: <https://doi.org/10.3390/s23156690>.
3. Albeaino, G. Trends, benefits, and barriers of unmanned aerial systems in the construction industry: a survey study in the United States / G. Albeaino, M. Gheisari // *ITcon*. – 2021. – Vol. 26. – Pp. 84-111. DOI: <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.006>.
4. Jin Fan. Applications of Drones in Infrastructures: Challenges and Opportunities [Electronic resource] / Jin Fan, Mohamad Saadeghvaziri // *ICARD 2019 : International Conference on Aerial Robotics and DroneAt: LA, USA*. – Access mode: [https://www.researchgate.net/publication/336262417\\_Applications\\_of\\_Drones\\_in\\_Infrastructures\\_Challenges\\_and\\_Opportunities](https://www.researchgate.net/publication/336262417_Applications_of_Drones_in_Infrastructures_Challenges_and_Opportunities).
5. Serkan Yıldız. Using drone technologies for construction project management: A narrative review / Serkan Yıldız, Serkan Kıvrak, Gökhan Arslan // *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation*. – 2021. – Vol. 4 (4). – P. 232-240. DOI: <https://doi.org/10.31462/jcemi.2021.04229244>.
6. Ihab M. Katar. Drone Technology In Contemporary Construction Engineering Management [Electronic resource] / Ihab M. Katar // *Journal of Namibian Studies History Politics Culture*. – 2023. – Vol. 35(S1). – Pp. 1322-1331. – Access mode: [https://www.researchgate.net/publication/378481062\\_Drone\\_Technology\\_In\\_Contemporary\\_Construction\\_Engineering\\_Management](https://www.researchgate.net/publication/378481062_Drone_Technology_In_Contemporary_Construction_Engineering_Management).
7. Ballesteros Ruiz, R. D. Inspection of facades with Unmanned Aerial Vehicles (UAV): an exploratory study / R. D. Ballesteros Ruiz, A. C. Lordsleem JÃnior, J. H. Aquino Rocha // *Revista ALCONPAT*. – 2021. – Vol. 11(1). – Pp. 88-104. DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.517>.
8. An Overview of Drone Applications in the Construction Industry / Hee-Wook Choi, Hyung-Jin Kim, Sung-Keun Kim, Wongi S. Na // *Drones*. – 2023. – Vol. 7. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones7080515>.
9. Riyanto, F. Realtime monitoring study for highway construction using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) technology / F Riyanto, Juliastuti, O Setyandito, A Pramudya // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. – 2021. – Vol. 729(1). DOI: [10.1088/1755-1315/729/1/012040](https://doi.org/10.1088/1755-1315/729/1/012040).
10. Spoorthy Venkatesh Prakash. Unmanned Aerial Systems in the U.S. Construction Industry: Exploratory Study on Current State of Practice / Spoorthy Venkatesh Prakash, Caroline Clevenger, Manideep Tummalapudi // *EPiC Series in Built Environment*. – 2022. – Vol. 3. – Pp. 482-486. DOI: <https://doi.org/10.29007/hws2>.
11. New trends in visual inspection of buildings and structures: Study for the use of drones / Jorge Furtado Falorca, João P. N. D. Miraldes, João Carlos Gonçalves Lanzinha // *Open Engineering*. – 2021. – Vol. 11 (1). – Pp. 734-743. DOI: <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0071>.

### Список використаних джерел

1. Alsharif, A., Ovid, A., Uddin, S. M. J., Albert, A. (2024). Biggest Challenges Facing the Construction Industry. *Construction Research Congress 2024*, (pp. 654-659). <https://doi.org/10.1061/9780784485286.065>.
2. Akinsemoyin, A., Awolusi, I., Chakraborty, D., Al-Bayati, A. J., Akanmu, A. (2023). Unmanned Aerial Systems and Deep Learning for Safety and Health Activity Monitoring on Construction Sites. *Sensors*, 23(15), 1-20. <https://doi.org/10.3390/s23156690>.
3. Albeaino, G., Ghaisari, M. (2021). Trends, benefits and barriers to the use of unmanned aircraft systems in the construction industry: a US study. *ITcon*, 26, 84-111. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.006>.
4. Fan, J., Saadeghvaziri, M. (2019). Applications of Drones in Infrastructures: Challenges and Opportunities. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3566281>.



5. Yıldız, S., Kivrak S., Gökhan, A. (2021). Using Drones for Construction Project Management: A Narrative Review. *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation*, 4(4), 232-240. <https://doi.org/10.31462/jcemi.2021.04229244>.
6. Katar, I.M. (2023). Drone Technology in Contemporary Construction Engineering Management. *Journal of Namibian Studies History Politics Culture*, 35(S1), 1321-1334. [https://www.researchgate.net/publication/378481062\\_Drone\\_Technology\\_In\\_Contemporary\\_Construction\\_Engineering\\_Management](https://www.researchgate.net/publication/378481062_Drone_Technology_In_Contemporary_Construction_Engineering_Management).
7. Ruiz, R. D. B., Júnior, A. C. L., Rocha, J. H. A. (2021). Inspection of facades with Unmanned Aerial Vehicles (UAV): an exploratory study. *Revista ALCONPAT*, 11(1), 88-104. <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.517>.
8. Choi, H.-W., Kim, H.-J., Kim, S.-K., Na, W. S. (2023). An Overview of Drone Applications in the Construction Industry. *Drones*, 7(8), 515. <https://doi.org/10.3390/drones7080515>.
9. Riyanto, F, Juliastuti, J., Setyandito, O., Pramudya, A. (2021). A study on real-time highway construction monitoring using unmanned aerial vehicle (UAV) technology. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 729, 2-10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/729/1/012040>.
10. Prakash, S. V., Clevenger, C., Tummalapudi, M. (2022). Unmanned aircraft systems in the US construction industry: An exploratory study of the current state of practice. *58th Annual Associated Schools of Construction International Conference*, 3, 479-487. <https://doi.org/10.29007/hws2>.
11. Falorca, J., Miraldes, J. P. N. D., Lanzinha, J. C. G. (2021). New trends in visual inspection of buildings and structures: Research on the use of drones. *Open Engineering*, 11(1), 734-743. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0071>.

Отримано 20.06.2024

UDC 624.05

**Serhii Levshchanov**

Engineer. Freelance consulting (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [devops8me@proton.me](mailto:devops8me@proton.me)

## APPLICATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

*The construction industry is one of the main pillars of the economy, which requires automation of processes to save resources and time. Some of the major challenges for the industry in 2024 are: Health and safety issues on construction sites and lagging behind in the adoption of modern technologies as the construction industry is slow to adapt new technologies*

*A construction site is an environment in which there are high health and safety risks for construction workers due to the high intensity of work and the large number of machines and mechanisms involved. As a result, there is a need for continuous real-time monitoring of the working conditions of workers. Construction is a complex process that requires thorough inspection of the site before starting work, monitoring of construction works, and inspections of the condition of the buildings and structures in operation, which also requires effective and continuous monitoring. Visual inspections of multi-storey buildings are carried out using industrial climbers who can perform visual inspections, but the cost of this method and the amount of time spent is considerably higher compared to using UAVs for this task. Identifying potential problems early in construction or operation can significantly reduce the cost of repairs. A significant factor inhibiting the widespread adoption of UAVs in the construction industry is the low awareness of UAV technology among industry professionals.*

*The aim of the study is to identify the current trends in the application of this technology, technical requirements and challenges to its adoption, which will increase the awareness of the application of this technology among industry professionals and accelerate its adoption. The results of this work will also enable researchers to better identify the current needs of the industry.*

*This study was conducted by review and analysis method, that includes: Overview of types of drones used in the construction industry; Construction and operation processes where UAVs are used; Advantages of using UAVs in the construction industry; Problems and limitations of using UAVs in the construction industry. From the reviewed materials, a detailed review and analysis of foreign experience of using UAVs in the industry over the past 5 years was compiled. These materials will help domestic specialists to implement this technology faster. Also, the answers to the above questions were received. UAV technologies help to increase productivity, save time and resources, improve personnel safety, and minimise human error compared to traditional methods. When selecting a UAV, it is important to understand the specific purposes for which it will be used. Since the design features of each type of UAV have a significant impact on the feasibility and effectiveness of the application. At the same time, drones pose a safety risk as they can crash during flight and a big problem remains the violation of people's privacy.*

**Keywords:** drone; unmanned aerial vehicle; UAV; machine learning; information modeling of buildings and structures; machine vision; Artificial Intelligence; monitoring of construction processes and infrastructure.

Fig.: 3. Table: 1. References: 11.

**Оксана Василівна Гера<sup>1</sup>, Роксолана Євгенівна Олесків<sup>2</sup>, Любов Ігорівна Дорош<sup>3</sup>,  
Микола Ярославович Гринішак<sup>4</sup>, Володимир Петрович Михайлишин<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії та землеустрою  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (м. Івано-Франківськ, Україна)  
**E-mail:** oksana.hera@nung.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6670-2820>. **Scopus Author ID:** 57224954097

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії та землеустрою  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (м. Івано-Франківськ, Україна)  
**E-mail:** roksolanaoleskiv@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0334-3028>

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, інженер кафедри геодезії та землеустрою  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (м. Івано-Франківськ, Україна)  
**E-mail:** liubov.dorosh@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2971-4034>

<sup>4</sup>асистент кафедри геодезії та землеустрою  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (м. Івано-Франківськ, Україна)  
**E-mail:** nikolaygrynishak@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0422-8681>. **Scopus Author ID:** 57210600509

<sup>5</sup>асистент кафедри геодезії та землеустрою  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (м. Івано-Франківськ, Україна)  
**E-mail:** vovamychgeo@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2236-1707>. **Scopus Author ID:** 57210604967

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБЛЕННЯ ПРОЄКТУ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЗА ОСІДАННЯМИ ФУНДАМЕНТУ БАГАТОПОВЕРХОВОЇ БУДІВЛІ

*Наведено результати вибору пунктів висотної основи, місць закладання деформаційних марок та розроблення методики спостережень за осіданнями фундаменту багатопверхової будівлі в м. Івано-Франківськ. У результаті виконання початкової серії вимірів визначені висоти закладених деформаційних марок, які будуть вихідними для встановлення величин осідань фундаменту будівлі. Виконані попередня оцінка точності запроєктованої мережі та аналіз результатів вимірювань початкової серії свідчать про отриману точність визначення висоти найслабшої деформаційної марки 1 мм.*

**Ключові слова:** деформація будівлі; геометричне нівелювання коротким променем; програма спостережень за деформаціями; деформаційна марка; осідання.

*Рис.: 7. Табл. 1. Бібл.: 8.*

**Актуальність теми дослідження.** Інтенсивний розвиток територій міського простору притаманний для сучасного світу. Тенденції щодо стрімкої розбудови зумовлені фактором збільшення вартості земельних ділянок та, відповідно, щільності забудови. Саме в таких умовах у великих містах та мегаполісах ведеться будівництво здебільшого висотних будинків. Моніторинг таких споруд є обов'язковим процесом, оскільки з часом виникають різні фактори та ризики при експлуатації даних об'єктів, які можуть негативно впливати на міцність та надійність конструкцій.

Саме геодезичні роботи забезпечують комплекс заходів для відстеження параметрів об'єктів задля моніторингу різного роду споруд. Визначення норм, за якими чітко регламентуються геодезичні роботи у будівництві, викладені на державному рівні Державними будівельними нормами [1]. Ці норми встановлюють загальні правила проєктування, виконання та приймання геодезичних робіт, які потрібно виконувати під час будівництва, реконструкції, технічного переоснащення об'єктів будівництва будь-якого призначення, серед яких окремою складовою є комплекс геодезичних робіт із систематичних спостережень за розвитком деформаційних процесів у період будівництва та експлуатації будівель, споруд та території забудови.

Спостереження ведуть з початку будівництва засобами дуже точних, ретельних і систематичних геодезичних вимірів, різноманітних за своїм характером. Геодезичні виміри повинні бути забезпечені високоточною закріпленою планово-висотною геодезичною мережею. Виміри величин деформацій припиняють (або скорочують до регламентованої для відповідної споруди кількості) тільки з моменту настання стабілізації процесів осідань.

Тому характерна особливість геодезичних робіт є їх систематичне повторення протягом досить великого проміжку часу залежно від стійкості ґрунтів, на яких розміщена споруда. При цьому шляхом повторних вимірів і прив'язок до стійких геодезичних пунктів визначають фактичне положення деформаційних знаків на кожному етапі спостережень.

Результати періодичних спостережень дають можливість не тільки встановити величини деформацій будівлі, але і вжити профілактичних заходів для її подальшої безпечної експлуатації. Геодезичні роботи на цьому етапі виконуються високоточними приладами за спеціально розробленою для конкретної будівлі програмою.

**Постановка проблеми.** Івано-Франківський інститут нафти і газу, як окремий заклад вищої освіти, створений у 1967 р. Активне будівництво навчальних корпусів, бібліотеки, спортивного комплексу відбувалося в 1978-1979 рр. Оскільки будівлям понад сорок років, то процеси нормативного осідання фундаментів очікувано завершені. Однак на фасаді навчального корпусу № 1 було виявлено ознаки деформації будівлі (рис. 1). Тому прийняли рішення розробити програму спостережень за процесом деформації корпусу для визначення активності цього процесу та прогнозування наслідків.



*Рис. 1. Об'єкт досліджень*

Джерело: розроблено авторами.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженнями проблем геодезичного моніторингу висотних конструкцій займаються багато науковців. Світовий досвід вказує на безсумнівну актуальність теми, оскільки кількість висотних будинків у світі постійно зростає. Авторами у роботах [2, 3] проведено аналіз геодезичного моніторингу деформаційних процесів висотних будівель і споруд, мета якого полягає у використанні технології знімання, що включає алгоритм обробки та порівняння результатів декількох циклів спостережень і забезпечення моніторингу деформованого стану об'єкта по всій його поверхні. Саме повторюваність вимірювань дозволяє отримати набір даних для подальшого аналізу. Такі дані геодезичного моніторингу зсувів і деформацій спеціалізованим обладнанням є основою для побудови апроксимаційної лінійно-гармонійної функції. У роботі [4] наведені правила застосування методу візуального контролю, метою якого є виявлення незначних видимих проявів деформацій на початковій стадії чи зміни положення елементів конструкцій об'єкта. Мета цього дослідження – створити умови для безпечної експлуатації конструкцій шляхом раннього виявлення негативних змін у стані деформації розтягу та оперативного вжиття заходів щодо її локалізації. Згадані методи базуються на досить типових наземних геодезичних вимірюваннях. Шляхом поєднання різних методів досягається комплексний результат досліджень.

У наступній статті [5] розглянуто підхід до вирішення задач моніторингу споруд із використанням інтегрованої GNSS-системи та неметричних камер з QR-кодованими цілями. Система позиціонується як недорога система спостереження, розроблена на основі технології комп'ютерного зору за підтримки GNSS; основне застосування якої – моніторинг різних інженерних споруд, у тому числі висотних будівель. Запропонована методика дозволяє визначити зміну геометричних параметрів конструкції під впливом зовнішніх факторів або навантажень, на основі чого можна спрогнозувати величини деформацій у подальшому.

Проаналізувавши більш новітні методи та оцінивши ефективність їх застосування, автори дійшли висновку, що варто згадати роботи, які базуються на дистанційних методах спостережень. Так в роботі [6] наведений метод радіолокаційної інтерферометрії та обґрунтована доцільність його використання для спостережень за вертикальними деформаціями інфраструктури на прикладі навчального корпусу Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. На основі отриманої радіолокаційної інформації опрацьовано набір даних за допомогою методу Persistent Scatterers Interferometry (PS, інтерферометрія постійних відбивачів радіолокаційного сигналу). У результаті були визначені середні значення швидкості вертикальних переміщень території університету, які підтверджуються результатами GNSS-спостережень.

Цікавим є застосування методів лазерного сканування для моніторингу будівель та споруд [7,8]. Перевагою такого методу є швидке отримання великої кількості інформації, проте великий обсяг часу затрачається саме на опрацювання отриманих даних.

У статті [8] обґрунтовано використання систем лазерного сканування для геодезичного моніторингу висотних будівель і споруд, де акцентується увага на взаємному розташуванню окремих елементів будівлі, що особливо важливо для виявлення та прогнозування деформаційних процесів.

**Метою статті** є вибір оптимального методу геодезичних спостережень за ймовірними осіданнями багатоповерхової будівлі та розроблення програми виконання таких спостережень.

**Виклад основного матеріалу.** У випадку дії фактора, що призводить до виникнення процесу деформації (зміна навантаження на основу, зміна температури середовища або тіла споруди, дія тектонічних сил та ін.), необхідний моніторинг процесу деформування, який виконують, зазвичай, методами геодезичних спостережень.

Для інженерної інтерпретації результатів вимірів деформацій вивчають можливі причини їх виникнення. Основний інтерес являють геологічні, гідрогеологічні та кліматичні дані: потужність окремих шарів ґрунту, рівень ґрунтових вод, фізико-механічні властивості ґрунтів та ін. У багатьох випадках не обмежуються вивченням матеріалів вишукувань, а паралельно з вимірюванням деформацій організовують спеціальні спостереження за термічним режимом ґрунтів, рівнем підземних вод, метеоумовами, враховують будівельне і технологічне навантаження.

Для ведення спостережень складають проект, який у загальному випадку містить: технічне завдання; загальні відомості про споруду, природні умови й технологічний режим роботи; принципову схему спостережень; схему розміщення опорних і деформаційних знаків; розрахунок і характеристику потрібної точності вимірів; методи й засоби вимірювань; рекомендації щодо методики опрацювання та інженерної інтерпретації результатів спостережень; календарний план (графік) спостережень; склад виконавців, обсяг робіт та кошторис.

Деформація споруди також залежить від форми, розмірів і жорсткості фундаменту, розподілу статистичних і динамічних навантажень всередині споруди.

Граничні допустимі значення деформації, що відповідають експлуатаційним характеристикам будівлі чи споруди, визначаються відповідними технологічними або архітектурними вимогами та правилами технічної експлуатації обладнання або споруди [1].

Загалом для виконання завдання щодо спостереження та оцінки стану будівлі потрібно слідувати такому алгоритму дій (рис. 2).

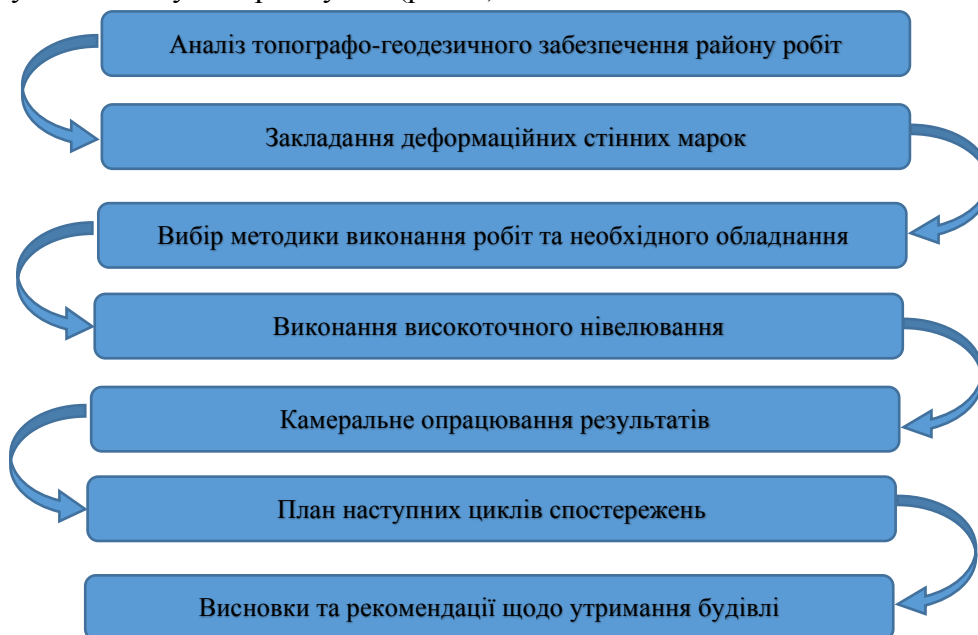


Рис. 2. Алгоритм вирішення завдання

Джерело: розроблено авторами.

**Аналіз топографо-геодезичного забезпечення району робіт.** На основі вивчення пунктів державної геодезичної мережі поблизу об'єкту дослідження встановлено, що пункти у задовільному стані для спостережень за динамікою вертикальних деформаційних процесів відсутні.

Для виконання першої серії спостережень було прийнято рішення використовувати стінні репери місцевої нівелірної мережі IV класу R 1364, R 1337 та R 1319, які знаходяться неподалік від району робіт (рис. 3).



Рис. 3. Схема розміщення нівелірних знаків у районі робіт

Джерело: розроблено авторами.

Відомості про стан та розташування геодезичних знаків наведено в табл. 1. Конструкція реперів представлена на рис. 4. Стінні репери відлиті із чавуну. На передньому їхньому торці вказана організація, що заклала знак, та номер геодезичного пункту. Кожен репер вмурований у стіну будівлі так, що його торцева частина виступає назовні на 5 см. На диску репера є виступ у вигляді сектора з ребрами, висота якого над рівнем моря і вважається висотою репера.

Таблиця 1 – Стан нівелірних знаків IV класу в межах району робіт

Вид	Назва	Клас нівелірної мережі	Віддаль до об'єкта, м	Стан пункту
Стінний репер	1364	IV	552	задовільний
Стінний репер	1337	IV	589	задовільний
Стінний репер	1319	IV	835	задовільний

Джерело: розроблено авторами.

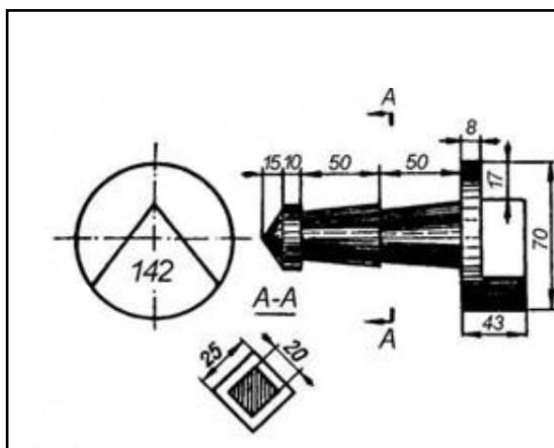


Рис. 4. Зображення стінного репера IV класу

Джерело: <http://surl.li/unurk>.

**Закладання деформаційних стінних марок.** Для забезпечення проведення моніторингу будівлі першого корпусу ІФНТУНГ у фундамент було закладено деформаційні марки загальною кількістю 63 знаки, що обумовлено доволі складною конфігурацією будівлі. Місця закладання, вибрані згідно з нормативними вимогами, наведені на рис. 5.

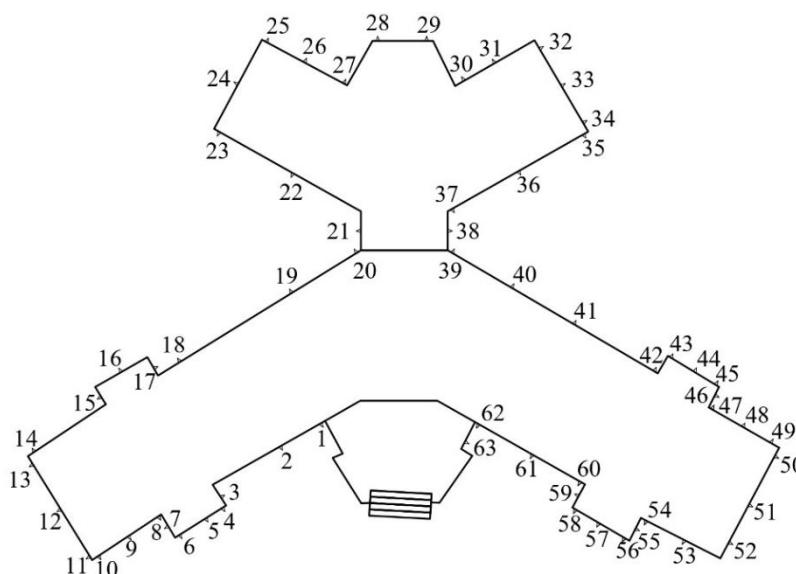


Рис. 5. Схема розміщення деформаційних марок

Джерело: розроблено авторами.

**Вибір методики виконання робіт та необхідного обладнання.**

Виходячи з нагальності проблеми, при виникненні тріщин у конструкції споруди, приймається рішення про найбільш ефективні методи визначення величин деформацій для прогнозування рівня небезпечних проявів. Геодезичні наземні вимірювання високоточними приладами дозволяють виявити найменші ознаки деформацій, з точністю до 0,2 мм. Саме застосування високоточного нівеліра при проведенні геометричного нівелювання коротким променем забезпечать надійні дані для подальшого аналізу ситуації.

На об'єкті виконано початкову серію спостережень згідно розробленої програми виконання робіт. Вимірювання виконані високоточним електронним нівеліром Topcon DL-501 з автоматичним зчитуванням відліків за штрихковою рейкою. Перед початком спостережень проводили дослідження нівеліра за програмою, вказаною в інструкції з експлуатації приладу. Зокрема, перед початком серії спостережень визначався кут  $i$  за допомогою автоматизованої програми меню нівеліра. Зазначимо, що програма вимірювань високоточного електронного нівеліра DL-501 передбачає введення у результати вимірювань поправки за кут  $i$  на кожній станції нівелювання. Вимірювання проводились за методикою спостережень, яка забезпечує середню квадратичну похибку визначення висоти найслабшої марки мережі відносно положення вихідних пунктів не більше 1 мм.

Схема вимірів у мережі включає замкнутий нівелірний хід, що з'єднує деформаційні марки, встановлені у фундаменті досліджуваної будівлі, з вихідними реперами R 1364, R 1337 та R 1319, закладеними у фундаменти п'яти- та дев'ятиповерхових будинків (рис. 6).

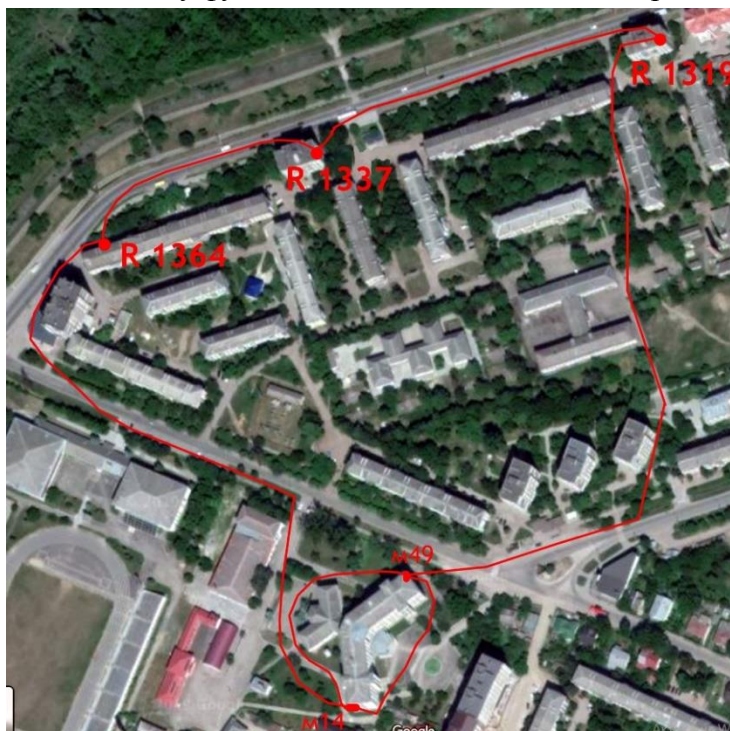


Рис. 6. Схема запроєктованої нівелірної мережі

Джерело: розроблено авторами.

Середньоквадратична похибка визначення перевищень на станції у висотному ході не допускалась понад 0,15 мм. Для досягнення такої точності, нівелювання виконували за програмою нівелювання II класу із використанням сучасної методики геометричного нівелювання коротким променем з дотриманням таких вимог:

- довжина рейки не більше 1,8 м;
- допустима різниця пліч на станції – 1,0 м;
- на зв'язуючих точках ходів рейка встановлювалась тільки на нівелірні підкладники;

- прилад на станціях та нівелірні підкладини встановлювались тільки на твердий ґрунт або бетон;

- при контролі вимірів користувались наступними службовими допусками:

а) різниця перевищень, визначених при двох горизонтах інструменту на станції, не допускалась більше ніж 0,2 мм;

б) допустимі нев'язки у полігонах  $f_h^{don}$  визначали за наведеною нижче формулою (де  $n$  – кількість станцій у ході):

$$f_h^{don} = \pm 0,2 \cdot \sqrt{n}.$$

Результати виміряних перевищень та перевірки допустимих незамикань у полігонах мережі наведено на рис. 7. Висотну мережу урівняно параметричним методом і виконано оцінку точності вимірювань.

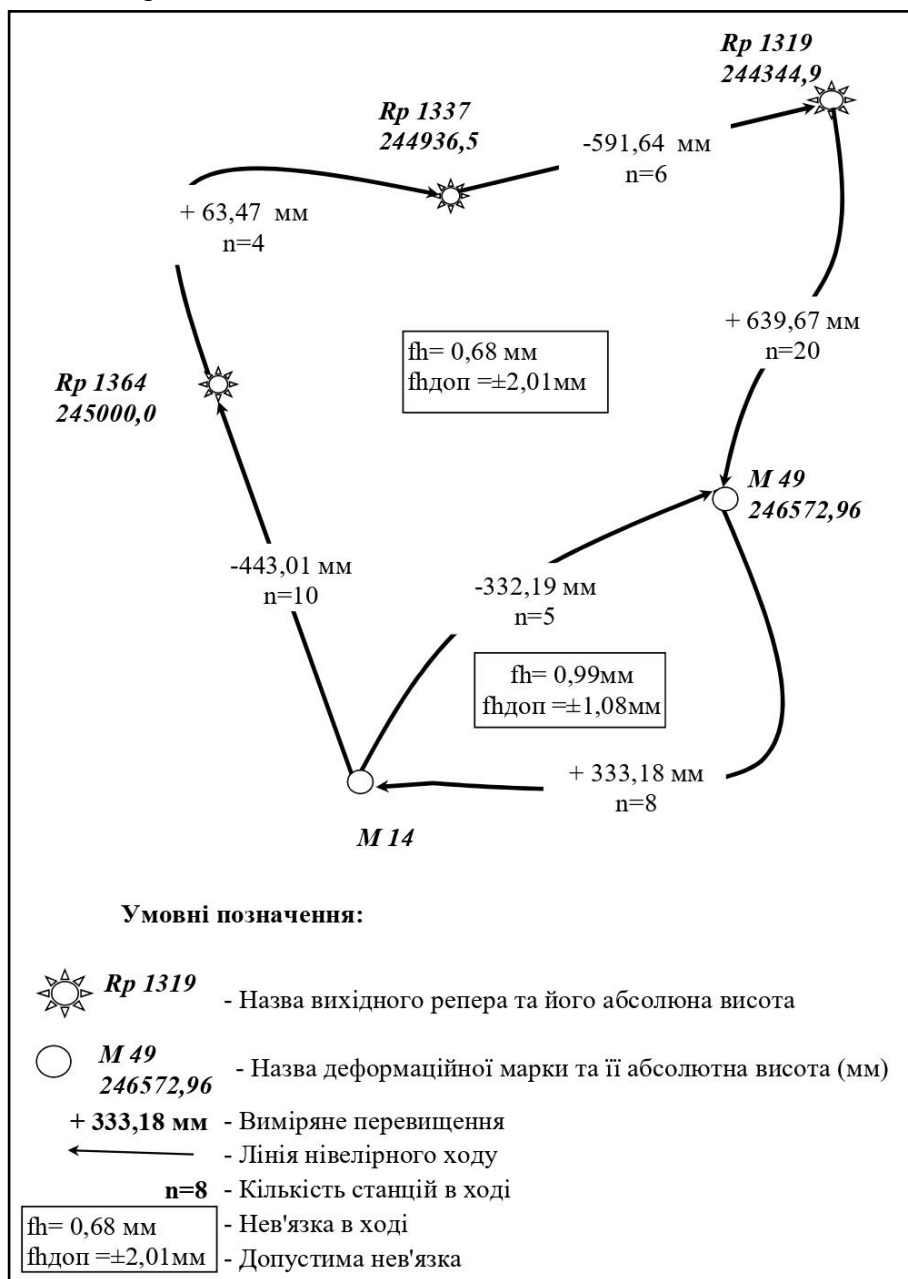


Рис. 7. Результати вимірів у початковій серії спостережень  
Джерело: розроблено авторами.



**Висновки.** Грунтуючись на результатах актуальних досліджень встановлено, що метод високоточного нівелювання оптимальний для спостережень за об'єктом досліджень. З метою виявлення ймовірних деформацій висотної будівлі розроблено програму геодезичних спостережень, в рамках якої виконано такий перелік робіт:

- рекогностування об'єкта досліджень;
- встановлення деформаційних маркерів та гіпсових маяків;
- закладання нівелірних стінних марок;
- виконання першого циклу нівелювання.

Керуючись вимогами нормативних документів для об'єкта дослідження розроблена схема розміщення деформаційних марок. Відповідно до технічного завдання у фундамент будівлі закладено 63 деформаційні марки. Виконано високоточне нівелювання марок за методикою спостережень, яка забезпечує середньоквадратичну похибку визначення висоти найбільш слабкої марки мережі рівну 1 мм.

За результатами наступних серій спостережень можна буде обчислити величини осідань кількісно, виявити їхні напрямки, швидкість процесів, та зробити прогноз стійкості на наступні роки, а за необхідності розробити комплекс заходів щодо стабілізації будівлі.

### Список використаних джерел

1. Система забезпечення точності геометричних параметрів у будівництві. Геодезичні роботи у будівництві (ДБН В.1.3-2-2010). – Вид. офіц. ; введ. 21.01.2010. – Київ : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010.
2. Geodetic monitoring methods of high-rise constructions deformations with modern technologies application [Electronic resource] / M. E. Kuttykadamov, K. B. Rysbekov, I. Milev, K. A. Ystykul, B. K. Bektur // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 2016. – Vol. 93(1). – Pp. 24-31. – Accessed mode: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84995544464&origin=scopusAI>.
3. Urban, R. *Surveying Works during the Deformation Measurement of Buildings* / R. Urban. – CTU Publishing House, Prague, 2015. – 227 p.
4. Mamajonova, Nodira. Monitoring and analysis of geodetic visual deformation / Nodira Mamajonova, Baxtiyar Mirzayev // *Theoretical aspects in the formation of pedagogical sciences*. – 2023. – Vol. 2 (5). – Pp. 139-141.
5. GNSS-Assisted Low-Cost Vision-Based Observation System for Deformation Monitoring / R. Shults, A. Ormambekova, Y. Medvedskij, A. Annenkov // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13 (5), 2813. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13052813>.
6. Determination of vertical displacements of infrastructure objects based on the radarinterferometry data / M. Pakshyn, I. Liaska, L. Dorosh, T. Grytsyuk, O. Gera // *Geodesy and Cartography*. – 2022. – Vol. 48(2). – P. 62-69. DOI: <https://doi.org/10.3846/gac.2022.14414>.
7. The concept of surveying set for geometrical dimensioning of difficultly accessible objects [Electronic resource] / Kazimierz Ćmielewski, Krzysztof Karsznia, Piotr Gołuch, Janusz Kuchmister // *Archives of Civil Engineering*. – 2023. – Vol. LXIX (1). – Pp. 627-644. – Accessed mode: <https://www.scopus.com/record/display.uri?origin=citedby&eid=2-s2.0-85161676482&noHighlight=false&relpos=1>.
8. The geodetic monitoring of deformations of a high-rise building using ground-based laser scanning technology [Electronic resource] / G. Madimarova, D. Suleimenova, T. Pentayev, Y. Khalykov, G. Baydauletova, S. Tumazhanova, H. Stankova // *Journal of Applied Engineering Science*. – 2022. – Vol. 20 (4). – Pp. 1083-1092. – Accessed mode: [http://www.engineeringscience.rs/article/2022/Volume\\_20\\_4/37001](http://www.engineeringscience.rs/article/2022/Volume_20_4/37001).

### References

1. State enterprise "Scientific Research Institute of Life Sciences" (2010). A system for ensuring the accuracy of geometric parameters in everyday life. Geodetic robots in Budivnytsia (DBN V.1.3-2-2010). Ministry of Regional Development and Life of Ukraine.
2. Kuttykadamov, M.E., Rysbekov, K.B., Milev, I., Ystykul, K.A., Bektur, B.K. (2016). Geodetic monitoring methods of high-rise constructions deformations with modern technologies application. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 93(1), 24-31. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84995544464&origin=scopusAI>.
3. Urban, R. (2015). *Surveying Works during the Deformation Measurement of Buildings*. CTU Publishing House, Prague.

4. Mamajonova, N., Mirzayev, B. (2023). Monitoring and analysis of geodetic visual deformation. *Theoretical aspects in the formation of pedagogical sciences*, 2 (5), 139-141.
5. Shults, R., et al. (2023). GNSS-Assisted Low-Cost Vision-Based Observation System for Deformation Monitoring. *Applied Sciences*, 13(5), 2813. <https://doi.org/10.3390/app13052813>
6. Pakshyn, M., Liaska, I., Dorosh, L., Grytsyuk, T., Gera, O. (2022). Determination of vertical displacements of infrastructure objects based on the radarinterferometry data. *Geodesy and Cartography*, 48(2), 62-69.
7. Ćmielewski, K., et al. (2023). The concept of surveying set for geometrical dimensioning of difficultly accessible objects. *Archives of Civil Engineering*, 69(1), 627-644. <https://www.scopus.com/record/display.uri?origin=citedby&eid=2-s2.0-851161676482&noHighlight=false&relpos=1>.
8. Madimarova, G., Suleimenova, D., Pentayev, T., Khalykov, Y., Baydauletova, G., Tumazhanova, S., Stankova, H. (2022). The geodetic monitoring of deformations of a high-rise building using ground-based laser scanning technology. *Journal of Applied Engineering Science*, 20 (4), 1083-1092. [http://www.engineering-science.rs/article/2022/Volume\\_20\\_4/37001](http://www.engineering-science.rs/article/2022/Volume_20_4/37001).

Отримано 20.06.2024

UDC 528.4

**Oksana Gera<sup>1</sup>, Roksolana Oleskiv<sup>2</sup>, Liubov Dorosh<sup>3</sup>,  
Mykola Hrynishak<sup>4</sup>, Volodymyr Mykhailyshyn<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Geodesy and Land Management  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Ivano-Frankivsk, Ukraine)

**E-mail:** [oksana.hera@nung.edu.ua](mailto:oksana.hera@nung.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6670-2820>. **Scopus Author ID:** 57224954097

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Geodesy and Land Management  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Ivano-Frankivsk, Ukraine)

**E-mail:** [roksolanaoleskiv@gmail.com](mailto:roksolanaoleskiv@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0334-3028>

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Assistant of the Department of Geodesy and Land Management  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Ivano-Frankivsk, Ukraine)

**E-mail:** [liubov.dorosh@gmail.com](mailto:liubov.dorosh@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2971-4034>

<sup>4</sup>Assistant of the Department of Geodesy and Land Management

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Ivano-Frankivsk, Ukraine)

**E-mail:** [nikolaygrynishak@gmail.com](mailto:nikolaygrynishak@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0422-8681>. **Scopus Author ID:** 57210600509

<sup>5</sup>Assistant of the Department of Geodesy and Land Management

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Ivano-Frankivsk, Ukraine)

**E-mail:** [vovamychgeo@gmail.com](mailto:vovamychgeo@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2236-1707>. **Scopus Author ID:** 57210604967

## **PECULIARITIES OF DEVELOPING THE PROJECT OF OBSERVATIONS OVER SUBSIDENCE OF THE FOUNDATION IN A MULTI-STORIED BUILDING**

*During the exploitation of a multi-storied building, certain changes can occur in its geometric parameters – the deformations caused by the factors of natural or man-made origin. The deformation processes are mainly revealed and monitored by the geodetic methods with using the most up-to-date equipment, which is regulated by current legislation.*

*This research work analyzes today's development of methods for detecting and monitoring the deformation processes in buildings and structures by using laser scanners, GNSS system and non-metric cameras with QR-coded targets, method of Persistent Scatterers Interferometry.*

*The measurement of deformations in the basis of foundations of buildings and structures, that are exploited, is carried out in case of appearing impermissible cracks, opening of seams, as well as a sudden change in the building condition. Thus, in order to monitor the subsidence process in a multi-storied building, the regular observations over vertical movements of deformation control benchmarks are optimal by the method of high-precision geometric leveling with a short beam. In this respect, a program of observations must be created for each specific object.*

*The research work describes the results of selecting the points of elevation basis, the places of setting the deformation control benchmarks and development of methodology of observations over subsidence of a multi-storied building foundation in Ivano-Frankivsk city. As a result of the initial series of measurements performed, the elevations of planned deformation control benchmarks were defined to subsequently serve as an initial point in determining the subsidence values of a building foundation. The performed preliminary assessment of accuracy of the network designed and analysis of the measurement results of the initial series prove the obtained accuracy of determining the height of the weakest deformation control benchmark of 1 mm.*

**Keywords:** deformation of a building; geometric leveling with a short beam; program of observation over deformations; a deformation control benchmark, subsidence.

*Fig.: 7. Table: 1. References: 8.*

**Ольга Сергіївна Петраковська<sup>1</sup>, Марія Юріївна Михальова<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри землеустрою і кадастру  
Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)  
E-mail: [mykhalova.myu@knuba.edu.ua](mailto:mykhalova.myu@knuba.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9437-5507>  
Scopus Author ID: [57245147600](https://orcid.org/57245147600). ResearcherID: [U-7863-2017](https://orcid.org/U-7863-2017)

**ВИХІДНІ ДАНІ ПРИ РОЗРОБЛЕННІ МІСТОБУДІВНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ  
МІСЦЕВОГО РІВНЯ**

*Вагомість вихідних даних визначається їх точністю, актуальністю та повнотою. Повнота даних є фундаментальним чинником, завдяки якому забезпечується комплексний та всебічний аналіз територій, розвиток яких підлягає плануванню і виражається в наявності всіх необхідних та релевантних даних. У дослідженні проведено аналіз обсягу вихідних даних необхідних для розроблення містобудівної документації місцевого рівня, а також проведено їх структурування відповідно до законодавчо визначених. Проведене дослідження дозволило структурувати законодавчо визначені вихідні дані та згрупувати їх в три основні групи: прогнози, цілі; об'єкти; умови. Результати дослідження ілюструють необхідність чітко визначити джерела надання інформації відповідно до визначених вихідних даних; доопрацювання переліку джерел надання інформації і додатково включення: єдиної державної електронної системи у сфері будівництва, реєстру речових прав на нерухоме майно, адресного реєстру, містобудівного кадастру.*

*Стаття є науково-методичною.*

**Ключові слова:** вихідні дані; містобудівна документація; місцевий рівень; комплексний план; генеральний план, територіальна громада.

Табл.: 1. Бібл.: 15.

**Актуальність теми дослідження.** Системний підхід до забезпечення сталого розвитку спроможної територіальної громади, спрямованого на збалансованість соціальних, економічних і екологічних складових, вимагає наявності інформаційного забезпечення, яке забезпечує наявність актуальних інтегрованих вихідних даних, які відіграють ключову роль і є основою для прийняття рішень, прогнозування та оцінки можливих сценаріїв розвитку територій. Вагомість вихідних даних визначається їх точністю, актуальністю та повнотою. Повнота даних є фундаментальним чинником, завдяки якому забезпечується комплексний, всебічний аналіз територій розвиток яких підлягає плануванню і виражається в наявності всіх необхідних та релевантних даних. Вирішальну роль у розвитку територій громад відіграє комплексний план просторового розвитку територій територіальних громад (КППР), який забезпечує системний підхід до управління, використання та збереження просторових ресурсів. У статті досліджено нормативно-правове регулювання вихідних даних, які є обов'язковими для розроблення містобудівної документації місцевого рівня.

**Постановка проблеми.** Використання територій пов'язане з рядом проблем, які можуть виникати на різних етапах їх розвитку. Рішення цих проблем вимагає комплексного підходу, який враховує правові, екологічні, економічні, технічні та соціальні аспекти. Забезпечення довгострокового соціально-економічного зростання країни загалом, регіонів і населених пунктів та раціональне використання природних ресурсів загалом і земельних зокрема, є важливими завданнями сьогодення.

В Україні останні роки просторове планування набуває особливого значення, як в містобудівній, так і земельпорядній площині. Трансформація законодавства, зумовлена необхідністю його адаптації сучасним завданням розвитку територій і організації простору життєдіяльності суспільства.

Протягом останніх років відбувалася активна трансформація нормативно-правової бази щодо планування використання земель. Зміни, які відбулися, насамперед спрямовані на інтеграцію завдань містобудівної та земельпорядної документації на місцевому

рівні, й розроблення комплексного плану просторового розвитку територій територіальних громад як основного документа, що забезпечує збалансований розвиток територій, що відповідає потребам і інтересам населення, економіки та навколишнього середовища.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Оскільки метою дослідження є визначення вихідних даних при розробленні містобудівної документації місцевого рівня, в роботі були досліджені державні нормативно-правові акти [2; 4; 7; 8; 12; 15].

**Мета дослідження.** Визначити обсяг вихідних даних необхідних для розроблення КППР, а також провести їх структурування відповідно до законодавчо визначених. У процесі дослідження використано методи аналізу та синтезу.

#### **Виклад основного матеріалу.**

Узагальнення законодавчих положень і сталої практики проектування свідчить, що основними вихідними даними при розробленні КППР є:

- 1) атрибутивні дані – кількісні та якісні характеристики об'єктів (показники сучасного стану, проектні показники, прогнозовані показники та індикатори);
- 2) геопросторові дані містобудівної документації – набори геопросторових даних, що отримуються з національної інфраструктури геопросторових даних, реєстрів, кадастрів, інших інформаційних систем;
- 3) метадані – дані щодо джерел, точності, статусу, способу отримання та інших характеристик геопросторових даних містобудівної документації;
- 4) топографічні карти.

У дослідженні не розглядаються вимоги до картографічних матеріалів містобудівної документації і топографічних карт.

Серед основних складових КППР обов'язковими визначено стратегія просторового розвитку території та база геоданих. Стратегія просторового розвитку території містить комплексну оцінку території, модель розвитку території у довгостроковій перспективі і обґрунтування проектних рішень. При цьому комплексна оцінка території включає визначення і порівняльний аналіз основних стимулювальних і обмежувальних факторів, які впливають на структуру та параметри економічного розвитку й використання території. Модель розвитку території в довгостроковій перспективі, зокрема, включає загальне бачення розвитку територій та інформацію про демографічні прогнози, основні принципи розвитку, житловий фонд і соціальну інфраструктуру, об'єкти інженерної інфраструктури, розташування ключових виробничих, сільськогосподарських та інших комплексів, громадські центри, транспортні коридори. Важливим аспектом є визначення інвестиційно привабливих територій, територій з особливим економічним статусом і територій, що потребують підтримки.

База геоданих містить набори геопросторових даних, структурованих за тематичними підрозділами, що відображають існуючі та заплановані об'єкти, а також такі атрибутивні дані:

- Показники існуючого стану: характеристика поточного стану території, включаючи всі наявні ресурси, інженерно-транспортну та соціальну інфраструктуру територіальної громади, для якої розробляється містобудівна документація, на основі вихідних даних.
- Прогнозні показники: на короткостроковий (до п'яти років), середньостроковий (6-10 років) та довгостроковий (понад 10 років) періоди з відповідними вихідними даними (стратегії, прогнози, плани, дослідження тощо).
- Проектні показники: на короткостроковий (до п'яти років), середньостроковий (6-10 років) та довгостроковий (понад 10 років) періоди, зазначені в проектних рішеннях містобудівної документації.
- Індикатори реалізації містобудівної документації: на короткостроковий (до п'яти років) та середньостроковий (6-10 років) періоди.

Оскільки текстові матеріали у вигляді стратегії просторового розвитку території і тематичні набори геопросторових даних формуються з відповідних тематичних розділів та підрозділів особливого значення набуває землевпорядна складова, яка додана до складу

містобудівної документації місцевого рівня. Розділ «Землеустрій та землекористування» охоплює питання поточного використання земель та пропозиції щодо їх перспективного застосування. Він містить інформацію про фактичне використання земель у межах громади за формами власності, категоріями та видами цільового призначення земель, угідь і земельних ділянок. Важливою частиною є перелік земельних ділянок, які надані у власність або користування, а також тих, які не надані у власність або користування. Розділ також включає виявлення земельних ділянок, що використовуються без зареєстрованого речового права, і визначення необхідних для розміщення об'єктів, щодо яких може здійснюватися примусове відчуження земельних ділянок з мотивів суспільної необхідності. Розділ «Обмеження у використанні земель» визначає існуючі, проєктні і встановлені обмеження у використанні земель. Розділ «Охорона земель, інженерна підготовка та благоустрій території» містить завдання щодо заходів з підвищення продуктивності та охорони земель, стабілізації агроландшафтів, оптимізації складу угідь, консервації деградованих земель і напрямів їх подальшого використання тощо, які раніше ніколи не входили до складу містобудівної документації [2].

Склад вихідних даних для розроблення комплексного плану, а також його невід'ємних складових - генеральних планів населених пунктів та детальних планів територій визначається нормативно-правовими актами [2; 13]. Відповідно до чинного законодавства [13] містобудівна документація місцевого рівня розробляється на паперових і електронних носіях на оновленій картографічній основі в цифровій формі як набори профільних геопросторових даних у державній геодезичній системі координат УСК-2000 і єдиній системі класифікації та кодування об'єктів будівництва для формування баз даних містобудівного кадастру. Об'єктом містобудівної документації є геопросторовий об'єкт, щодо якого визначаються геопросторові, атрибутивні дані та метадані містобудівної документації. До об'єктів містобудівної документації належать як існуючі, так і проєктні об'єкти.

У результаті проведеного аналізу складу законодавчо визначеного переліку вихідних даних, всю їх сукупність запропоновано згрупувати в три основні групи:

- прогнози, цілі;
- об'єкти;
- умови.

До прогнозів та цілей віднесені ті, які встановлені стратегічними документами щодо розвитку територіальної громади та програми економічного і соціального розвитку, галузей економіки, охорони навколишнього природного середовища тощо, прийняті на державному, обласному, районному та місцевому рівні, що поширюються на територію територіальної громади.

До об'єктів – віднесені матеріальні об'єкти природного й антропогенного походження фізичної, соціальної, економічної та екологічної структури території, а саме: промислові, житлові, інженерні і транспортні об'єкти, адміністративні та громадські, освітні й медичні заклади, зелені зони, водні об'єкти, історичні пам'ятки, рекреаційні об'єкти тощо.

Умови можуть впливати на ефективність та стійкість процесу розвитку, визначати сприятливі і несприятливі обставини, які зумовлюють існуючий та прогнозний стан розвитку територій громади в цілому, і земельних ділянок зокрема. До них віднесені: природно-кліматичні умови; демографічні; ризики виникнення надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру; стан навколишнього природного середовища природної і техногенної небезпеки; наявні обмеження щодо використання земель; речові права на нерухоме майно тощо.

Запропонована структура сприятиме розумінню джерел надходжень вихідних даних та спрощенню їх отримання.

У результаті узагальнення вихідних даних, які замовник має надати для розробки КППР, та джерел надання вихідних даних зазначених у [2], сформований визначений перелік джерел отримання вихідних даних:

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

- ✓ дані державного земельного кадастру;
- ✓ стратегічні документи щодо розвитку територіальної громади;
- ✓ затверджена містобудівна документація регіонального та місцевого рівня;
- ✓ прогнози та програми економічного і соціального розвитку, галузей економіки прийняті на державному, обласному, районному та місцевому рівні, що поширюються на територію територіальної громади;
- ✓ стратегії, програми та плани у сфері охорони навколишнього природного середовища і сталого використання земель, ґрунтів, вод, лісів та інших природних ресурсів, формування екомережі;
- ✓ плани управління річковими басейнами;
- ✓ положення концепції інтегрованого розвитку території територіальної громади;
- ✓ документація із землеустрою у межах території територіальної громади, затверджена до прийняття комплексного плану.

У роботі проведений аналіз визначених джерел надання даних відповідно до запропонованої структуризації атрибутивних даних: прогнози, цілі; об'єкти, умови (табл. 1.).

Таблиця 1 – Основні джерела отримання початкових вихідних даних

№	Джерела отримання початкових вихідних даних	Об'єкти	Умови	Прогнози, цілі
1	Державний земельний кадастр	+	+	
2	Фонд державного майна	+		
3	Державний реєстр речових прав на нерухоме майно та їх обмежень	+	+	+
4	Державна і регіональні стратегії розвитку		+	+
5	Стратегічні документи розвитку територіальної громади			+
6	Концепція інтегрованого розвитку території територіальної громади	+	+	+
7	Державні, обласні, районні та місцеві прогнози та програми економічного і соціального розвитку		+	+
8	Стратегії, програми та плани у сфері охорони навколишнього природного середовища		+	+
9	Плани управління річковими басейнами	+	+	+
10	Містобудівна документація різних ієрархічних рівнів	+	+	+
11	Державний фонд документації із землеустрою	+	+	+

Проведений аналіз ілюструє, що для забезпечення повноти даних при розробленні КППР необхідно використовувати різноманітні джерела інформації різного рівня. В результаті аналізу розпорядників даних проведено їх узагальнення відповідно до інформації [1; 3; 6; 9; 10; 11; 14; 15]:

- ✓ Державні та місцеві статистичні служби (демографічні, економічні, соціальні дані тощо).
- ✓ Кадастрові й реєстраційні служби (інформація про земельні ділянки, правовий статус земельних ділянок, про межі індексно-кадастрових зон та кварталів; про межі агрогруп ґрунтів, шифр та назву агрогрупи, бал бонітету дані про власників/користувачів і обмеження користування нерухомим майном тощо).
- ✓ Топографо-геодезичні служби (карти, аерофотознімки, супутникові знімки тощо).
- ✓ Державні й територіальні органи виконавчої влади (довгострокові та середньострокові програми розвитку; інвестиційні програми, субвенції, дотації, цільові програми, прогнози демографічного та економічного розвитку, дані про стан навколишнього природного середовища, природні ресурси, стан водного та повітряного басейну, ґрунтів, об'єкти природно-заповідного фонду, ризики тощо; інформація про управління відходами; Інформація про розташування, межі та характеристику курортних територій, лікувально-оздоровчої місцевості, особливо цінні та унікальні природні лікувальні ресурси,

перелік пам'яток історії, археології, монументального мистецтва всіх категорій з відповідними рішеннями про взяття на державний облік; загальні дані про лісовий фонд у розрізі адміністративно-територіальних одиниць.

✓ Органи місцевого самоврядування (плани розвитку, інформація про інфраструктуру, соціальні об'єкти).

✓ Державні та комунальні підприємства (перелік і характеристика доріг різних категорій, що проходять по території громади, перелік і характеристика залізничних доріг, залізничних вокзалів та станцій; інформація про розташування магістральних трубопроводів на території громади, а також розміри їхніх охоронних зон; інформація про наявні мережі водопостачання, водовідведення, електропостачання, газопостачання, енергомережі, виробництво та споживання енергії, дані про транспортні мережі, потоки, інфраструктуру; інформація про межі місцезнаходження промислового або сільськогосподарського об'єкта тощо).

✓ НДІ та громадські організації (результати спеціалізованих досліджень у галузях економіки, моніторингові й оціночні дані).

Важливого значення при забезпеченні повноти даних при розробленні містобудівної документації місцевого рівня мають соціологічні опитування, у результаті яких отримується інформація про потреби, очікування і задоволеність населення умовами в громаді та пропозиції і бачення місцевих жителів щодо перспектив розвитку.

Також в Україні, особливо за часи Російської агресії, особливого значення набувають зовнішні джерела надходження інформації, до яких відносяться будь-які міжнародні інституції з якими є відповідні договори про співпрацю.

У результаті аналізу стає очевидним, що дані стосовно відомостей щодо природних і антропогенних об'єктів мають бути отримані із містобудівної і земельнопорядної документації та Державного земельного кадастру. Цього не достатньо з погляду визначення майнових прав на об'єкти, неповноти заповнення певних шарів в ДЗК, відсутністю інформації щодо нерухомості відмінної від земельної ділянки в ДКК та вирішення інших питань. Однак у частині відомостей, які надаються для розроблення КППР, чітко зазначений тільки ДЗК.

Досвід розроблення КППР свідчить що, збір вихідних даних є складною процедурою, яка потребує тривалого часу і залучення різних фахівців. Законодавством встановлено, що замовник КППР має забезпечити розробнику отримання доступу до всіх чинних кадастрів та реєстрів або щодо забезпечення взаємодії між його інформаційною системою та чинними кадастрами та реєстрами. При розробленні містобудівної документації місцевого рівня склад та джерела вихідних даних, а також формат їх надання визначаються розробником за погодженням із замовником. Для цього є об'єктивні причини. Кожна територія має свої унікальні характеристики та специфіку, які потребують індивідуального підходу до збору та аналізу даних. Розробник і замовник разом визначають найбільш релевантні джерела даних і формат їх надання, щоб максимально точно врахувати всі особливості території. Замовник може мати певні вимоги або очікування щодо вихідних даних, їхнього складу та формату. Спільне узгодження дозволяє розробнику врахувати ці вимоги та забезпечити відповідність проєкт потребам замовника. Доступність та якість вихідних даних можуть варіюватися залежно від джерел їх надання в узгодження між розробником та замовником дозволяє вибрати найкращі доступні дані, забезпечуючи тим самим точність та надійність планування. Різні проєкти можуть вимагати використання різних методологій та технічних підходів до обробки даних. Узгодження складу та джерел даних має допомогти оптимізувати ресурси, які витрачаються на збір та обробку інформації, уникаючи зайвих витрат та забезпечуючи ефективне використання наявних ресурсів. Крім цього, у деяких випадках існують правові або регуляторні вимоги щодо використання певних джерел даних або їх формату. Таким чином, узгодження складу, джерел та формату вихідних даних між розробником і замовником забезпечує більш точне, ефективне та відповідне потребам проєкту планування розвитку території.

**Висновки.** Досягнення повноти даних, при розробленні містобудівної документації місцевого рівня вимагає інтеграції інформації з великої кількості різних джерел, регулярного оновлення та підтримки високої точності та актуальності даних.

Зважаючи на проведені дослідження вихідних даних та джерел надання інформації стає очевидним, що необхідно чітко визначити джерела надання інформації відповідно до визначених вихідних даних. Потребує доопрацювання перелік джерел надання інформації і додатково включення: єдину державну електронну систему у сфері будівництва, реєстру речових прав на нерухоме майно, адресний реєстр, містобудівний кадастр. Особливо важливою складовою є визначення обов'язковості і чіткої процедури надання даних їх розпорядниками.

### Список використаних джерел

1. Земельний кодекс України [Електронний ресурс] : від 25.10.2001 р. № 2768-III. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text>.
2. Порядок розроблення, оновлення, внесення змін та затвердження містобудівної документації [Електронний ресурс] : Постанова Кабінету Міністрів України № 926 від 01.09.2021. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/926-2021-%D0%BF#n609>.
3. Про державний земельний кадастр [Електронний ресурс] : Закон України № 3613-VI від 07.07.2011. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/3613-17>.
4. Про екологічну мережу [Електронний ресурс] : Закон України 1864-IV від 24.06.2004. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1864-15#Text>.
5. Про затвердження Порядку ведення Державного земельного кадастру [Електронний ресурс] : Постанова Кабінету Міністрів України № 1051 від 17.10.2012. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012>.
6. Про землеустрій [Електронний ресурс] : Закон України № 858-IV від 22.05.2003. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15>.
7. Про землі енергетики та правовий режим спеціальних зон енергетичних об'єктів [Електронний ресурс] : Закон України № 2840-VI від 09.07.2010. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2840-17>.
8. Про курорти [Електронний ресурс] : Закон України № 2026-14 від 05.10.2000. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2026-14>.
9. Про місцеве самоврядування в Україні [Електронний ресурс] : Закон України № 280/97-ВР від 21.05.1997. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/280/97-%D0%B2%D1%80#Text>.
10. Про місцеві державні адміністрації [Електронний ресурс] : Закон України № 586-XIV від 09.04.1999. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/586-14#Text>.
11. Про охорону навколишнього природного середовища [Електронний ресурс] : Закон України № 1264-XII від 25.06.1991. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>.
12. Про природно-заповідний фонд України [Електронний ресурс] : Закон України № 2456-XII від 16.06.1992. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2456-12#Text>.
13. Про регулювання містобудівної діяльності [Електронний ресурс] : Закон України № 3038-VI від 17.02.2011. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/3038-17>.
14. Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність [Електронний ресурс] : Закон України № 2019-VIII від 23.12.1998. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14#Text>.
15. Про транспорт [Електронний ресурс] : Закон України № 232/94-ВР від 10.11.1994. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/232/94-%D0%B2%D1%80>.

### References

1. Zemelnyi kodeks Ukrainy [Land Code of Ukraine] (№ 2768-III, 25.10.2001). <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2768-14>.
2. Poriadok rozroblennia, onovlennia, vnesennia zmin ta zatverdzhennia mistobudivnoi dokumentatsii [Procedure for developing, updating, amending and approving urban planning documentation], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 926 (01.09.2021). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/926-2021-%D0%BF#n609/>.
3. Pro derzhavnyi zemelnyi kadastr [On the state land cadaster], Law of Ukraine № 3613-VI (07.07.2011). <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/3613-17>.
4. Pro ekolohichnu merezhu [On the ecological network], Law of Ukraine № 1864-IV (24.06.2004). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1864-15#Text>.



5. Pro zatverdzhennia Poriadku vedennia Derzhavnoho zemelnoho kadastru [On approval of the Procedure for maintaining the State Land Cadastres], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine. № 1051 (17.10.2012). <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012>.
6. Pro zemleustrii [On land management], Law of Ukraine № 858-IV (22.05.2003). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15>
7. Pro zemli enerhetyky ta pravovyi rezhyim spetsialnykh zon enerhetychnykh ob'ektiv [On energy lands and the legal regime of special zones of energy facilities], Law of Ukraine № 2840-VI (09.07.2010). <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2480-17>.
8. Pro kurorty [On resorts], Law of Ukraine № 2026-14 (05.10.2000). <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2026-14>.
9. Pro mistseve samovriaduvannia v Ukraini [About local self-government in Ukraine], Law of Ukraine № 280/97-BP (21.05.1997). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/280/97-%D0%B2%D1%80#Text>.
10. Pro mistsevi derzhavni administratsii [About local state administrations], Law of Ukraine № 586-XIV (09.04.1999). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/586-14#Text>.
11. Pro okhoronu navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha [On environmental protection], Law of Ukraine № 1264-XII (25.06.1991). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>.
12. Pro pryrodno-zapovidnyi fond Ukrainy [On the Nature Reserve Fund of Ukraine], Law of Ukraine № 2456-XII (16.06.1992). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2456-12#Text>.
13. Pro rehuliuвання mistobudivnoi diialnosti [On regulation of urban planning activities], Law of Ukraine № 3038-VI (17.02.2011). <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/3038-17>.
14. Pro topografo-heodezychnu i kartografichnu diialnist [About topographical, geodetic and cartographic activity], Law of Ukraine № 353-XIV (23.12.1998). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14#Text>.
15. Pro transport [On transport], Law of Ukraine № 232/94-VR (10.11.1994). <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/232/94-%D0%B2%D1%80>.

Отримано 03.06.2024

UDC 332.5

**Olga Petrakovska<sup>1</sup>, Mariia Mykhalova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Doctor 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](mailto:petrakovska.os@knuba.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9437-9730>

**Scopus Author ID:** [57208029712](https://orcid.org/57208029712). **ResearcherID:** [AAC-8135-2019](https://orcid.org/AAC-8135-2019)

<sup>2</sup> PhD in Technical Science, 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](mailto:mykhalova.myu@knuba.edu.ua) **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9437-5507>

**Scopus Author ID:** [57245147600](https://orcid.org/57245147600). **ResearcherID:** [U-7863-2017](https://orcid.org/U-7863-2017)

## OUTPUT DATA IN THE DEVELOPMENT OF URBAN PLANNING DOCUMENTATION AT THE LOCAL LEVEL

*The use of territories is associated with a number of problems that may arise at different stages of their development. Solving these problems requires an integrated approach that takes into account legal, environmental, economic, technical and social aspects. The weight of the output data is determined by its accuracy, relevance and completeness. A decisive role in the development of community territories is played by a comprehensive plan for the spatial development of the territories of territorial communities, which provides a systematic approach to the management, using and preservation of natural resources. The article examines the normative and legal regulation of the output data, which are mandatory for the development of urban planning documentation at the local level. The completeness of the data is a fundamental factor that ensures a comprehensive analysis of the development territories that are subject to planning and is expressed in the presence of all necessary and relevant data. In the study, an analysis of the volume of initial data necessary for the development of urban planning documentation at the local level was carried out, and their structuring was carried out in accordance with the legally defined ones. The conducted research made it possible to structure the legally defined initial data and group them into three main groups: forecasts, goals; objects; conditions. The results of the study illustrate the need to clearly define the sources of information provision in accordance with the defined initial data; finalizing the list of sources of information provision and additionally including: a single state electronic system in the field of construction, a register of property rights to immovable property, an address register, the urban cadastre.*

*The article is scientific and methodical.*

**Keywords:** output data; urban planning documentation; local level; comprehensive plan; general plan; territorial community.

**Table:** 1. **References:** 15.

**Олександр Антонович Тадєєв**

кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії та картографії

Національний університет водного господарства та природокористування (Рівне, Україна)

E-mail: [o.a.tadyeyev@nuwm.edu.ua](mailto:o.a.tadyeyev@nuwm.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4566-0160>. ResearcherID: B-6081-2019**МОДЕЛЮВАННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ РЕГІОНАЛЬНОГО МАСШТАБУ З ВИКОРИСТАННЯМ GNSS-ДАНИХ (НА ПРИКЛАДІ ТЕРИТОРІЇ ЄВРОПИ)**

У статті представлено результати науково-методичного дослідження проблеми оцінювання горизонтальних деформацій земної поверхні за даними глобальних навігаційних супутникових систем GNSS. Подано результати статичного моделювання горизонтальних деформацій земної поверхні регіонального масштабу методами, які ґрунтуються на теорії перетворень образів ріманового простору у формі диффеоморфних многовидів. В основу методів покладено властивості елементарних многовидів евклідового типу розмірності  $N = 2$  у формі дотичної площини з параметризацією прямокутною системою координат та дотичних криволінійних поверхонь обертання з параметризацією сферичною та еліпсоїдальною системами. Розв'язки завдань на цих поверхнях досягнуто методами проективно-диференціальної геометрії. Моделювання реалізовано за вибіркою координат GNSS-станцій на території Європи протягом 2008-2014 рр. Вибірку сформовано на основі бази даних JPL Comb архіву SOPAC. Для побудови функціональних моделей деформації використано базисні функції у формі рядів поліномів Лежандра різних степені та порядку на площині та рядів сферичних функцій різних степені та порядку на геосфері та земному еліпсоїді обертання. Наведено результати обчислення характеристик горизонтальних деформацій земної поверхні, редукованої на зазначені модельні поверхні, та їх порівняльний аналіз. Одержаними результатами підтверджено деформації нелінійного характеру. Наведено результати оцінювання кутових спотворень криволінійних систем координат. Порівняння одержаних результатів з їх аналогами у трансформаціях референціальних систем ITRF-ETRF протягом 2008-2014 рр. показало розбіжності у межах точності їх обчислення.

**Ключові слова:** GNSS; модельна поверхня; базисна функція; апроксимація; метричний тензор; деформація.

Табл.: 3. Рис.: 4. Бібл.: 15.

**Актуальність теми дослідження.** Оцінювання і аналіз деформації Землі – одне з пріоритетних завдань сучасної геодинаміки. Опираючись на резолюції Міжнародної асоціації геодезії [1], одним із найбільш актуальних напрямів досліджень проблеми з використанням геодезичних даних є розробка інноваційних методів опрацювання часових рядів спостережень у геодезичних мережах з метою статичного та динамічного моделювання і аналізу полів деформації усіх масштабів. Вхідними даними для вирішення таких завдань рекомендується використовувати результати моніторингу координат методом GNSS (Global Navigation Satellite System).

**Постановка проблеми.** Теоретичною основою вирішення проблеми оцінювання деформації Землі є математична теорія пружності. З об'єктивних причин ця потужна математична основа знайшла застосування у найпростішій формі лінійно-однорідної моделі нескінченно малої деформації суцільного середовища. Це було зумовлено відсутністю альтернативи у виборі вхідних даних, якими ще від початку минулого століття використовувались результати повторних вимірів прямокутних координат пунктів у планових мережах, здебільшого в триангуляції. Останніми десятиліттями у практику геодезичних робіт запроваджуються супутникові навігаційні технології, які реалізуються у мережах перманентних станцій GNSS. На сьогодні густина покриття територій такими мережами й точність визначення координат станцій достатні для вирішення завдань геодинаміки. З цього погляду GNSS-технології несуть у собі неоціненний потенційний інформаційний ресурс і розкривають нові перспективи вирішення поставленої проблеми. Однак повноцінне їх застосування потребує переосмислення використовуваної теоретичної основи оцінювання деформації Землі.

**Аналіз досліджень проблеми.** Ґрунтуючись на лінійно-однорідній моделі нескінченно малої деформації суцільного середовища, на початку минулого століття у практику досліджень проблеми було запроваджено метод скінченних елементів, який реалізовувався

на симплексах (трикутниках). Відтоді метод набув масового застосування і зазнав численних видозмін. Аналіз видозмін методу та прикладних аспектів його застосування детально розкрито у статті [2]. Разом із симплексами стали використовуватись скінченні елементи складніших геометричних форм. У 1982 році завдяки поєднанню диференціальної геометрії та лінійної теорії деформації на основі афінних перетворень прямокутних координат геодезичних пунктів вперше використано апарат деформаційного аналізу [3]. Це розкрило перспективу неперервного оцінювання горизонтальних деформацій безвідносно до тих чи інших форм скінченних елементів. Згодом також з'явилися вдосконалення у напрямі використання вхідних даних у двовимірних криволінійних системах координат.

Запровадження в дослідницьку практику симплексної моделі скінченних елементів було вимушеним, але свого часу хоча б формально виправданим підходом до оцінювання деформацій за результатами вимірів у триангуляції. Проте цю модель беруть за основу досліджень також і з використанням результатів моніторингу координат у мережах GNSS-станцій, а розділення території на скінченні елементи здійснюють примусово. Наприклад, як це реалізовано у дослідженнях [4], де симплекси утворюють методом триангуляції Делоне. Таке формальне розділення поверхні на симплекси забезпечує хіба що умову побудови, наскільки це можливо, рівносторонніх трикутників і оцінювання у їх межах ймовірних локальних лінійних деформацій.

За будь-якого підходу до утворення скінченних елементів завжди будуть мати місце ризики суб'єктивного оцінювання деформації, якщо не виконувати перевірку на предмет її відповідності умовам лінійно-однорідної моделі. Такого недоліку в реалізації методу скінченних елементів на GNSS-даних можна позбутись, наприклад, як це здійснили автори досліджень [5]: досліджувану територію було розділено на однорідні області за наявною геолого-геофізичною інформацією, а характеристики деформації обчислено за результатами апроксимації лінійної функції на сукупності усіх GNSS-станцій у межах виділених областей. Таке інноваційне рішення цілком задовольняє умови деформаційного аналізу, як їх сформульовано у [3].

Практика використання деформаційного аналізу та вхідних даних, одержаних методом GNSS, розкрила нові можливості вдосконалення функціональних моделей деформації у напрямку використання нелінійних базисних функцій. Проте за умови незмінних теоретичної основи й використовуваної моделі будь-які подібного роду вдосконалення позбавлені перспектив. Адже у процесі формування тензора деформації беруться до уваги лише центроафінні перетворення координат вершин скінченних елементів. Це зумовлює лінеаризацію використовуваних базисних функцій, тому у підсумку тензор спроможний передати лише лінійні закономірності деформації.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Аналіз досліджень проблеми показав необхідність пошуку математичної моделі на альтернативній чи узагальнювальній теоретичній основі, яка не була б обтяжена констатованими обмежувальними умовами з точки зору спроможності оцінювання виключно лінійних деформацій. У статті [6] розкрито перспективи створення таких моделей і розроблення адаптивних методів оцінювання деформацій на основі теорії перетворень образів ріманового простору у формі диффеоморфних многовидів [7]. У частині оцінювання горизонтальної складової деформації рекомендовано використовувати елементарні многовиди евклідового типу розмірності  $N = 2$  у формі дотичної площини з параметризацією прямокутною системою координат або дотичних криволінійних поверхонь обертання з параметризацією сферичною або еліпсоїдальною системами. На такій основі розроблено відповідні методи оцінювання деформацій [8; 9; 10].

**Мета дослідження** – апробація розроблених методів оцінювання горизонтальних деформацій земної поверхні на результатах моніторингу координат методом GNSS. У цій частині досліджень розкриємо перспективи моделювання деформації регіонального масштабу на прикладі території Європи.

**Виклад основного матеріалу.** Вирішення проблеми на основі теорії перетворень образів ріманового простору досягається під умовою, що перетворення простору мають геофізичне походження. Тоді перетворення замкнених неперервних областей простору ідентифікуються як деформації. Використана теоретична основа не накладає жодних обмежень на розміри та геометричні форми областей і не вимагає їх розділення на скінченні елементи. Отже, областю простору можна вважати топографічну поверхню, окреслену розташованими на ній станціями GNSS, безвідносно до її масштабу.

Загальна теорія накладає на перетворення многовидів умови гомеоморфізму – вони повинні бути однозначними, неперервними й диференційованими. У розрізі розмірності многовидів  $N = 2$  зазначені умови визначають клас базисних функцій, які передають перетворення, – це гладкі або кусково-гладкі функції класу  $C^{N-1}$ . Отже, на функціональну модель перетворення простору накладаються лише умови гомеоморфізму, не обмежуючи її базисні функції лінійною аналітичною формою [7]. Таким чином, для побудови функціональної моделі доцільно використати, наприклад, властивості поліномів Лежандра. Вони спроможні забезпечити умови гомеоморфних функцій гармонічного типу з метою описування перетворень на основі загальної теорії поверхонь [7]. Ці умови допускають використання будь-яких функцій  $f(x)$ , які періодичні на осі  $-\infty < x < +\infty$ , або функцій з періодом  $2\pi$ , якщо виконати відповідну лінійну заміну змінної  $x$ . Загалом, поліноми Лежандра – це різновид періодичних ортогональних функцій, які визначаються формулою Родріга на відрізку  $[-1; +1]$ . Діапазон значень змінної  $x$  шляхом лінійного перетворення

$z = \frac{b-a}{2}x + \frac{b+a}{2}$  може бути приведений до будь-якого відрізка  $[a; b]$ . При цьому

властивість ортогональності функції не втрачається. При апроксимації двовимірних полів змінних на площині використовують систему поліномів Лежандра  $f(x, y)$ , яка реалізується розкладами їх у ряди заданої степені та порядку  $m$ . У цьому випадку також допускається приведення змінних системи до тих чи інших визначених діапазонів. Заміни змінних зберігають ортогональність ряду для головних функцій на відрізку  $[x_{\min}; x_{\max}]$  і приєднаних функцій на відрізку  $[y_{\min}; y_{\max}]$ . Ця властивість дозволяє використовувати системи поліномів Лежандра для локальних областей поверхонь безвідносно до їх кривини й параметризації. Наприклад, для узагальнення емпіричних дискретних значень координат точок на сфері можна використати ряди сферичних функцій

$f(\theta, \lambda) = \sum_{n=0}^m \sum_{k=0}^n (A_{nk} P_{nk}(\theta) \cos k\lambda + B_{nk} P_{nk}(\theta) \sin k\lambda)$  степені та порядку  $m$ . Зміна значення  $m$

визначає кількість невідомих коефіцієнтів  $A_{nk}$  та  $B_{nk}$  і дорівнює  $(m+1)^2$  [11]. На будь-якій поверхні вирішення проблеми можна досягнути апроксимацією явного вираження розкладу в ряд заданої степені та порядку з використанням методу найменших квадратів. За результатами апроксимації на сукупності усіх GNSS-станцій, які розташовані у межах замкнених областей поверхонь, обчислюються невідомі коефіцієнти  $A_{nk}, B_{nk}$  і будуються відповідні емпіричні формули. Вони й формують функціональну модель перетворення (деформації) заданих областей поверхонь.

Беручи до уваги дискретність геодезичних даних, неоднозначність вибору степені та порядку ряду й емпіричне походження одержаних таким чином результатів, постає проблема відсутності однозначного кінцевого розв'язку, що зумовлює порушення відповідної умови гомеоморфізму. Вирішення цієї проблеми можна вмотивувати формально за критерієм точності апроксимації, що спроможний забезпечити метод найменших квадратів за

посередництва середньої квадратичної похибки апроксимації. Це дасть змогу оцінити ступінь наближення одержаного результату розв'язку до строгого на умовах гомеоморфізму. Компромісне рішення щодо вибору кінцевих емпіричних формул, які відповідають базисним функціям моделі, потрібно ухвалювати з урахуванням таких вимог.

1. Оптимальність вибору формули повинне визначати значення середньої квадратичної похибки апроксимації, яке відповідає точності емпіричних даних.

2. Похибки апроксимації функцій на складових зміщень станцій повинні, по можливості, бути рівними. Така вимога обґрунтовується правилом розподілу впливу похибок аргументів (складових зміщень) на точність їх функції.

3. Надмірне понад точність вимірів підвищення точності апроксимації функції недоцільне: гранично, за нульової похибки апроксимації, задача перетворюється в інтерполяцію функції у вузлах (станціях спостережень), а емпірична формула втрачає здатність передавати закономірності просторового розподілу зміщень станцій.

4. Надмірне збільшення кількості членів розкладу функції у ряди недоцільне з причини відповідного зменшення числа ступенів свободи при апроксимації функції. Враховуючи, що здебільшого кількість  $n$  станцій спостережень обмежена, порушення цієї вимоги спричинятиме зменшення кількості  $r = n - (m + 1)^2$  надлишкових вимірних величин і відповідне збільшення похибки апроксимації функції. Вплив цієї обставини ставить ефективність кінцевого розв'язку в пряму залежність від кількості станцій спостережень, які підлягають опрацюванню.

Побудована на таких засадах функціональна модель спроможна гарантувати передачу нелінійних деформацій та їх врахування головним геометричним об'єктом – двоагентним коваріантним метричним тензором, формування якого не обтяжене умовою лінеаризації базисних функцій [7]. Тензор за посередництва власних інваріантів передає зміну метричних властивостей області простору (топографічної поверхні) за допомогою числових характеристик різного геометричного змісту. За своєю суттю вони і є параметрами деформації топографічної поверхні як об'єкта досліджень у загальноприйнятому тлумаченні деформаційного аналізу [3].

Окреслена теоретична основа має узагальнювальний характер щодо використовуваної у задачах деформаційного аналізу навіть з погляду теорії тензорного аналізу та її застосування у геометрії, механіці та фізиці: «лінійно-однорідна нескінченно мала деформація суцільного середовища – це перетворення в середовищі афінного простору, який є тривіальним щодо ріманового і навіть евклідового» [7].

Використовуючи методи проєктивно-диференціальної геометрії і прийоми описування змін ріманової метрики у дотичному просторі, здійснено розв'язки в типових геодезичних двовимірних системах координат і одержано робочі формули для обчислення характеристик деформації. Одержані результати генерують відповідні методи, як їх розкрито у працях [8; 9; 10].

Для тестування розроблених методів вибірку вхідних даних сформовано координатами 126 GNSS-станцій на території Європи. Координати відібрано з бази JPL Comb архіву SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) [12] станом на середину 2008 та 2014 років у датумі ITRF2008. Розташування станцій та вектори їх горизонтальних зміщень ілюструє схема на рис. 1. Відібрані станції окреслюють поле деформації земної поверхні регіонального масштабу.

За сформованою вибіркою вхідних даних обчислено характеристики деформації земної поверхні, редукованої на площину з параметризацією локальною топоцентричною системою прямокутних координат  $x, y$ , геосферу з параметризацією геоцентричною си-

стемою сферичних широт  $\varphi$  (або полярної віддалі  $\theta = \frac{\pi}{2} - \varphi$ ) та довготи  $\lambda$  і на земний

еліпсоїд з параметризацією системою геодезичних широти  $B$  та довготи  $L$ . Координати станцій у зазначених системах параметризації одержано перетвореннями з геоцентричної системи  $X, Y, Z$ , як їх задано у базі JPL Comb [12].

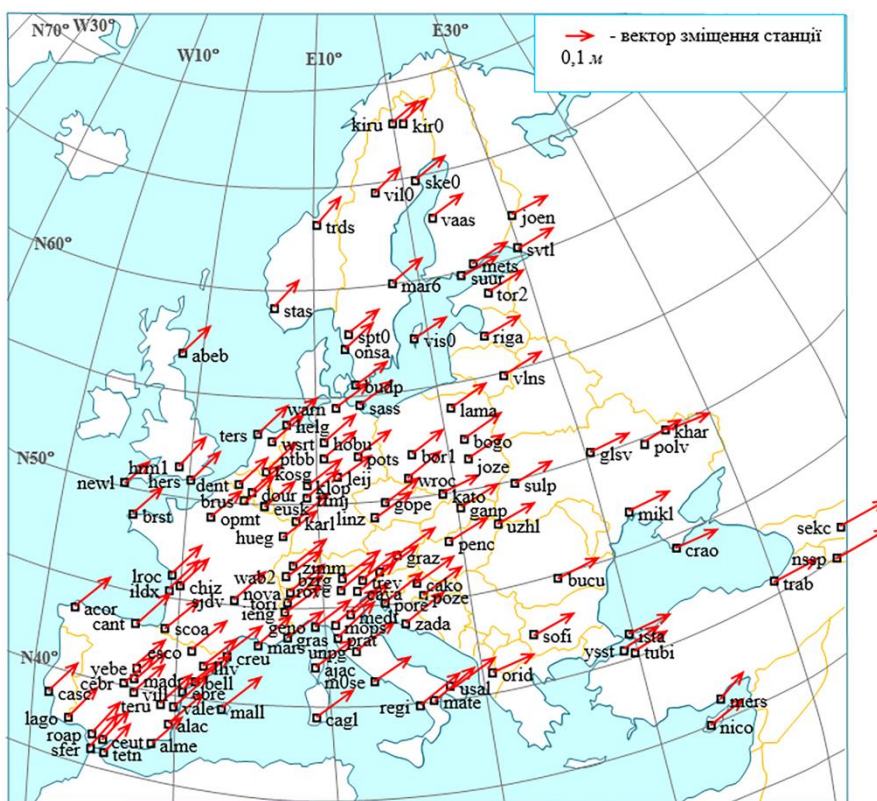


Рис. 1. Розташування і вектори зміщень GNSS-станцій протягом 2008-2014 рр. Джерело: розроблено автором.

Обчисленню підлягали характеристики деформації наступних трьох груп, як їх розкрито у працях [8; 9; 10]: 1) дилатація (масштаб площі)  $p$ ; 2) головні лінійні деформації, зокрема екстремальні розширення  $\mu_{\max}$  (розтяг) і  $\mu_{\min}$  (стиснення), зсув  $\gamma_m$ , а також напрям головної осі деформації  $\alpha$ , який орієнтує дію  $\mu_{\max}$ . Цей напрям задає дирекційний кут на площині або азимут на геосфері та еліпсоїді; 3) жорстке обертання окресленої частини земної поверхні як абсолютно твердого тіла, яке характеризує кут  $\varepsilon$ .

Результати моделювання деформації земної поверхні, редукованої на площину, представлено в табл. 1. Емпіричні формули функціональної моделі сформовано за результатами апроксимації явного вираження розкладу  $f(x, y)$  ряду поліномів Лежандра різних значень степені та порядку  $m$  методом найменших квадратів на складових  $\Delta x, \Delta y$  зміщень станцій. Одержані емпіричні формули дали змогу сформуувати відповідні значенням  $m$  функціональні моделі, метричний тензор і на їх основі обчислити характеристики деформації за формулами, як їх розкрито в [9]. При значенні  $m = 1$  враховуються лише лінійні члени розкладу  $f(x, y)$ . Керуючись вимогами 1-4 щодо встановлення емпіричних формул функціональної моделі і беручи до уваги, найбільшою мірою, пункт 2 цих вимог, прийнято таке рішення: кінцевими формулами, які генерують функціональну модель для даної емпіричної вибірки, потрібно прийняти ті, що відповідають рядам поліномів Лежандра степені та порядку  $m = 4$ . Відповідні цим базисним функціям характеристики найкраще представляють деформацію земної поверхні в проєкції на площину.

Таблиця 1 – Результати обчислення характеристик деформації земної поверхні, редукованої на площину

Базисні функції: ряди поліномів Ле- жандра степені та порядку $m$	Похибки апроксимації $\sigma_x, \sigma_y$ (мм)	Характеристики деформації та їх середні квадратичні похи- бки					
		$P$ 1.e-9	$\mu_{max}$ 1.e-9	$\mu_{min}$ 1.e-9	$\gamma_m$ 1.e-9	$\alpha^\circ$	$\varepsilon''$ 1.e-4
$m = 1$	$\pm 8$ $\pm 14$	17 $\pm 2$	30 $\pm 2$	-13 $\pm 1$	43 $\pm 2$	206.8 $\pm 1.3$	71 $\pm 5$
$m = 2$	$\pm 7$ $\pm 10$	13 $\pm 3$	33 $\pm 3$	-20 $\pm 2$	52 $\pm 4$	209.2 $\pm 1.8$	92 $\pm 8$
$m = 3$	$\pm 7$ $\pm 9$	5 $\pm 5$	20 $\pm 4$	-25 $\pm 3$	46 $\pm 5$	209.1 $\pm 2.8$	80 $\pm 11$
$m = 4$	$\pm 6$ $\pm 6$	9 $\pm 6$	22 $\pm 4$	-13 $\pm 4$	36 $\pm 6$	193.2 $\pm 5.1$	33 $\pm 13$
$m = 5$	$\pm 6$ $\pm 5$	-14 $\pm 28$	39 $\pm 18$	-53 $\pm 24$	91 $\pm 30$	145.0 $\pm 9.1$	177 $\pm 67$

Джерело: розроблено автором/

Наступний крок опрацювання даних – моделювання деформації земної поверхні у проєкції на геосферу. Для узагальнення емпіричних дискретних значень координат GNSS-станцій на геосфері використано базисні функції у формі рядів сферичних функцій. Емпіричні формули побудовано за явним вираженням розкладу  $f(\theta, \lambda)$  ряду сферичних функцій різних значень степені та порядку  $m$  методом найменших квадратів на складових зміщень  $\Delta\varphi, \Delta\lambda$ . Вони дали змогу сформувати відповідні значенням  $m$  функціональні моделі й за посередництва метричного тензора обчислити характеристики деформації за формулами, як їх розкрито в [10]. Результати зведено до табл. 2. При значенні  $m = 1$  враховуються лише лінійні члени розкладу  $f(\theta, \lambda)$ .

Таблиця 2 – Результати обчислення характеристик деформації земної поверхні, редукованої на геосферу

Базисні функції: ряди сферичних функцій степені та порядку $m$	Похибки апроксимації $\sigma_\varphi, \sigma_\lambda$ 1.e-4	Характеристики деформації та їх середні квадратичні похибки					
		$P$ 1.e-9	$\mu_{max}$ 1.e-9	$\mu_{min}$ 1.e-9	$\gamma_m$ 1.e-9	$\alpha^\circ$	$\varepsilon''$ 1.e-4
$m = 1$	$\pm 3,0$ $\pm 4,9$	-1 $\pm 1$	11 $\pm 1$	-12 $\pm 1$	22 $\pm 1$	327,4 $\pm 1,7$	42 $\pm 3$
$m = 2$	$\pm 2,5$ $\pm 3,0$	3 $\pm 2$	9 $\pm 1$	-6 $\pm 1$	15 $\pm 2$	331,9 $\pm 3,6$	26 $\pm 4$
$m = 3$	$\pm 2,5$ $\pm 2,5$	11 $\pm 3$	13 $\pm 2$	-2 $\pm 2$	15 $\pm 3$	330,5 $\pm 5,7$	27 $\pm 6$
$m = 4$	$\pm 8,6$ $\pm 10,2$	36 $\pm 23$	40 $\pm 19$	-5 $\pm 19$	45 $\pm 29$	333,0 $\pm 17,8$	42 $\pm 22$
$m = 5$	$\pm 18,5$ $\pm 22,9$	59 $\pm 44$	65 $\pm 32$	-6 $\pm 32$	71 $\pm 43$	330,8 $\pm 27,7$	125 $\pm 54$

Джерело: розроблено автором.

Графік на рис. 2 ілюструє закономірності зміни похибок апроксимації  $\sigma_\varphi, \sigma_\lambda$  від степені та порядку рядів  $m$ . Найкраща точність апроксимації досягнута при значенні  $m = 3$ . Цей результат узгоджується з пунктом 2 вимог 1-4 щодо встановлення оптималь-

них емпіричних формул функціональної моделі. Графіки на рис. 3, які показують закономірності зміни значень обчислених характеристик деформації, підтверджують, що найбільш реалістичними є результати моделювання з використанням рядів сферичних функцій степені й порядку  $m = 3$ . Отже, цим посвідчено наявність нелінійних деформацій земної поверхні території Європи.

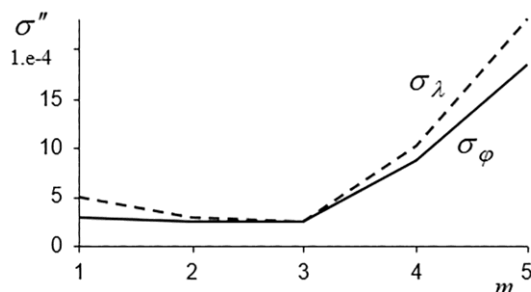


Рис. 2. Закономірності зміни похибок апроксимації від степені рядів  $m$  на геосфері  
Джерело: розроблено автором.

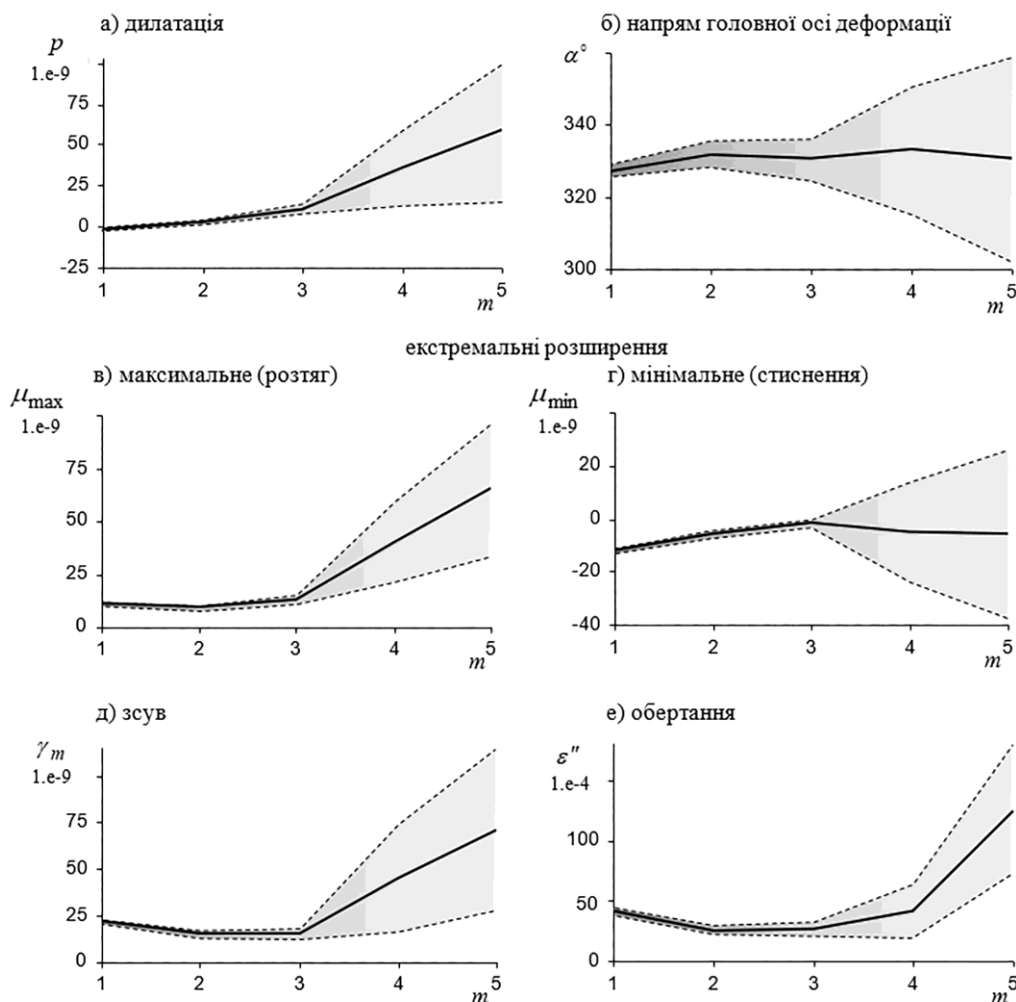


Рис. 3. Закономірності зміни значень характеристик деформації від степені рядів  $m$  на геосфері з урахуванням точності їх обчислення (забарвлене поле в межах пунктирних ліній виражає діапазон ймовірних значень параметрів)  
Джерело: розроблено автором.



Опрацювання вхідних даних у проєкції земної поверхні на еліпсоїд з використанням робочих формул, як їх розкрито у [8], дало кінцеві результати, які відрізняються від таких же на геосфері практично у межах їх середніх квадратичних похибок. Тому ці результати тут не представлено.

Порівняльний аналіз кінцевих результатів моделювання на площині та геосфері показує наступне. Найбільші розбіжності між однойменними характеристиками мають місце для групи головних лінійних деформацій. Цей факт не знаходить іншого пояснення, крім як закономірний наслідок значних спотворень проєкції земної поверхні на площину в порівнянні з геосферою чи еліпсоїдом. Проте такі спотворення ніяк не вплинули на дилатацію  $p$ . Це зумовлено внутрішнім змістом параметра  $p$ : як масштаб площі, він підлягав обчисленню не як абсолютний, а як відносний показник. Розбіжності в значеннях характеристики обертання  $\varepsilon$  не перевищують точності їх обчислення. Такий результат можна пояснити, виходячи зі змісту цієї характеристики: крім жорсткого обертання частини поверхні, яку окреслює задана сукупність GNSS-станцій, навколо центру їх ваги, кут  $\varepsilon$  ототожнюється зі спотворенням ортогональності осей системи координат, як це інтерпретується з погляду теорії тензорного аналізу [7]. Спотворення ортогональності осей координат рівною мірою проявляє себе на усіх трьох модельних поверхнях. У підсумку, беручи до уваги одержані результати й факт більшої адекватності земній поверхні моделі геосфери в порівнянні з площиною, потрібно констатувати таке: кінцевими показниками деформації земної поверхні території Європи є такі, що одержані на основі моделі з базисними сферичними функціями степені і порядку  $m = 3$ .

У зв'язку з ремаркою щодо параметра  $\varepsilon$  розкриємо ще один прикладний аспект результатів моделювання. Він пов'язаний із проблемою оцінювання спотворень системи координат. Безвідносно до типу поверхні, використовувани на ній координати станцій є прямим наслідком перетворення із тривимірної геоцентричної системи координат  $X, Y, Z$  у рамках референсної системи ITRS. Факт порушення геометричних та фізичних умов, які закладено у концепцію створення системи ITRS відносно її стану в тій чи іншій реалізації ITRF, є загальновідомим. Тож якщо мають місце спотворення в системі ITRS, то неминучим буде відповідний ефект в системі координат використовуваної модельної поверхні. Дані табл. 3 та їх наочна ілюстрація схемою на рис. 4 показують результати оцінювання кутових спотворень сферичної системи координат  $\varphi, \lambda$  протягом 2008-2014 рр. за формулами, як їх подано в [10]. Оцінюванню підлягали: 1) азимути  $A_\varphi^{def}, A_\lambda^{def}$  осей координат деформованої системи  $\varphi^{def}, \lambda^{def}$  відносно їх ортогонального початкового стану при  $A_\varphi = 0^\circ, A_\lambda = 90^\circ$ ; 2) відхилення осей від початкового стану  $A_\varphi^{def} - A_\varphi, A_\lambda^{def} - A_\lambda$ ; 3) міра косякутної системи  $\mathcal{G} = A_\lambda^{def} - A_\varphi^{def}$  після втрати властивості ортогональності внаслідок деформації поверхні; 4) показник спотворення ортогональності  $\varepsilon = \mathcal{G} - 90^\circ$  відносно початкового стану. Кут  $\varepsilon$  ототожнюється з характеристикою жорсткого обертання земної поверхні як абсолютно твердого тіла у проєкції на геосферу.

З погляду теорії параметризації криволінійних поверхонь обертання, їх систему координатних ліній утворюють меридіани й паралелі. Мережі меридіанів і паралелей в сферичній та еліпсоїдальній параметризації збігаються із загальною ізометричною системою і тому ідентичні між собою. Тому формули для вираження показників кутових спотворень на геосфері та еліпсоїді тотожні [8] і одержані результати рівною мірою належать до еліпсоїдальної системи координат.

Таблиця 3 – Оцінки кутових спотворень сферичної системи координат

Осі координат	меридіан $\varphi$	паралель $\lambda$
$A_{\varphi}^{def}, A_{\lambda}^{def}$	359° 59' 59.9985"	90° 00' 00.0012"
$A_{\varphi}^{def} - A_{\varphi}, A_{\lambda}^{def} - A_{\lambda}$	-0.0015"	0.0012"
$\mathcal{G}$	90° 00' 00.0027"	
$\varepsilon$	0.0027"±0.0006"	

Джерело: розроблено автором.

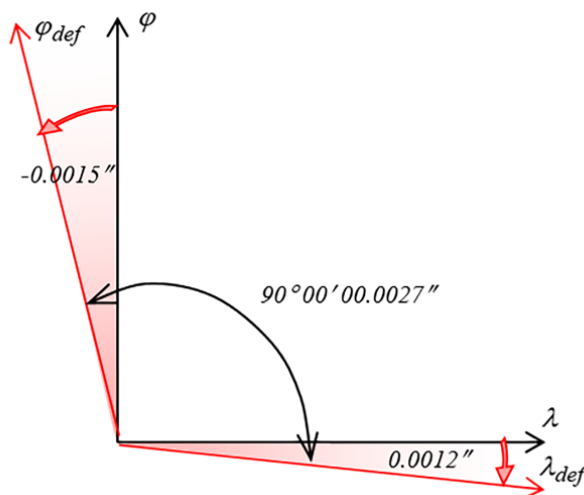


Рис. 4. Схема кутових спотворень сферичної системи координат

Джерело: розроблено автором.

Наведені в табл. 3 емпіричні оцінки кутів  $A_{\varphi}^{def} - A_{\varphi}, A_{\lambda}^{def} - A_{\lambda}$  порівнювались з аналогічними їм за змістом параметрами зміни орієнтування осей координат  $R_x, R_y, R_z$ , якими оперують у розв’язках реалізацій ETRF Європейської земної референційної системи ETRS89 відносно відповідних реалізацій ITRF системи ITRS. Звісно, таке порівняння не зовсім коректне з огляду на різні розмірності систем координат. Проте зіставлення одержаних емпіричних оцінок з їх аналогами у трансформаціях ITRF-ETRF, де показники  $R_x, R_y, R_z$  у часовому проміжку 2008-2014 рр. становлять відповідно 1.785, 11.151 та -16.170 mas [13], показало, що порівнювані параметри є одного порядку й відрізняються практично у межах точності їх обчислення.

Одержаний результат якоюсь мірою очікуваний з огляду на взаємозв’язки між двома референційними системами, як їх розкрито, наприклад, в працях [13; 14]. Передусім потрібно взяти до уваги мету створення ETRS89 – це фіксація відлікової системи до стабільної частини Євразійської літосферної плити задля уникнення еволюції координат з часом внаслідок незалежних рухів плит у Міжнародній системі ITRS. Параметри обох систем збігаються лише на епоху 1989.0, коли започатковувалось створення Європейської системи. Відтоді внаслідок сталого дрейфу континенту система ETRS89 прямо пов’язана із системою ITRS строгими математичними співвідношеннями, але за винятком параметрів обертання  $R_x, R_y, R_z$ , які в сукупності виражають обертання Євразійської плити в реалізаціях ITRF і визначаються незалежно за даними супутникового моніторингу поверхні на європейських станціях. Саме ця обставина пояснює збіжність кутів  $A_{\varphi}^{def} - A_{\varphi}, A_{\lambda}^{def} - A_{\lambda}$  з їх аналогами  $R_x, R_y, R_z$ , якщо взяти до уваги, що вибірка емпіричних вхідних даних формувалась у реалізації ITRF2008.

**Висновки.**

1. Використані методи показали результати, якими підтверджено деформації земної поверхні території Європи нелінійного характеру. Загалом, ефективність використання нелінійних моделей в сучасних дослідженнях деформації Землі стає безсумнівною. Це підтверджено навіть на прикладі досягнення розв'язку ITRF2014 системи ITRS: «генералізація розв'язку ITRF2014 з розширеним моделюванням нелінійних рухів станцій забезпечила значне підвищення його точності порівняно з ITRF2008» [15].

2. Результати моделювання деформацій у відношенні до геосфери та земного еліпсоїда обертання виявились практично ідентичними. Вони більш реалістично відображають деформації земної поверхні в порівнянні з такими ж у відношення до площини. Моделювання полів горизонтальних деформацій земної поверхні регіональних масштабів рекомендується реалізовувати у проєкції на одну із зазначених криволінійних модельних поверхонь.

3. Порівняння результатів оцінювання кутових спотворень двовимірних криволінійних систем координат з їх аналогами у трансформаціях референцних систем ITRF-ETRF показало розбіжності у межах точності їх обчислення. Цим посвідчено достовірність кінцевих результатів моделювання деформацій земної поверхні території Європи.

4. Крім прямого призначення для вирішення завдань деформаційного аналізу в геодинаміці, розроблені методи можуть бути використані як додатковий інструмент моніторингу референцних систем на регіональному та локальному рівнях, принаймні з погляду виявлення ефектів геодинамічного походження.

**Список використаних джерел**

1. International Association of Geodesy. Commission 3 - Earth Rotation and Geodynamics [Electronic resource]. – Access mode: [http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/handbook\\_2012/333\\_Commission\\_3.pdf](http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/handbook_2012/333_Commission_3.pdf).

2. Dermanis, A. The evolution of geodetic methods for the determination of strain parameters for earth crust deformation / A. Dermanis // eds. D. Arabelos, M. Kontadakis, Ch. Kaltsikis, S. Spatalas. Terrestrial and stellar environment. – Publication of the school of rural & surveying engineering, Aristotle university of Thessaloniki, 2009. – Pp. 107-144.

3. Schneider, D. Complex Crustal Strain Approximation [Electronic resource] / D. Schneider. – Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 1982. – Access mode: <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:1494-01.pdf>.

4. Grafarend, E.W. Intrinsic deformation analysis of the Earth's surface based on displacement fields derived from space geodetic measurements. Case studies: present-day deformation patterns of Europe and of the Mediterranean area (ITRF data sets) / E.W. Grafarend, B. Voosoghi // Journal of Geodesy. – 2003. – № 77(5-6). – P. 303-326. DOI: 10.1007/s00190-003-0329-2.

5. Pietrantonio, G. Three-dimensional strain tensor estimation by GPS observations: methodological aspects and geophysical applications / G. Pietrantonio, F. Riguzzi // Journal of Geodynamics. – 2004. – № 38. – P. 1-18. DOI: [doi.org/10.1016/j.jog.2004.02.021](https://doi.org/10.1016/j.jog.2004.02.021).

6. Тадеєв, О. Адаптивні методи оцінювання та інтерпретації деформаційних полів Землі з використанням GNSS-даних / О. Тадеєв // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2018. – № I(35). – С. 71-78.

7. Sokolnikoff, I. S. Tensor analysis: Theory and applications to geometry and mechanics of continua / I. S. Sokolnikoff. – New York, London, Sydney: John Wiley & Sons, 1964. – 361 p.

8. Тадеєв, О. Оцінювання деформацій земної поверхні за даними в геодезичних криволінійних системах координат / О. Тадеєв // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2015. – № I(29). – С. 48-52.

9. Тадеєв, О. Оцінювання деформацій земної поверхні з позицій теорії квазіконформних відображень / О. Тадеєв // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2013. – № 78. – С. 140-145.

10. Тадеєв, О. Оцінювання деформацій земної поверхні, редукованої на геосферу / О. Тадеєв // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2013. – № II(26). – С. 46-52.

11. Янке, Е. Специальные функции : формулы, графики, таблицы : [справочник] / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Леш ; пер. с 6-го перераб. нем. изд. под ред. Л. И. Седова. – Изд. 2-е, стер. – Москва : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1968. – 344 с.

12. Scripps Orbit and Permanent Array Center [Electronic resource]. – Access mode: <http://sopac.ucsd.edu/sector.shtml>; <http://csrc-old.ucsd.edu/velocities.shtml>.

13. Relationship and Transformation between the International and the European Terrestrial Reference System. EUREF Technical Note 1 [Electronic resource] / eds. Z. Altamini. – Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN), France, 2018. – Access mode: <http://etrs89.ensg.ign.fr/pub/EUREF-TN-1.pdf>.

14. Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign [Electronic resource] / eds. C. Boucher, Z. Altamini. – Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN), France, 2011. – Access mode: <http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V8.pdf>.

15. Altamini, Z. ITRF2014: a new release of the international terrestrial reference frame modeling nonlinear station motions / Z. Altamini, P. Rebischung, L. Metivier, X. Collilieux // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2016. – № 121 (B8). – P. 6109-6131. DOI: 10.1002/2016JB013098.

### References

1. International Association of Geodesy. Commission 3 - Earth Rotation and Geodynamics. (2012). [http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/handbook\\_2012/333\\_Commission\\_3.pdf](http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/handbook_2012/333_Commission_3.pdf).

2. Dermanis, A. (2009). The evolution of geodetic methods for the determination of strain parameters for earth crust deformation. In: *Terrestrial and stellar environment* / eds. D. Arabelos, M. Kontadakis, Ch. Kaltsikis, S. Spatalas. Publication of the school of rural & surveying engineering, Aristotle university of Thessaloniki, 107-144.

3. Schneider, D. (1982). *Complex Crustal Strain Approximation*. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:1494-01.pdf>.

4. Grafarend, E.W., Voosoghi, B. (2003). Intrinsic deformation analysis of the Earth's surface based on displacement fields derived from space geodetic measurements. Case studies: present-day deformation patterns of Europe and of the Mediterranean area (ITRF data sets). *Journal of Geodesy*, 77(5-6), 303-326. doi: 10.1007/s00190-003-0329-2.

5. Pietrantonio, G., Riguzzi, F. (2004). Three-dimensional strain tensor estimation by GPS observations: methodological aspects and geophysical applications. *Journal of Geodynamics*, 38, 1-18. doi.org/10.1016/j.jog.2004.02.021.

6. Tadyeyev, O. (2018). Adaptivni metody otsiniuvannia ta interpretatsii deformatsiinykh poliv Zemli z vykorystanniam GNSS-danykh [Adaptive methods of evaluation and interpretation of deformation fields of the Earth using GNSS data]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Modern Achievements of Geodetic Science and Industry*, I(35), 71-78.

7. Sokolnikoff, I.S. (1964). *Tensor analysis: Theory and applications to geometry and mechanics of continua*. New York, London, Sydney, John Wiley & Sons.

8. Tadyeyev, O. (2015). Otsiniuvannia deformatsii zemnoi poverkhni za danymy v heodezychnykh kryvoliniinykh systemakh koordynat [Evaluation of deformations of the Earth's surface based on data in geodetic curvilinear coordinate systems]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Modern Achievements of Geodetic Science and Industry*, I(29), 48-52.

9. Tadyeyev, O. (2013). Otsiniuvannia deformatsii zemnoi poverkhni z pozytsii teorii kvazikonformnykh vidobrazhen [Evaluation of deformations of the Earth's surface from the standpoint of the theory of quasi-conformal reflections]. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia – Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 78, 140-145.

10. Tadyeyev, O. (2013). Otsiniuvannia deformatsii zemnoi poverkhni, redukovanoi na heosferu [Evaluation of deformations of the Earth's surface, reduced to the geosphere]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Modern Achievements of Geodetic Science and Industry*, II(26), 46-52.

11. Jahnke, E., Emde, F., Loesch, F. (1964). *Spetsialnye funktsii (Formuly, grafiki, tablitsy)*. Per. nem. pod red. L.I.Sedova [*Special functions (Formulas, graphs, tables)*]. Transl. German under the editorship L.I. Sedova]. Nauka.
12. Scripps Orbit and Permanent Array Center. <http://sopac.ucsd.edu/sector.shtml>; <http://csrc-old.ucsd.edu/velocities.shtml>.
13. Altamini, Z. (2018). *Relationship and Transformation between the International and the European Terrestrial Reference System. EUREF Technical Note 1*. Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN), France. <http://etrs89.ensg.ign.fr/pub/EUREF-TN-1.pdf>.
14. Boucher, C., Altamini, Z. (2011). *Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign*. Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN), France. <http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V8.pdf>.
15. Altamini, Z., Rebischung, P., Metivier, L., Collilieux, X. (2016). ITRF2014: a new release of the international terrestrial reference frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121 (B8), 6109–6131. doi: 10.1002/2016JB013098.

Отримано 03.06.2024

UDC 528.22:551.24

### **Oleksandr Tadyeyev**

PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Geodesy and Cartography  
National University of Water and Environmental Engineering (Rivne, Ukraine)

**E-mail:** [o.a.tadyeyev@nuwm.edu.ua](mailto:o.a.tadyeyev@nuwm.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4566-0160>. **ResearcherID:** [B-6081-2019](https://pubs.rsos.royalsocietypublishing.org/author/B-6081-2019)

## **MODELING OF HORIZONTAL DEFORMATIONS OF THE EARTH'S SURFACE ON A REGIONAL SCALE USING GNSS DATA (ON THE EXAMPLE OF THE TERRITORY OF EUROPE)**

*The results of a scientific and methodological study of the problem of evaluation of horizontal deformations of the Earth's surface based on the data of global navigation satellite systems (GNSS) are presented in the article. The results of static modeling of horizontal deformations of the Earth's surface on a regional scale using methods based on the theory of transformations of images of the Riemannian space in the form of diffeomorphic manifolds are presented. The methods are based on the properties of elementary manifolds of the Euclidean type of dimension  $N=2$  in the form of a tangent plane with parameterization by a rectangular coordinate system and tangent curvilinear surfaces of rotation with parameterization by spherical and ellipsoidal systems. Solutions of problems on these surfaces were achieved by methods of the projective differential geometry. The modeling was implemented using a sample of coordinates of GNSS stations on the territory of Europe during 2008-2014. The sample was formed based on the JPL Comb database of the SOPAC archive. Functional models of the deformation are constructed by basic functions in the form of series of Legendre polynomials of various degrees and orders on the plane and in the form of series of spherical functions of various degrees and orders on the geosphere and the Earth's ellipsoid of rotation. Results of calculating the characteristics of horizontal deformations of the Earth's surface reduced to these modeling surfaces and their comparative analysis are presented. The obtained results confirmed the deformations of a non-linear nature. The results of the evaluation of angular distortions of curvilinear coordinate systems are presented. Comparison of the obtained results with their analogues in the transformations of the ITRF-ETRF reference systems during 2008-2014 showed discrepancies within the limits of their calculation accuracy.*

**Keywords:** GNSS; modeling surface; basic function; approximation; metric tensor; deformation.

**Table:** 3. **Fig.:** 4. **References:** 15.

**Cristian Alfredo Wittig Grell<sup>1</sup>, Serhii Zavatskyi<sup>2</sup>, Olena Savchenko<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>A in Housing and Urbanism Architectural Association School of Architecture  
London, UK, Academician of the Academy of Urban Studies (London, UK),  
International Senior Consultant on the Reconstruction of Cities Destroyed by Natural Disasters and Wars,  
CEO of Thought Group Chile (Santiago de Chile, Chile)  
**E-mail:** [cawittig@thought.cl](mailto:cawittig@thought.cl)

<sup>2</sup>PhD in Physical and Mathematical Sciences,  
Associate Professor of the Department of Architecture and Environmental Design  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)  
**E-mail:** [s.zavatski@gmail.com](mailto:s.zavatski@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8307-1554>. **ResearcherID:** [Q-6118-2017](https://orcid.org/0000-0001-5461-7127)

<sup>3</sup>Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Architecture and Environmental Design  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)  
**E-mail:** [e.savchenko@stu.cn.ua](mailto:e.savchenko@stu.cn.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5461-7127>  
**ResearcherID:** [G-5911-2014](https://orcid.org/0000-0001-5461-7127); [ABJ-3699-2022](https://orcid.org/0000-0001-5461-7127); [H-1](https://orcid.org/0000-0001-5461-7127), [IGR-5254-2023](https://orcid.org/0000-0001-5461-7127)

## CENTER FOR THE CREATION AND DEVELOPMENT OF START-UPS OF THE CHERNIHIV POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY: ARCHITECTURAL RENOVATION OF THE BUILDING OF THE FORMER CINEMA “PEREMOHA” IN CHERNIHIV

*Based on modern humanistic principles of architectural and urban design and system analysis of three-dimensional solutions of the former «Peremoha» cinema in Chernihiv, the results of the study of architectural and conceptual images are presented and a project for the architectural renovation of the new building of the Center for the Creation and Development of Startups of Chernihiv Polytechnic National University is proposed.*

*The project envisages the spatial transformation of space using a system of load-bearing wooden frame structures and innovative glass construction technologies. The designed superstructures, together with the system of terraces and balconies, will visually create a transparent space for the interior of the new building, accessible to sunlight and convenient for educational, scientific and artistic activities of students, teachers and active residents of the city.*

**Keywords:** architectural renovation; functional renovation; «Peremoha» cinema, Chernihiv, architectural and construction reconstruction, Center for Creation and Development of Startups of Chernihiv Polytechnic National University. *Fig.: 9. References: 8.*

**Relevance of the research topic.** Modern urban planning and the development of general plans for the development of territories require the use of innovative strategic approaches to effectively address the socio-economic and humanitarian development of Ukrainian settlements in the post-war period. In addition to the large-scale destruction of a huge number of residential and public buildings, there are many abandoned communal buildings in the cities of Ukraine, which, without losing their capital, need new rethinking and re-inclusion in the humanitarian and socio-economic life of territorial communities. In modern urban planning, the most effective methods of improving aesthetic qualities of the urban environment are the transformation of objects that are not used for their intended purpose into public buildings with partially preserved functions or with a complete change in the production function. The latter is carried out in the process of *conservation, revitalization, renovation, environmental rehabilitation and complete re-functionalization* [1, 3]. Therefore, the development of projects related to the possibility of rehabilitation of abandoned buildings through new proposals for improving the external and internal architecture of the building and rethinking its layout is relevant today.

**Statement of the problem.** At the end of 2022, the leadership of the Department of Urban Planning and Architecture of the Chernihiv Regional State Administration turned to the international consultant for the reconstruction of destroyed cities, General Director of Thought Group Chile, architect Cristián Alfredo Wittig Grell, who at that time had successful cooperation with the authorities of the cities of Irpin and Bucha on the development of projects for memorial complexes and the reconstruction of destroyed buildings, for strategic support for the process of rebuilding city Chernihiv and surrounding villages, which were seriously destroyed and damaged by Russian invaders during the hostilities.

Chilean architects were invited to develop projects for new houses of culture in the settlements of Ivanivka and Yahidne in the Chernihiv region. And already in April-May 2023, these two projects were presented to the Department of Urban Planning and Architecture of the Chernihiv Regional State Administration, the communities of the above-mentioned villages, as well as students and teachers of Chernihiv Polytechnic National University. Territorial communities and the academic community of the University highly appreciated the professional decisions of Chilean architects to reconstruct destroyed houses of culture and transform former buildings into modern public multifunctional spaces filled with light through the use of glass structures.

In May 2023, the Scientific and Technical Council of Chernihiv Polytechnic National University decided to revitalize and provide new functionality to the building of the former city cinema «Peremoha», through the organization of the University Center for Startup Creation and Development of Chernihiv Polytechnic National University on its basis. It was proposed that the architects of Thought Group Chile be involved in the development of the project for the reconstruction of the cinema building [2].

The Chilean architects were tasked with redesigning the interior of the building, the main of which are three cinema halls and a hall, into spaces for combining science, education and business, and were proposed to place creative workshops and laboratories in the cinema in order to integrate scientific, educational, cultural and artistic functions of the new Center.

The purpose of such a Center in the general structure of the University will be to meet not only the additional educational needs of students, but also the development and support of startup projects in the center of creative space and professional growth of the city's creative youth.

**Analysis of the latest research and publications.** The experience of revitalization and reconstruction of not only individual buildings, but also abandoned industrial zones is covered in a sufficient number of scientific papers [1, 3-6]. The monograph of Kharkiv researchers [1] examines the urban planning potential of abandoned industrial areas. The regularities of renovation of industrial buildings as a system of measures of organizational and economic modernization, technical renewal, cultural and historical heritage, ecological rehabilitation and social revitalization of urban areas are presented. Methods of renovation of industrial buildings for civil facilities are proposed.

The works [4–5] investigated the issues of functional renovation of the interior of the modernist building of «Peremoha» cinema. In particular, it is proposed to convert the large cinema hall into a co-working space, equip a modern conference hall in the middle hall with the original function of the cinema hall, turn the small hall into open student workshops of architectural and design-projection and modeling with available laser cutters, 3D printers, milling cutters, plotters, etc. In these workshops, students will be able to quickly master various manual and digital technologies for manufacturing an author's product and effectively go from creating a model prototype to a finished product.

In the work [6], project proposals were developed for the interior design of the premises of «Peremoha» cinema with changed functionality.

When creating the model of the interior design of the «Co-working» (large hall), the design features of the floor of the room, which has a significant difference in height from the entrance to the podium of the stage, were taken into account, so it was decided to organize the workspace of the «Co-working» as a multi-level structure with several main zones.

For the arrangement of a universal production and experimental workshop, it is proposed to divide the space of the small hall into several levels: balcony – podium – main production area.

The interior of the conference hall (the middle hall of the cinema) was designed in a modern minimalist and futuristic style with monochromatic surface decoration, calm shades of colours and the use of soundproofing panels. The arrangement of contour-step ceiling-wall lighting in the conference room in this project is a design technique that will enhance the three-dimensional perception of the room and the overall level of its comfort.

**Identification of unexplored parts of the general problem.** The analysis of recent studies and publications has shown that the project proposals for the functional renovation and renovation of the interior of the premises of the former cinema «Peremoha» do not solve the main problem of the building, objectively related to the features of the architecture and space-planning solutions of the former Soviet cinemas. Firstly, the building is built on the same level, and it has a large above-ground area. Secondly, the internal layout of the building is structured using a system of internal load-bearing walls that separate all its rooms and prevent the penetration of natural light.

**The aim of the article** is to develop conceptual project proposals for the architectural renovation of the building of the former cinema «Peremoha» and the creation on its basis of a new scientific and artistic Center for the creation and development of startups of Chernihiv Polytechnic National University for students and residents of the city. It is envisaged, based on modern architectural strategies and rethinking the philosophy of urban development, to develop a project of a comfortable open space combining science and art, education, and business.

**Statement of the main material.** In the process of developing a conceptual architectural proposal for the renovation of the former «Peremoha» cinema (Fig. 1), commissioned in 1985, the urban planning situation of the location of the building in the center of Chernihiv was analyzed.



*Fig. 1. The building of the cinema «Peremoha» surrounded by residential buildings*

Analysis of the situational scheme of the location of the former cinema among urban buildings (see Fig. 2) shows its advantageous location at the corner of Shevchenko Street and Levka Lukyanenko Avenue surrounded by a residential area. Therefore, from the point of view of urban planning, the building occupies one of the central and strategic places in the Desnianskyi district of Chernihiv.

Based on the modern philosophical foundations of architecture and urbanism, which argue that *architecture, and therefore urban planning, is an interface of reality, as well as a tool for observing and verifying the experience of reality* [7, 8], to develop the concept of an architectural project, we posed some strategically important questions to understand and comprehend all the problematic issues related to the real situation around the old building of «Peremoha» cinema.

It should be noted that the cinema building is the compositional core of the surrounding architectural environment. However, due to its low-rise and closed nature, the building today has partially lost its architectural expressiveness, which would compositionally and spatially connect it with the urban planning situation (Fig. 1).





*Fig. 2. Situational scheme of the location of the cinema «Peremoha»*

All problematic issues were in one way or another subordinated to the ideas of a new look at the old building, preserving its potential as an example of the Ukrainian spatial and urban identity of the last century.

In addition, the analysis of photographic material, as well as architectural plans (Figs. 3 and 4) made it possible to formulate basic conclusions about the condition of the existing building:

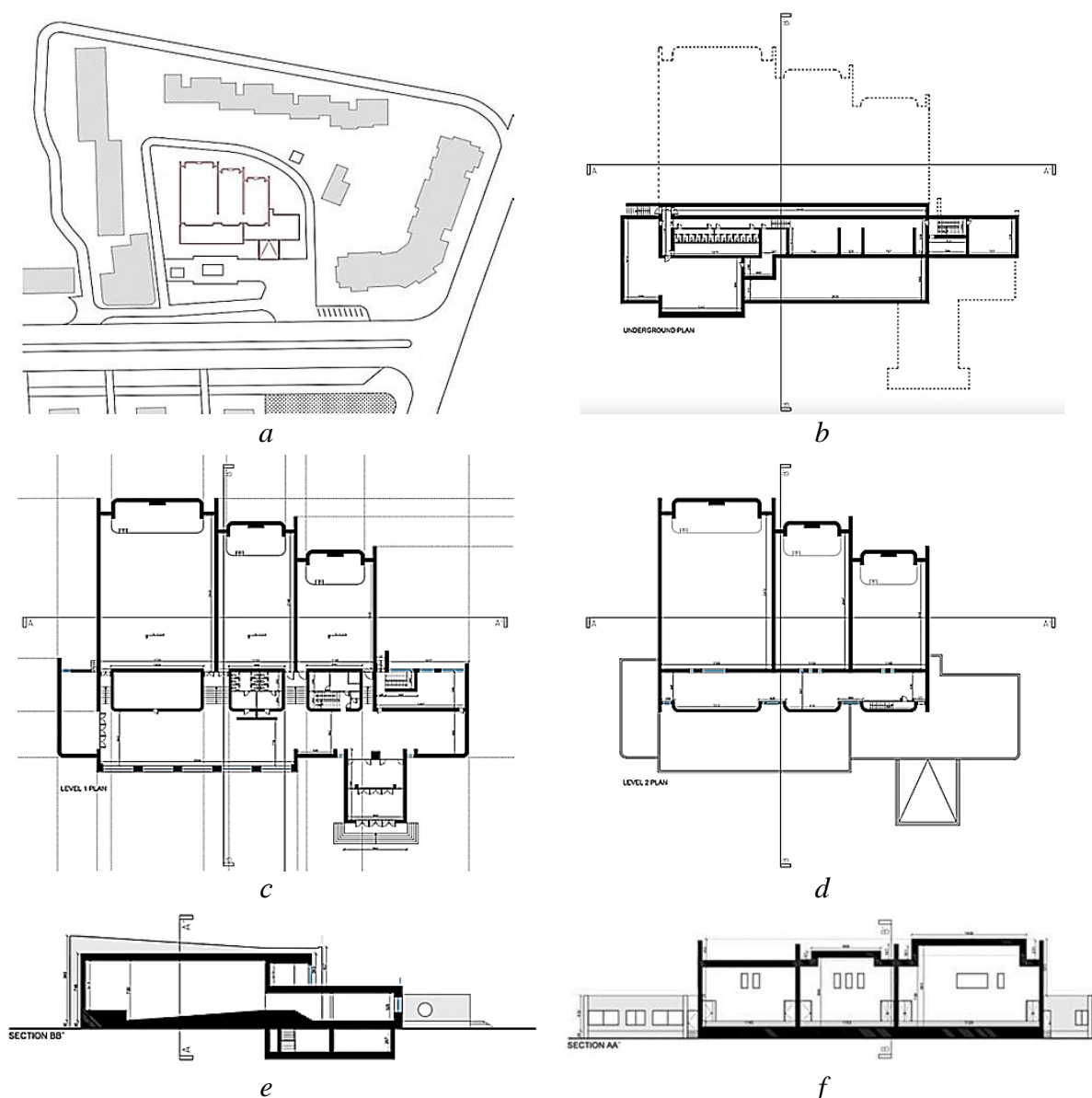


*Fig. 3. Photo of the entrance and the perspective of the lobby of the «Peremoha» cinema*

1. The building is built on the same level, has large rooms, its architectural and structural scheme is based on a system of load-bearing internal walls that divide the room, thereby forming a space devoid of sufficient penetration of natural light.

2. The main façade is built in a postmodern style with elements of brutalism with a limited direct relationship with the urban environment. Other façades are completely closed and excluded from spatial interaction with the public squares adjacent to the building.

3. The interior of the building complies with the principles of organizing the space of cinema buildings – a large and long foyer, from which you can get to halls of different sizes, which are separate rooms devoid of natural light, which prevents free communication and interaction of people inside (Fig. 4).



*Fig. 4. Architectural Plans of the Existing Building:*

*a – general plan; b – ground floor; c – first floor; d – second floor; e and f – sections*

A systematic analysis of three-dimensional solutions of the old building helped the authors of the study to create architectural conceptual images of the new project:

*1. The new building should be complemented by several operated levels with a glass railing that will promote openness to outdoor natural light, which will stimulate creativity, innovation and productive discussion of new ideas.*

This first image of the architectural design idea stems from the concept of a new three-dimensional solution of the building, as a large glass frame – open, transparent and filled with light. This decision opens up the possibility of creating new public spaces for meetings, open discussion and joint work of the Center's visitors.

*2. A public building should be a new space for social and cultural activities, accessible to city residents seeking creativity and innovation, scientific and artistic research.*

Thus, the new concept of the old public building is formed as the generation of free space in the city with a new purpose and opportunities by architectural means and is based on the combination of interior and exterior. At the same time, the boundaries of perception of indoor and outdoor spaces will be blurred due to the dematerialization of walls filled with transparent glass planes.

3. The concept of the new building includes the addition of existing spaces by creating the second and third open operated horizontal levels. In this case, visitors to the Center will have the opportunity to enjoy the public space of the external environment (Student Square) and its urban context from the new urban horizon.

The considered conceptual images helped to finally formulate the conceptual architectural proposals for the new project. These proposals can be divided into three strategies, which are reflected in the architectural plans of the new building (Fig. 5).

First, it is proposed to open the building to the outer area in which it is located, for this purpose a second level has been created in the longitudinal corridor that leads to the main rooms. In this way, a kind of connection is formed between what happens outside the building and inside, for the realization of spatial freedom. Above the second level, there is a café as a meeting place for creative personalities who are united by this building: students, teachers, professionals and artists.

One of the architectural challenges was the problem of redesigning the three cinema halls of the existing building without demolishing or proposing a major structural restructuring of the wall structures that were considered damaged. To solve this problem, instead of the existing walls, it was suggested to develop a structural system of self-supporting laminated wooden frames, on which various premises of the Center with an updated internal layout will rest. This structural frame system does not depend on existing load-bearing walls and allows additional operational levels.

To demonstrate this system and, at the same time, emphasize the large dimensions of cinema halls, it is proposed to make the central space three-level, which will provide a visual connection between different halls (Fig. 5).

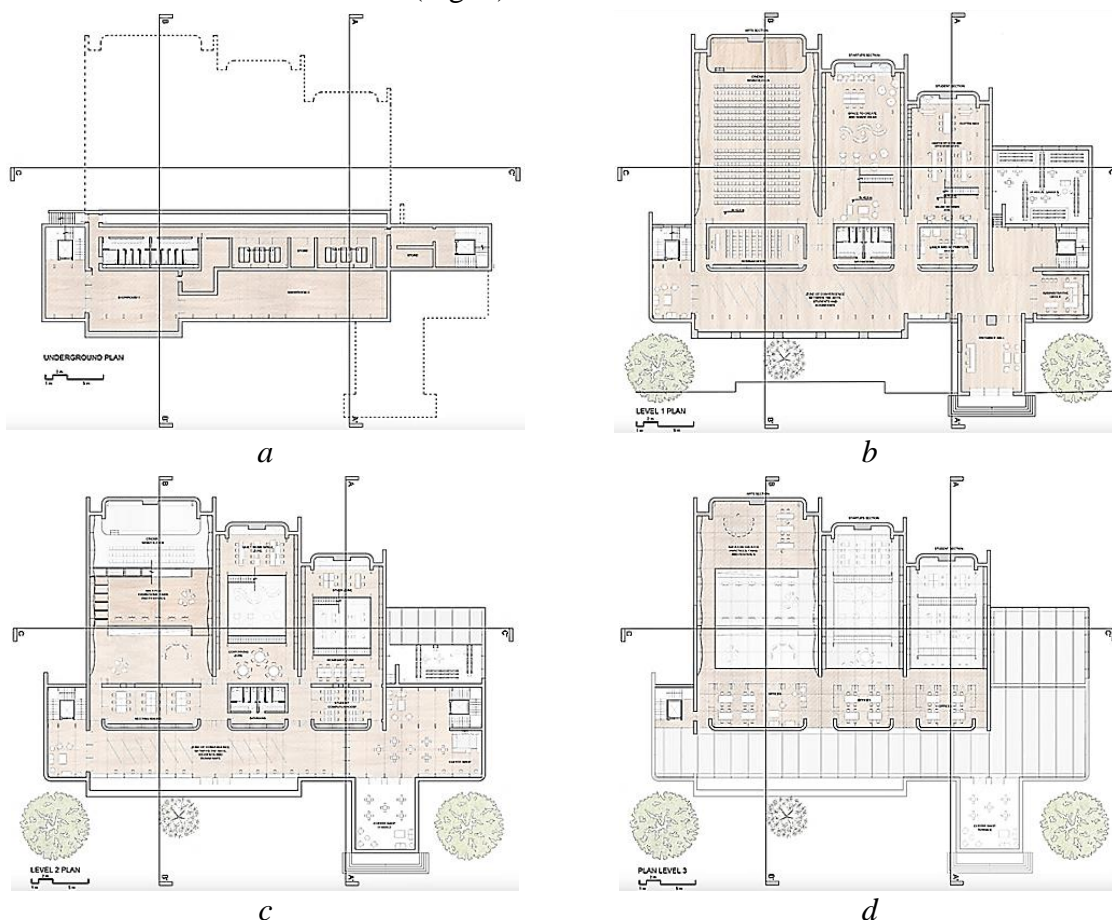
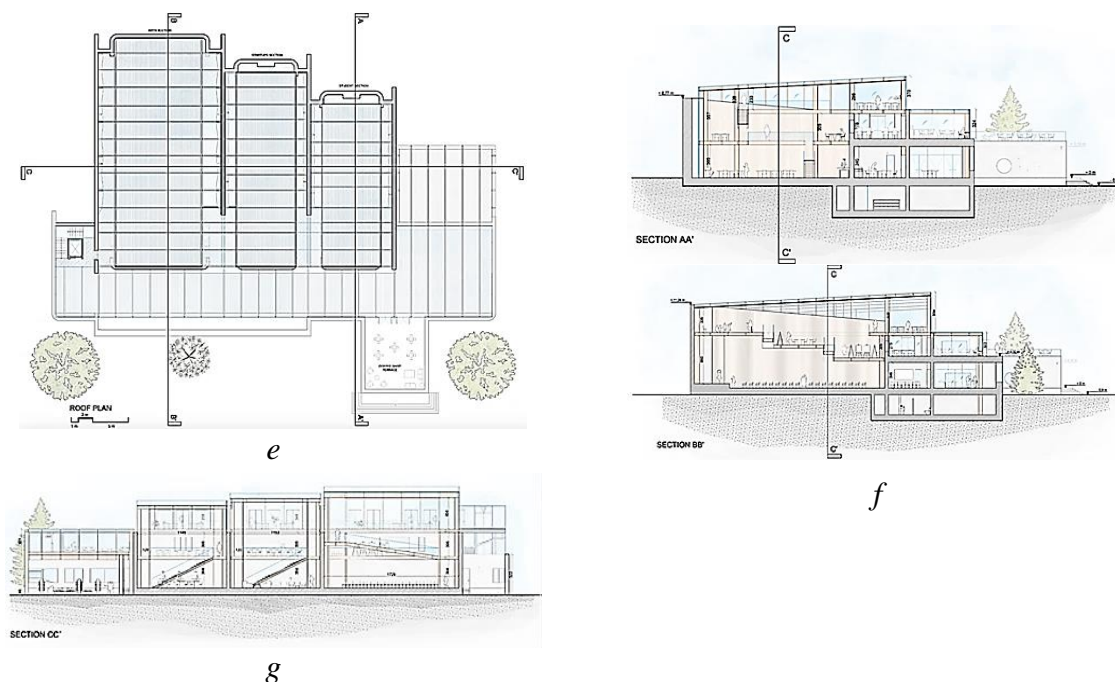


Fig. 5. Planimetry of the conceptual architectural proposal:  
 a – basement; b – first floor; c – second floor; d – third floor;  
 e – roof plan, f, g – longitudinal and cross-sections



*g*  
Fig. 5. The end of the fig. (beginning of p. \*\*)

Such a three-dimensional solution will create a sense of air and freedom for those who will be inside the premises of the Center, and we will get spacious, bright and ventilated interiors. It also facilitates the layout of rooms without partitions and the use of walls (Fig. 6).

The third strategy of architectural renovation is related to the goal of filling the dark space of the cinema premises with natural light and ensuring their spatial and planning combination.

The terms of reference were to design workshops in the new building of the Center for architecture and design students, as well as students and professionals working on startups, and, finally, to create an exhibition space for art and culture in memory of the former cinema.



Fig. 6. Visualization of the interior space of the new building of the «Peremoha» cinema

Based on this, it is proposed to redevelop three cinema rooms as follows: the smallest cinema hall will be adapted for students for educational laboratories and computer classes. On the first level, the premises are planned for workshops. The middle hall will be used for startups, meeting rooms and offices.

On the ground floor of the large hall, there will be a cinema and concert hall with a stage and the possibility of placing exhibitions of famous artists and beginners from among students and youth of the city.

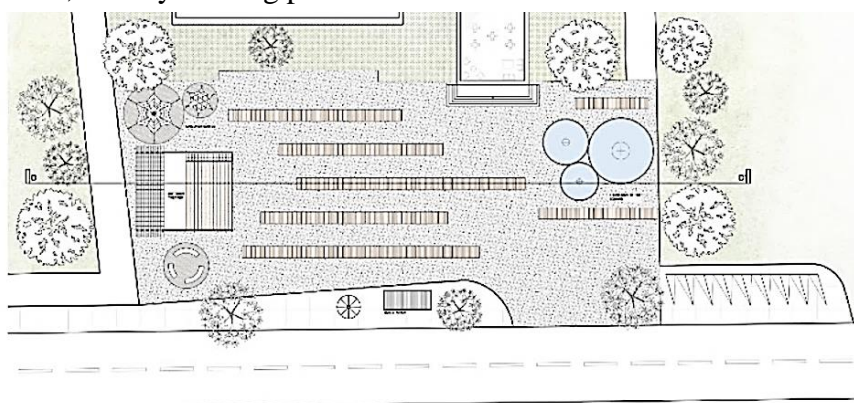
The corridor on all floors should become a point of convergence between all rooms, contributing to interdisciplinary enrichment. To do this, it is proposed to use this space as a centre for classes, conversations and debates, with boards and a coffee shop.

Both this corridor and the third floor, proposed to expand the functionality of the new Center, are fully glazed spaces that will have a direct view of the square next to the building, as well as the interior of the building (see Fig. 7).



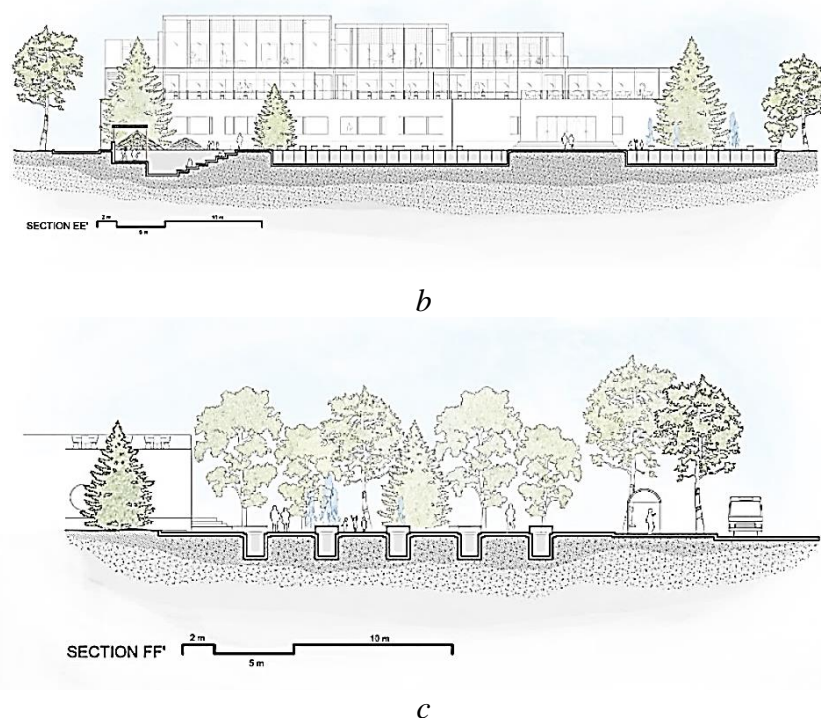
*Fig. 7. Conceptual architectural proposal for the second-floor corridor*

The architectural renovation project of the former cinema «Peremoha» also provides for the development of an option for the reconstruction of the square near the building with the possibility of protecting citizens in the event of an air raid and a missile attack by Russia. For this purpose, it is proposed to equip the square with long fortified trenches (Fig. 8), which will function with a dual purpose – as a protective structure in case of bombing, as well as a basis for placing the chairs of the summer theatre, thereby creating places for recreation and interviews.



*a*

*Fig. 8. Planning a new public square proposal:  
a – plan-scheme of public square; b– section EE'; c –section FF'*



*Fig. 8. The end of the fig. (beginning of p. \*\*)*

The proposed trench arrangement leaves room in the area for children's play and a water pool that cools residents in the summer, encouraging them to stay and be active in this space (Fig. 9).



*Fig. 9. Visualization of the public square and the main facade*

Taking into account all of the above, it can be stated that the project of architectural renovation of the old building is essentially an architectural reformatting of the object, carried out in order to transform the postmodern space of the Soviet cinema into a new space full of natural light, freedom and three-dimensional combination of premises. The opening of the interior space of the three large halls, the elimination of excessive separation of the premises and the creation of a sufficiently large spatial and visual continuity were achieved by combining two new design levels using a system of balconies and terraces and the use of glass panel technology. Due to the use of three-dimensional glass boxes, a transparent large-scale perimeter was formed, which blurs the boundaries between the interior and exterior of the new space of the building, creating a visual gate that opens to the public space of the adjacent square (Fig. 9).

**Conclusions.** The paper presents the original results of the conceptual project for the architectural renovation of the old building of the former cinema «Peremoha», carried out in cooperation with the Department of Architecture and Environmental Design of Chernihiv Polytechnic National University with Chilean architects of the Thought Group Chile company. The main original results of this project are:

1. It is proposed to add to the one-level building of the modernist cinema a superstructure of two spaces in the form of a new system of designed terraces and balconies (large glass-operated boxes) and to create a plastically continuous and transparent space of the interior of the new building, comfortable for studying, research, work to support startups, innovations and creative artistic ideas.

2. The structural independence of the internal volumes, created by architectural means, will allow the construction of a system of exploited roofs, terraces and balconies, transforming the old system of dirty and emergency roofs into a new system of additional design levels accessible from all corners of the building. This architectural technique maximizes and significantly increases the usable volume of the new building, forming a new internal and external public space for the city.

3. The proposed project of architectural renovation of the building of the former cinema «Peremoha» can be used in the development of an architectural and construction project for the reconstruction of the building for the "Center for Creation and Development of Startups" of Chernihiv Polytechnic National University.

### References

1. Haiko, Yu. I. et al. (2021). *Renovatsiia promyslovoi zabudovy ta yii adaptatsiia do suchasnoho miskoho seredovyscha [Renovation of industrial buildings and their adaptation to the modern urban environment]*. KhNUMH im. O. M. Beketova.

2. Kinoteatr «Peremoha» v Chernihovi vidnovyt chyliiskyi arkhitektor Kristian Vittih [Cinema "Peremoga" in Chernihiv to be restored by Chilean architect Christian Wittig]. (2023). <https://www.village.com.ua/village/city/city-news/340249-kinoteatr-peremoga-v-chernigovi-vidnovit-chiliyskiy-arhitektor-kristian-vittig>.

3. Zavatskyi, S.V., Pavlenko, V.V., Kotelchuk, L.S., Knurenko, S.V. (2013). Pro perspektyvy revitalizatsii promyslovoi zony zavodu «Oktyabrs-kyi molot» v m. Chernihiv [About the prospects of revitalization of the industrial zone of the "Oktyabrsky Molot" plant in Chernihiv]. *Novitni dosiahnennia heodezii, heoinformatyky ta zemlevporiadkuvannia – Yevro-peiskii dosvid: zb. nauk. prats – Collection of scientific works of ChDIEU "New achievements of geodesy, geoinformatics and land management - European experience"*, 9, 204-211.

4. Zavatskyi, S.V., Savytskyi, O.O., Hetmanskyi, V.I. (2021). Proiekt funktsionalnoi renovatsii prymishchen budivli kolyshnoho kinoteatru «Peremoha» v m. Chernihovi [The project of functional reconstruction of the building of the former "Peremoga" cinema in Chernihiv]. *Novitni tekhnolohii u naukovii diialnosti i navchalnomu protsesi: zb. tez Vseukr. nauk.-prakt. konf. studentiv, aspirantiv ta molodykh uchenykh – Latest technologies in scientific activity and the educational process: Proceedings of All-Ukrainian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists (Chernihiv, March 18-19, 2021)*. (PP. 81-85). NU «Chernihivska politekhnika».

5. Zavatskyi, S.V., Savytskyi, O.O., Hetmanskyi, V.I. (2021). Funktsionalna renovatsiia prymishchen kinoteatru «Peremoha» v m. Chernihovi [Functional renovation of the premises of the "Peremoga" cinema in Chernihiv]. *Innovatsiini tekhnolohii u budivnytstvi, tsyvilnii inzhenerii ta arkhitekturi : Tezy KhKhI mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii – Innovative technologies in construction, civil engineering and architecture : Proceedings of the XXI international scientific and practical conference (Chernihiv, September 19-22, 2021)* (pp. 161–163). DVNZ PDABA.

6. Zavatskyi, S. V., Savytskyi, O. O., Hetmanskyi, V. I. (2021). Proiektni propozyzii onovlennia dyzainu interieriv prymishchen revitalizovanoho kinoteatru «Peremoha» v Chernihovi [Project proposals for updating the interior design of the premises of the revitalized "Peremoga" cinema in Chernihiv]. *Tekhniko-tekhnolohichni vymir suchasnykh transformatsii: zb. materialiv Vseukrainskoi nauk.-prakt.konf. – Technical and technological dimension of modern transformations: Proceedings of the All-Ukrainian scientific and practical conference (Chernihiv, November 11, 2021)* (pp. 4–7). TOV NVP "Rostok A.V.T."

7. MVRDV. (1993). *Architecture as an interface of reality*. Netherlands.

8. Aravena, A. (1992). *The Facts of Architecture*. Ediciones PUC, Santiago de Chile.

**Список використаних джерел**

1. Реновація промислової забудови та її адаптація до сучасного міського середовища : монографія / Ю. І. Гайко, Є. Ю. Гнатченко, О. В. Завальний, Е. А. Шишкін; за заг. ред. Ю. І. Гайка, Е. А. Шишкіна ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 353 с.

2. Кінотеатр «Перемога» в Чернігові відновить чилійський архітектор Крістіан Віттіг [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.village.com.ua/village/city/city-news/340249-kinoteatr-peremoga-v-chernigovi-vidnovit-chiliyskiy-arhitektor-kristian-vittig>.

3. Про перспективи ревіталізації промислової зони заводу «Октябрський молот» в м. Чернігів / В. В. Павленко, С. В. Завацький, Л. С. Котельчук, С. В. Кнуренко // Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування – Європейській досвід : зб. наук. праць. – Чернігів : ЧДІЕУ, 2013. – С. 54-62.

4. Савицький, О. О. Проект функціональної реновації приміщень будівлі колишнього кінотеатру «Перемога» в м. Чернігові / О. О. Савицький, В. І. Гетьманський ; наук. кер. С. В. Завацький // Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі : зб. тез Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих учених (м. Чернігів, 18-19 берез. 2021 р.) : збірник тез доп. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. – С. 81-85.

5. Завацький, С. В. Функціональна реновація приміщень кінотеатру «Перемога» в м. Чернігові / С. В. Завацький, О. О. Савицький, В. І. Гетьманський / Інноваційні технології у будівництві, цивільній інженерії та архітектурі : Тези XXI міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 19-22 вересня 2021 р.). – Дніпро : ДВНЗ ПДАБА, 2021. – С. 161-163.

6. Завацький, С. В. Проектні пропозиції оновлення дизайну інтер'єрів приміщень ревіталізованого кінотеатру «Перемога» в Чернігові / С. В. Завацький, О. О. Савицький, В. І. Гетьманський // Техніко-технологічний вимір сучасних трансформацій : зб. матер. Всеукраїнської наук.-практ. конф. (Чернігів, 11 листопада 2021 р.). – Суми : ТОВ НВП «Росток А.В.Т.», 2021. – С. 4-7.

7. MVRDV, Architecture as an interface of reality, Netherlands, 1993.

8. Aravena, Alejandro, The Facts of Architecture, Ediciones PUC, Santiago de Chile, 1992.

Отримано 10.06.2024

УДК 725.83:711.168(477.51)

**Крістіан Альфредо Віттіг Грелл<sup>1</sup>, Сергій Володимирович Завацький<sup>2</sup>,  
Олена Віталіївна Савченко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> магістр житла та урбаністики Архітектурної асоціації школи архітектури, Лондон, Великобританія, академік Академії міських досліджень, Лондон, Великобританія, міжнародний консультант з реконструкції міст, зруйнованих стихійними лихами та війнами, Генеральний директор Thought Group Chile (Сантьяго де Чилі, Чилі)

**E-mail:** [cawittig@thought.cl](mailto:cawittig@thought.cl)

<sup>2</sup> кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри архітектури та дизайну середовища

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** [s.zavatski@gmail.com](mailto:s.zavatski@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8307-1554>. **ResearcherID:** [Q-6118-2017](https://orcid.org/0000-0002-8307-1554)

<sup>3</sup> доктор технічних наук, зав. кафедри архітектури та дизайну середовища

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** [e.savchenko@stu.cn.ua](mailto:e.savchenko@stu.cn.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5461-7127>

**ResearcherID:** [G-5911-2014; ABJ-3699-2022; H-1, IGR-5254-2023](https://orcid.org/0000-0001-5461-7127)

**ЦЕНТР СТВОРЕННЯ ТА РОЗВИТКУ СТАРТАПІВ НАЦІОНАЛЬНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»:  
АРХІТЕКТУРНА РЕНОВАЦІЯ БУДІВЛІ КОЛИШНЬОГО  
КІНОТЕАТРУ «ПЕРЕМОГА» В ЧЕРНІГОВІ**

Сучасне містобудування, розробка генпланів розвитку територій вимагають застосування інноваційних стратегічних підходів для ефективного вирішення соціально-економічного та гуманітарного розвитку населених пунктів України у післявоєнний період. Тому розробка проектів, пов'язаних із можливістю реабілітації занедбаних будівель за рахунок нових пропозицій щодо покращення зовнішньої та внутрішньої архітектури будівлі та переосмислення її планування на сьогодні є актуальними.



Аналіз досліджень і публікацій щодо питань функціональної реновації внутрішніх приміщень модерністської будівлі кінотеатру «Перемога» засвідчив, що запропоновані проєктні пропозиції не вирішують основну проблему будівлі, об'єктивно пов'язану з особливостями архітектури та об'ємно-планувальних рішень колишніх радянських кінотеатрів. По-перше, будівлю побудовано на одному рівні, і вона має велику надземну територію. По-друге, внутрішнє планування будівлі структуровано за допомогою системи внутрішніх несучих стін, які розділяють усі її приміщення та перешкоджають проникненню природного світла.

Метою статті є розробка концептуальних проєктних пропозицій щодо архітектурної реновації будівлі колишнього кінотеатру «Перемога» та створення на його базі нового науково-мистецького Центру створення та розвитку стартапів Національного університету «Чернігівська політехніка» для студентів та мешканців міста.

На основі сучасних архітектурних та урбаністичних уявлень виконано системний аналіз об'ємно-просторових рішень старої будівлі кінотеатру та створено архітектурно-концептуальні образи нового проєкту.

Сформульовано стратегії архітектурної реновації екстер'єру та інтер'єру будівлі нового центру. Наведено плани метрії архітектурних концептуальних пропозицій щодо розкриття простору трьох глядацьких залів кінотеатру за рахунок надбудови великих скляних експлуатованих боксів і системи спроектованих терас і балконів. Запропоновано проєкт перепланування громадської площі з облаштуванням заглибленого літнього театру та підземним укриттям.

Представлені матеріали щодо архітектурної реновації будівлі колишнього кінотеатру «Перемога» можуть бути використані при розробці архітектурно-будівельного проєкту реконструкції споруди під «Центр створення та розвитку стартапів» Національного університету «Чернігівська політехніка».

**Ключові слова:** архітектурна реновація; функціональна реновація; кінотеатр «Перемога»; Чернігів, архітектурно-будівельна реконструкція; Центр створення та розвитку стартапів Національного університету «Чернігівська політехніка».

Рис.: 9. Бібл.: 8.

**ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ  
НАУКОВИХ СТАТЕЙ ДО НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ  
«ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**

**Шановні дописувачі!**

Для подання статті необхідно спочатку надіслати статтю та інформацію про автора, з яким контактувати щодо публікації статті, оформлені за встановленими вимогами, для попереднього розгляду редакційною колегією журналу «Технічні науки та технології». За умови відповідності статті спеціальностям, за якими акредитовано журнал, відповідності нормам академічної доброчесності за результатами перевірки на плагіат, позитивної незалежної рецензії від призначеного редакційною колегією рецензента, стаття розміщується в макеті журналу.

Редакційна колегія забезпечує розгляд та незалежне рецензування поданих до публікації матеріалів вченими, які мають науковий ступінь та здійснюють дослідження за спеціальністю, що відповідає тематиці поданого для публікації матеріалу, і є авторами (спів-авторами) загальною кількістю не менше трьох публікацій у наукових виданнях, включених до категорії «А» та/або категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, та/або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus за відповідною спеціальністю, оприлюднених упродовж останніх п'яти років.

Опублікування наукових статей у журналі «Технічні науки та технології» є платним. Вартість публікації наукової статті становить:

- **80 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам потрібна паперова версія журналу);
- **60 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам достатньо електронної версії журналу).

Остаточна вартість публікації формується після готовності електронного макету журналу та повідомляється автору, відповідальному за публікацію статті. Оплата підтверджується квитанцією.

***УМОВИ ПУБЛІКАЦІЇ, ВИМОГИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ, РЕКВІЗИТИ  
ОПЛАТИ ТА ОСТАННІ НОМЕРИ НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ  
ТА ТЕХНОЛОГІЇ» РОЗМІЩЕНО НА САЙТІ»: <http://tst.stu.cn.ua/>***

**Контактна інформація:**

Мороз Наталія Вікторівна

Тел.: (0462) 665-225

E-mail: [tst.technical.sj@gmail.com](mailto:tst.technical.sj@gmail.com)

**Відповідальність за матеріали, наведені у статті, несе автор.  
Неправильно оформлені автором стаття та супровідні документи,  
що не відповідають зазначеним вимогам, розглядатися не будуть.**

*Редакція розглядає надходження публікації та супровідних документів  
як згоду дописувача (ів) щодо передачі авторського права на використання твору  
(тиражування, розповсюдження тощо).*

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

# ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

*НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ*

*№ 2(36)*

Відповідальний за випуск  
Технічний редактор, відповідальна за випуск  
Редактор  
Комп'ютерна верстка

С. П. Сапон  
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 02.07.2024. Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. – 40,0.  
Тираж 100 пр. Замовлення № 17/24.

---

Редакційно-видавничий відділ  
Національного університету «Чернігівська політехніка»  
14035, 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.