

Олексій Разживін¹, Анастасія Люта², Олег Марков³, Герман Єрмакін⁴

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів
Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)

E-mail: avrazhivin75@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1371-2651>. **Scopus Author ID:** [57672166200](https://orcid.org/0000-0002-1371-2651)

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів
Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)

E-mail: asyalyutaya@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9606-875X>. **Scopus Author ID:** [57205585546](https://orcid.org/0000-0002-9606-875X)

³доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів
Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)

E-mail: oleg.markov.umd@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9377-9866>

ResearcherID: [L-6561-2018](https://orcid.org/0000-0001-9377-9866). **Scopus Author ID:** [55648046800](https://orcid.org/0000-0001-9377-9866)

⁴магістр кафедри автоматизації виробничих процесів

Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)

E-mail: german20124422@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-4461-6120>

**СИНТЕЗ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРИ
ПАСТЕРИЗАЦІЇ МОЛОКА**

У статті вирішено актуальне науково-технічне завдання зниження енергоємності пастеризації молока в апараті ПОУ5 шляхом дослідження та розробки автоматизованої системи керування температурним режимом пастеризації. Проведено дослідження особливостей функціонування апарата. За результатами досліджень визначено параметри процесу керування; здійснено удосконалення математичної моделі й алгоритму регулювання параметрів пастеризації молока; створено автоматизовану систему керування температурою пастеризації молока в установці ПОУ5. Проведено синтез нечіткого регулятора температури пастеризації молока. Побудована поверхня відгуку зміни температури молока залежно від витрати молока на пастеризацію і температури гарячої води теплообмінника.

Ключові слова: нечіткий регулятор; пастеризація молока; автоматизована система; математична модель.

Рис.: 5. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. У процесі аналізу принципів побудови адаптивних систем автоматичного управління (САУ) виявлено труднощі, що виникають при вирішенні завдань синтезу таких систем [1]. Однією з них є вибір методу налаштування параметрів керуючих пристроїв. Вона може бути здійснена за допомогою наявних методів тільки в окремих випадках. Наявність блоку ідентифікації динаміки об'єкта управління та оцінка змінних стану ускладнюють структуру САУ. Крім того, похибка ідентифікації погіршує якість управління, а в деяких випадках призводить до нестійкого режиму роботи САУ. Вирішення вищенаведених труднощів можливо шляхом застосування апарата нечіткої логіки для побудови адаптивних систем. Використання апарата нечіткої логіки пов'язано з формалізацією неточних, розмитих у смисловому плані суджень і узагальнених категорій, які задають класифікацію вихідних понять на рівні нечітких множин, що дуже важливо при управлінні об'єктами, опис яких відомо неточно. Це дає можливість створювати адаптивні системи з оптимальним керуванням для апроксимації вихідної змінної нечіткого регулятора [1, 2].

Постановка проблеми. Сучасне молочне виробництво – це масштабне виробництво, яке має у своєму складі, у багатьох випадках, кілька десятків пастеризаторів. При традиційних системах управління з децентралізованим контролем обслуговування такої кількості установок потрібен великий штат оперативного персоналу. При керуванні пастеризаційною установкою необхідно із заданою точністю підтримувати температуру в секції пастеризації. Проте контролювати тільки температуру виявляється недостатньо, тому що на більшості підприємств підігрів йде за допомогою пари від парогенераторів, а величина його тиску не постійна, що вносить додаткове обурення. До того ж інерційність процесу різна для різних видів продукту (вершки, молоко та ін.), а отже, після налаштування системи управління на один продукт виникне потреба в її переналаштуванні на інший [1].

У таких умовах виникає потреба в побудові системи управління установки для пастеризації молока, що забезпечує виготовлення кінцевого продукту із заданими якісними показниками за різних умов реальної роботи.

У зв'язку з викладеними особливостями процесу пастеризації молока, дослідження спрямоване на розробку нових методів підтримки заданого значення температури пастеризації з метою підвищення якості питного молока та є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [3] проведено дослідження ефективності методів управління споживанням теплової енергії, авторами визначено, що підвищення якості пастеризації з використанням теплообмінних апаратів можливе тільки за наявності математичних моделей об'єктів керування. Авторами роботи зазначено, що для теплообмінників, які нині широко використовуються в системах пастеризації молока, застосовна модель «витіснення – витіснення».

У роботі [4] зазначено, що впровадження сучасних засобів автоматизації сприяє оптимізації витрат на споживану теплову енергію, а також витрат на експлуатацію систем теплообміну. Подача тепла і його споживання – це місткі й інформативні параметри, що лежать в основі теплотехнічних і економічних розрахунків.

Авторами [5] визначено, що з урахуванням реальних умов роботи, усі істотні фактори, що впливають на процес теплообміну, поділяються на такі групи:

1. Збурення, які можна виміряти, але неможливо або неприпустимо стабілізувати (витрата живлення, що безпосередньо подається до апарату; температура навколишнього середовища тощо). Для досліджуваного процесу такими збуреннями є: температура теплоносія, а також температура та витрата потоку молока на вході в апарат.

2. Збурення, які неможливо або недоцільно вимірювати безпосередньо (падіння активності каталізатора, зміна коефіцієнтів тепло- та масопередачі тощо). У ролі таких у такому об'єкті може виступати накип, що утворюється на поверхні трубок всередині теплообмінника, а також тиск теплоносія в рекуператорі.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. З метою підвищення якості пастеризації молока доцільно обирати тільки регульовані координати. При побудові замкнених систем регулювання треба обрати технологічні параметри, зміна яких свідчить про порушення матеріального або теплового балансу в апараті. До них належать температури теплоносіїв. При побудові САР температурою пастеризації молока необхідно враховувати керуючі змінні – вхідні сигнали об'єкта управління, за допомогою яких можна впливати на режим роботи об'єкта. Такими параметрами є витрата молока на пастеризацію і температура гарячої води теплообмінника. Відповідно до вищевикладеного, потрібно побудувати математичну модель, яка дозволить досліджувати можливості застосування регулятора, що забезпечить автоматичне керування температурою пастеризації відповідно до температурного графіка.

Мета дослідження полягає в покращенні якості управління процесом пастеризації молока шляхом розробки синтезу нечіткого регулятора температури для реалізації алгоритму функціонування контуру пастеризації, яка включає розробку моделі управління об'єктом і структури регулятора для цього об'єкта.

Виклад основного матеріалу. Імітаційна модель управління об'єктом, формалізована у вигляді правил, які мають опис:

- якщо зменшити подачу теплоносія в теплообмінник, тоді температура пастеризації (T_2) буде зменшуватися;

- якщо збільшити подачу теплоносія в теплообмінник, тоді T_2 буде зростати.

Регулювання пастеризації молока реалізуємо на базі алгоритму нечіткого управління Мамдані. На підставі експериментальних даних і експертних оцінок отримано такі лінгвістичні змінні (параметри) об'єкта управління:

1. Абсолютне значення температури $T_2(t)$ у момент часу t , яке характеризується набором лінгвістичних змінних: «висока», «нормальна», «низька»; функції належності $\mu(T_2)$ нечітким множинам «висока», «нормальна», «низька», описується лінійними рівняннями виду $y = kx + b$:

$$\mu(T_2) = \sup_{x_1, \dots, x_n \in x} \{ \mu_{B^k}(y) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i'}(x_i) \mu_{A_i^k}(x_i) \}. \quad (1)$$

2. Відносна зміна температури ΔT_2 за час t_0 (такт алгоритму розрахунку) визначається набором лінгвістичних змінних: "збільшується", "зменшується".

Процес фазифікації полягає у встановленні відповідності між значеннями, що вимірюються $T_2(t)$, $\Delta T_2(t)$ та нечіткими множинами $\mu(T_2)$, $\mu(\Delta T_2)$, тобто в обчисленні відповідних коефіцієнтів функції приналежності.

Для управління $U(t)$ в момент часу t обчислюються лінгвістичні змінні «відкрити», «закрити». Набір основних правил роботи нечіткого регулятора наведено на рис. 1.

	Входи		Вихід
Правило 1			
Правило 2			
Правило 3			
Правило 4			

Рис. 1. Набір правил роботи нечіткого регулятора температурою пастеризації

Процес нечіткого вводу полягає у встановленні відповідних нечітких множин для управління $U(t)$ (коефіцієнтів приналежності) при відомих значеннях функції приналежності $\mu(T_2)$, $\mu(\Delta T_2)$. Алгоритм управління формалізується у вигляді такого набору правил:

- якщо T_2 – «низка», тоді U1 – «відкрити»;
- T_2 – «висока», тоді U1 – «зачинити»;
- ΔT_2 – «збільшується», тоді U2 – «закрити»;
- ΔT_2 – «зменшується», тоді U2 – «відкрити».

Параметром регулювання є температура пастеризації молока $T_2 = 76$ °С. Допустимий діапазон зміни температури T_2 становить від 72 до 78 °С.

Опишемо блок фазифікації. Застосуємо операцію типу Синглетон [6; 7]:

$$A(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x = \bar{x}, \\ 0, & \text{якщо } x \neq \bar{x}. \end{cases} \quad (2)$$

Зауважимо, що супремум у формулі (1) досягається тільки в тому випадку, коли $x = \bar{x}$, тобто для $\mu_{A_i}(x) = 1$. При цьому вираз (1) набирає вигляду:

$$\mu(T_2) = \{ \mu_{B^k}(y) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(\bar{x}_i) \}. \quad (3)$$

Опишемо блок дефазифікації за методом center average defuzzification [1,8]:

$$U(t) = \frac{\sum_{k=1}^N y^{-k} \mu_{B^{-k}}(y^{-k})}{\sum_{k=1}^N \mu_{B^{-k}}(y^{-k})}. \tag{4}$$

У наведеній формулі $U(t)$ – це центр (center) нечіткої множини T_2 , тобто точка, у якій $\mu(T_2)$ досягає максимального значення

$$\mu(T_2^{-k}) = \max_y \{ \mu(\cdot) \}. \tag{5}$$

При підстановці виразу (3) в формулу (4) отримуємо рівняння:

$$U(t) = \frac{\sum_{k=1}^N y^{-k} \left(\mu(T_2) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(x_i) \right)}{\sum_{k=1}^N \left(\mu(T_2) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(x_i) \right)}. \tag{6}$$

Якщо врахувати, що максимальне значення, яке можна отримати в точці y^{-k} , дорівнює 1, тобто. $\mu(T_2) = 1$, то формула (6) приймає вид

$$U(t) = \frac{\sum_{k=1}^N y^{-k} \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(x_i) \right)}{\sum_{k=1}^N \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(x_i) \right)}. \tag{7}$$

Процес проектування модуля нечіткого управління завершується визначенням форми подання нечітких множин A_i^k , $i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, N$. Як форма нечітких множин застосована функція Гаусса:

$$\mu_{A_i^k}(x_i) = \exp \left[- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^k}{\sigma_i^k} \right)^2 \right], \tag{8}$$

де \bar{x}_i^k та σ_i^k – параметри, які мають фізичну інтерпретацію; \bar{x}_i^k – центр; σ_i^k – ширина кривою Гаусса.

Математичний опис проектованого модуля нечіткого управління може бути отримано шляхом об'єднання методу дефазифікації (7), функції належності (1) і блоку фазифікації з операцією типу Синглетон (2), а також з гауссівською функцією приналежності (8). Тоді модуль нечіткого управління набуває остаточного вигляду:

$$U(t) = \frac{\sum_{k=1}^N y^{-k} \left(\prod_{i=1}^n \exp \left[- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^k}{\sigma_i^k} \right)^2 \right] \right)}{\sum_{k=1}^N \left(\prod_{i=1}^n \exp \left[- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^k}{\sigma_i^k} \right)^2 \right] \right)}. \tag{9}$$

Необхідно відзначити, що процеси, які відбуваються в математичній моделі теплообмінного апарата, мають розподілений характер, а реалізоване зосереджене нечітке управління дає можливість оптимізувати роботу системи управління. З використанням математичного опису модуля нечіткого управління в додатку Anfis MatLab FuzzyLogicToolbox [9; 10] розроблено структурну схему реалізації модуля нечіткого управління теплообмінного апарата, яка зображена на рисунку 2.

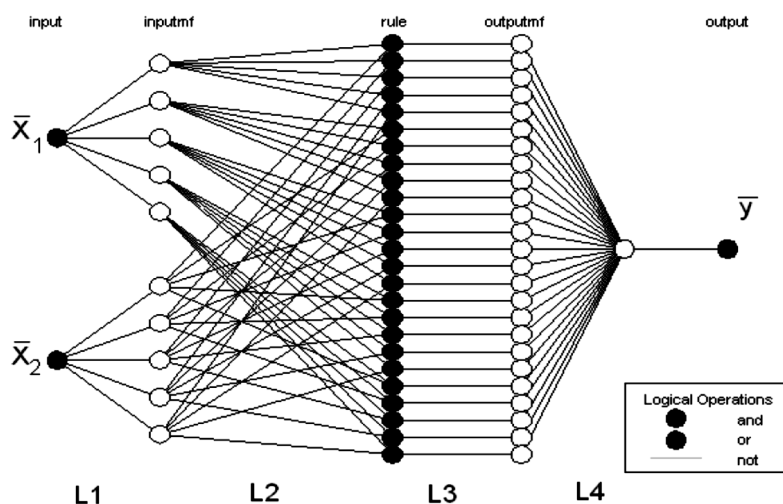


Рис. 2. Структурна схема модуля нечіткого управління

На рисунку 2 наведено модуль управління з двома входами ($n = 2$). Шари позначені символами від L1 до L4. Елементи шару L1 реалізують функцію Гаусса з параметрами \bar{X}_i^k та σ_i^k . У поданій структурі виділено чотири шари.

Подана структура нечіткої нейронної мережі (див. рис. 2) є багатошаровою мережею. У зв'язку з цим доцільно для навчання цієї мережі застосувати алгоритм зворотного поширення помилки. Для цього використана навчальна вибірка у вигляді пар (\bar{x}, d) , де $\bar{x} = [\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n]$ – це вхідний вектор, а d – еталонний сигнал. Завдання навчання полягає в такій модифікації (корекції) параметрів модуля нечіткого управління, описаного виразом (9), щоб міра похибки, що задається виразом [6-9] була мінімальною:

$$e = \frac{1}{2} [\bar{y}(\bar{x}) - d]^2. \tag{10}$$

Після навчання модуля нечіткого управління відповідно до розробленого алгоритму навчання проведено його моделювання засобами MatLab [1; 2]. Метою моделювання було визначення здатності модуля до навчання при зміні технологічних параметрів пастеризації (об'ємної витрати та швидкості нагріву). Результатами моделювання є поверхні зміни керуючого сигналу на витрату молока на виході з насоса, температури теплоносія та молока (див. рис. 3).

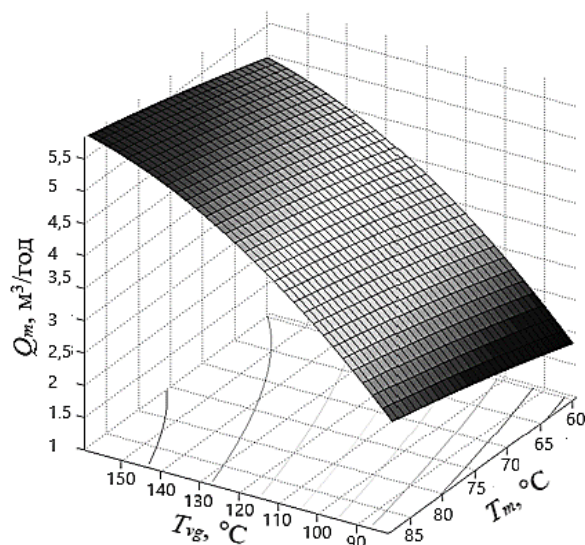


Рис. 3. Поверхня відгуку зміни температури молока залежно від витрати молока на пастеризацію і температури гарячої води теплообмінника

Модель теплообмінного апарату, реалізована в програмі MatLAB, була використана в процесі моделювання контурів стабілізації температури пастеризації молока з урахуванням паралельно працюючих теплообмінників з гарячою водою. Модель контуру стабілізації (див. рис. 4) була побудована таким чином, щоб забезпечити подачу молока без втрат. Управління температурою пастеризації молока в контурі теплообміну здійснюється за допомогою нечіткого регулятора (НР), результати роботи якого представлені на рис. 5.

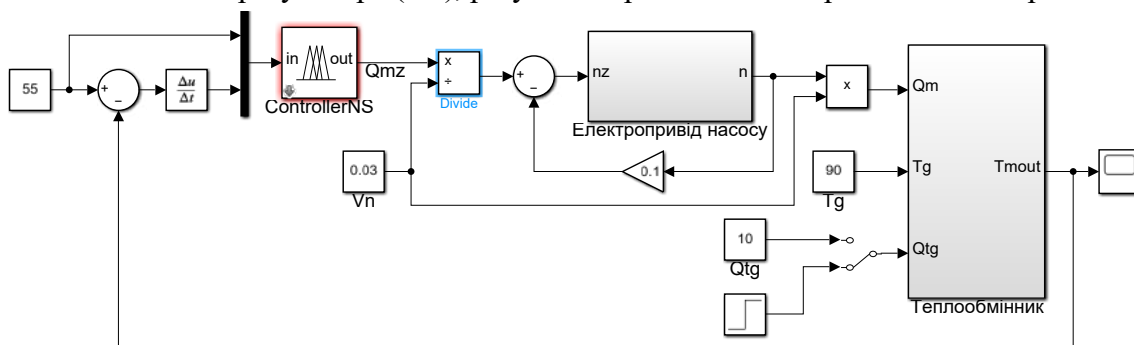


Рис. 4. Математична модель контуру управління температурою пастеризації молока

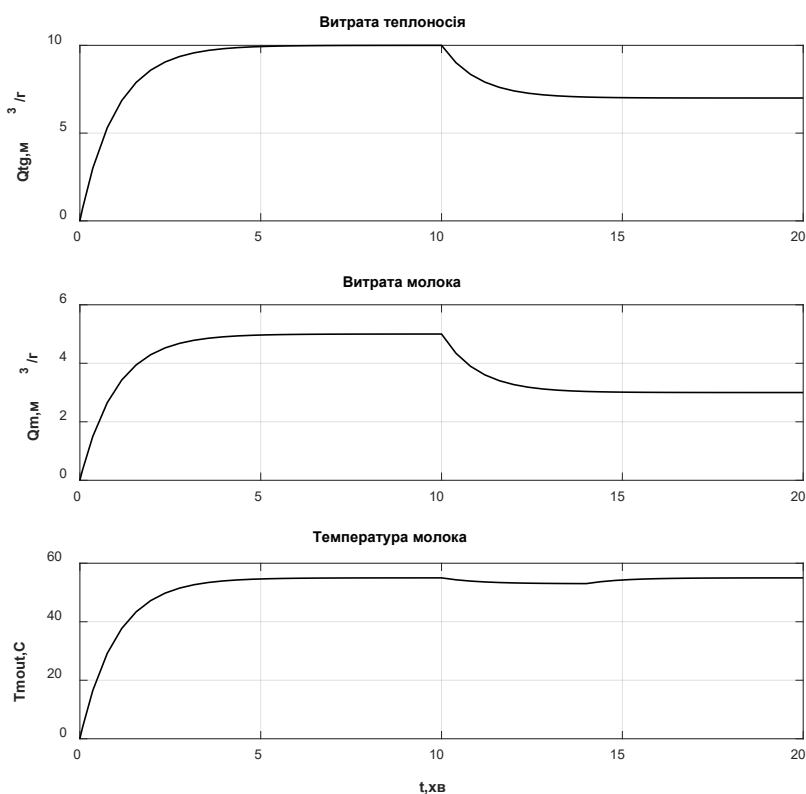


Рис. 5. Графік перехідних процесів за витратою теплоносія, молока та зміни температури в контурі пастеризації при НР

При математичному моделюванні проведена імітація виробничого випадку, коли до рекуператорів пастеризатора зменшується подача теплоносія Q_{tg} . Для компенсації даного збурення НР формує керуючий сигнал на зниження витрати молока Q_m до контуру пастеризації з метою компенсації зменшення температури пастеризації молока T_{mout} . Згідно з модельними графіками перехідного процесу за температурою пастеризації (див. рис. 5) час відпрацювання зовнішнього збурення дорівнює 5 хв, а перепад температури – менше ніж 3°C . Модельний перепад стабілізації температурного режиму відповідає технологічним вимогам процесу пастеризації, і, як наслідок, дозволяє покращити якість та термін зберігання кінцевого продукту.

Висновки. Аналіз отриманих результатів дослідження показав, що розроблена математична модель САУ може застосовуватися в контурах регулювання температури пастеризацією молока, а також при виконанні дослідних і проєктних робіт із реконструкції систем пастеризації.

Створена структурна схема пастеризатора молока, а також розроблені ефективні способи керування температурою і параметричними схемами секцій (рекуперації, пастеризації і охолодження пластинчастого пастеризатора молока), що дозволяють покращити точність управління технологічним процесом.

У результаті проведення теоретичних досліджень отримана динамічна характеристика секції пастеризації за каналом «витрата гарячої води - температура пастеризованого молока». Зазначена модель дозволить розробити алгоритми керування температурним режимом для збільшення продуктивності пастеризатора.

Список використаних джерел

1. Kim P. *MATLAB Deep Learning With Machine Learning, Neural Networks and Artificial Intelligence* / Phil Kim. – Seoul, Soul-t`ukpyolsi, Korea (Republic of), 2017. – 149 p.
2. Gilat, A. *MATLAB An Introduction with Applications [Electronic resource]* / A. Gilat. – Wiley, 2016. – 416 p. – Access mode: <https://www.perlego.com/book/3866166/matlab-an-introduction-with-applications-pdf>.
3. Єресько Г. О. Технологічне обладнання молочних виробництв / Г. О. Єресько, М. М. Шинкарик, В. Я. Ворошук – Київ : Фірма „ІНКОС”, Центр навчальної літератури, 2007. – 344 с.
4. Інтенсифікація та моделювання технологічних об'єктів / В. Лисенко, Є. Чернишенко, В. Решетюк, В. Мірошник, Н. Заєць, І. Цигульов. – Київ : АграрМедіаГруп, 2016. – 476 с.
5. Rutkowska D. *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne I systemy rozmyte* / D. Rutkowska, M. Pilinski, L. Rutkowska. – Warszawa : Wydawnicywo Naukowe PWN, 1997. – 452 с.
6. Yager R. Ranking fuzzy numbers using α -weighted valuations / R. Yager, M. Detyniecki // *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-based Systems*. – 2000. – № 8. – Pp. 573-591.
7. Wang X. Reasonable properties for the ordering of fuzzy quantities (I), (II) / X. Wang, E. E. Kerre // *Fuzzy Sets and Systems*. – 2001. – № 122. – Pp. 375-385, 387-405.
8. Ohnishi T. A self-learning fuzzy control system for an urban refuse incineration plant / T. Ohnishi // *Japanese Journal of Fuzzy Theory an Systems*. – 1991. – Vol. 3, № 2. – Pp. 187-200.
9. Ivanets S. A. Fuzzy Logic Custom Instruction Set for NIOS II Processor / S. A. Ivanets, A. P. Fesenko, O. M. Fesiuk // *II International Scientific and Practical Conference Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs (MC&FPGA)*. – Kharkiv, 2020. – Pp. 36-38. DOI: 10.35598/mcfpga.2020.011.

References

1. Phil Kim. (2017). *MATLAB Deep Learning With Machine Learning, Neural Networks and Artificial Intelligence*. Seoul, Soul-t`ukpyolsi, Korea (Republic of).
2. Gilat, A. (2016). *MATLAB (6th ed.)*. Wiley. <https://www.perlego.com/book/3866166/matlab-an-introduction-with-applications-pdf> (Original work published 2016).
3. Yeresko, G.O., Shinkaryk, M.M., & Voroshchuk, V.Ya. (2007). *Technological equipment of dairy production*. INKOS» firm, educational literature center.
4. Lysenko, V., Chernyshenko, E., Reshetyuk, V., Miroshnyk, V., Zayets, N., & Tsygulyov, I. (2016). *Intensification and modeling of technological objects*. AgrarMediaGroup.
5. Rutkowska, D., Pilinski, M., & Rutkowska, L. (1997). *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne I systemy rozmyte*. Wydawnicywo Naukowe PWN.
6. Yager, R., & Detyniecki, M. (2000). Ranking fuzzy numbers using α -weighted valuations. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-based Systems*, 8, 573-591.
7. Wang, X., & Kerre, E.E. (2001). Reasonable properties for the ordering of fuzzy quantities (I), (II). *Fuzzy Sets and Systems*, 122, 375-385, 387-405.
8. Ohnishi, T. (1991). A self-learning fuzzy control system for an urban refuse incineration plant. *Japanese Journal of Fuzzy Theory an Systems*, 3(2), 187-200.
9. Ivanets, S.A., Fesenko, A.P., & Fesiuk, O.M. (2020). Fuzzy Logic Custom Instruction Set for NIOS II Processor. *II International Scientific and Practical Conference Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs (MC&FPGA)* (pp. 36-38). 10.35598/mcfpga.2020.011.

Отримано 12.06.23

Oleksii Razzhyvin¹, Anastasiia Liuta², Oleg Markov³, German Yermakin⁴

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Automation of Industrial Processes Department
Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)

E-mail: avrazhivin75@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1371-2651>. **Scopus Author ID:** [57672166200](https://orcid.org/0000-0002-1371-2651)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Automation of Industrial Processes Department
Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)

E-mail: asyalyutaya@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9606-875X>. **Scopus Author ID:** [57205585546](https://orcid.org/0000-0002-9606-875X)

³Doctor of Technical Science, Professor of the Automation of Industrial Processes Department
Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)

E-mail: oleg.markov.ond@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9377-9866>

ResearcherID: [L-6561-2018](https://orcid.org/0000-0001-9377-9866). **Scopus Author ID:** [55648046800](https://orcid.org/0000-0001-9377-9866)

⁴master of the Automation of Industrial Processes Department
Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)

E-mail: german20124422@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-4461-6120>

SYNTHESIS OF FUZZY-REGULATOR OF MILK PASTEURIZATION TEMPERATURE

The article solves the actual scientific and technical task of reducing the energy intensity of pasteurization of milk in the POU5 apparatus by means of research and development of an automated system for controlling the pasteurization temperature regime. A study of the features of the device's functioning, setting the parameters of the control process was carried out; the improvement of the mathematical model and the algorithm for regulating milk pasteurization parameters was carried out; an automated system for controlling the temperature of milk pasteurization in the POU5 installation was created. The synthesis of a fuzzy regulator of milk pasteurization temperature was carried out. Constructed response surface of milk temperature changes depending on the consumption of milk for pasteurization and the temperature of the hot water of the heat exchanger. The application of the fuzzy logic apparatus for building an adaptive system makes it possible to create adaptive systems with optimal control for the purpose of approximating the output variable of the fuzzy controller.

A structural scheme of the milk pasteurizer was created, as well as effective methods of temperature control and parametric schemes of sections (recovery, pasteurization and cooling of the plate milk pasteurizer) were developed, which allow improving the accuracy of technological process control.

As a result of conducting theoretical research, a dynamic characteristic of the pasteurization section was obtained according to the channel «hot water consumption - temperature of pasteurized milk». The specified model will allow to develop temperature control algorithms to increase pasteurizer productivity/

Key words: fuzzy controller; pasteurization of milk; automated system; mathematical model.

Fig.: 5. References: 9.

Ольга Васильєва

аспірантка

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: olga.vasiljeva37@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8263-782X>

МОДЕЛІ ВИЯВЛЕННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ДИНАМІКИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ОПЕРАЦІЙ У СОЦІАЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

У статті розглянуто деякі положення проведення інформаційні операції, як одна з головних загроз національній безпеці в інформаційній сфері, продемонстровано використання соціальних мереж як основного поля для їх проведення завдяки новітнім технологіям, проведено аналіз запропонованих моделей інформаційних операцій у соціальних мережах.

Стаття присвячена проблемі комплексного застосування теоретичних моделей, які використовуються для дослідження «вірусного» поширення інформації в соціальних мережах кіберпростору. Проаналізовано формальне моделювання, яке застосовується до вивчення особливостей комунікації в соціальних мережах. Виділено три складові формальних моделей поширення онлайн-повідомлень у соціальних мережах: типологія повідомлень, мережева модель, формальна модель поширення сигналів. Особливо увага приділена можливостям застосування нелінійних моделей поширення інформації.

Ключові слова: моделювання; інформаційні операції; національна безпека в інформаційній сфері; соціальні мережі; динамічне середовище.

Рис.: 4. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. В умовах сьогодення Україна, прагнучи забезпечити та зберегти державний суверенітет, має приділяти увагу не лише таким складовим державної безпеки, як військова, економічна чи дипломатична, а також значною мірою інформаційній, особливо в контексті організації протидії інформаційній війні, яку веде агресор не лише проти нашої держави, а й в глобальному інформаційному просторі проти світових демократій.

Постановка проблеми. Росія організовує та проводить у межах інформаційної війни масштабні інформаційні кампанії, пропагандистську діяльність, займається поширенням фейків на стратегічному рівні з метою руйнування цінностей та потенціалу інших держав, заміни їх власними та прагне до підпорядкування їхніх ресурсів для використання у своїх інтересах. Цілком очевидно, що інформаційна складова війни є не менш небезпечною для нашої країни, ніж військова.

Можемо стверджувати, що одним з основних полів здійснення інформаційних впливів сьогодні є соціальні мережі в кіберпросторі. І причиною цього став стрімкий розвиток інформаційних технологій, візуалізація та глобалізація медіасистем, виникнення новітніх комунікативних моделей і розширення інтерактивних аудиторних рецепцій. Активізація інформаційних процесів вплинула також на систему стратегічних комунікацій суспільства, у якій провідна роль відводиться комунікативній складовій. Соціальні медіа нині дозволяють аудиторії набувати таких ознак як, мобільність, персоніфікація, інтерактивність. Вони перетворилися на домінуючий канал поширення інформації та комунікації громадян у віртуальному просторі. Саме соціальні мережі надають користувачам засоби для обміну контентом різного типу, утворення зв'язків з іншими користувачами, саморозвитку, об'єднання у віртуальні спільноти за спільними інтересами тощо.

Ці чинники створюють нагальну потребу у вивченні нової медійної реальності як на теоретичному, так і на емпіричному рівнях. Проте більшість наукових досліджень мають дескриптивний характер і спрямовані на вдосконалення нормативно-правового регулювання інформаційного простору мережі Інтернет, призначені для вирішення окремих часткових завдань забезпечення інформаційної безпеки, не враховують особливості процесів соціальної комунікації користувачів у віртуальних спільнотах та функціонування соціальних мереж [1].

Саме для того, щоб діяти на випередження, бути в змозі своєчасно виявляти та нейтралізувати інформаційні операції супротивника, а також ефективно планувати власні, пропонується розглянути такий алгоритм як імітаційне моделювання, яке активно застосовується для динамічних систем та соціальних процесів, до яких можемо віднести й інформаційні операції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження останніх публікацій показало, що проблеми виявлення та організації протидії інформаційним операціям як загрози інформаційної безпеки держави, а також проблема ефективного планування власних наступальних інформаційних операцій є досить актуальною як у практичному досвіді, так і в наукових колах. Так, до питання вирішення завдання аналізу та виявлення інформаційного впливу в соціальних мережах на основі мультиагентних моделей поширення інформації зверталися такі науковці, як Д. В. Ланде та В. О. Дадонов. До питання моделювання інформаційних операцій зверталися О. С. Улічев, Ю. В. Наконечна, А. Б. Качинський. Науковець К. Молодецька-Гринчук дослідила методи оцінювання ознак загроз інформаційній безпеці держави в соціальних медіа. Методи моделювання інформаційних операцій досліджували також В. П. Горбулін, О. Г. Додонов та Д. В. Ланде.

Якщо ми говоримо про моделювання інформаційних операцій, яке може бути застосоване не стільки для виявлення, більшість науковців погоджуються, наприклад, із запропонованим Д. В. Ланде лінійно-статистичним методом для виявлення інформаційних операцій на основі кількісного аналізу контенту в інформаційному полі. Цей метод може бути застосований, якщо говорити про інформаційні операції, організовані в класичних електронних ЗМІ. При цьому самі автори погоджуються з тим, що виявлення відбувається вже на пізніх стадіях, коли організація ефективної протидії або нівелювання не є можливими. Запропоновані в роботах деяких науковців методи виявлення інформаційних операцій засновані на семантичному підході до оцінки повідомлень. Вони мають високу повноту і точність виявлення впливів, але виконуються за участю експертів і практично не можуть бути автоматизовані.

скільки для планування та організації власних інформаційних операцій з метою вироблення критеріїв ефективності, запропоновані методи моделювання базуються на кількісних та якісних оцінках саме інформації. Автор даної статті пропонує розглянути моделювання інформаційних операцій в соціальних мережах з точки зору саме механізму розповсюдження контенту.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що попри великий спектр наукових праць, на сьогодні не існує універсального та загальноприйнятого підходу ні до виявлення, ні до моделювання інформаційних операцій.

Метою статті аналіз запропонованих моделей інформаційних операцій, які проводяться в соціальних мережах.

Виклад основного матеріалу. Інформаційні операції не є принципово новим явищем, по суті, вони використовувались протягом історії людства повсякчас. Однак сьогодні це поняття як і його суть стали більш значущими. Що ж змінилось?

Змінилися основні методи та прийоми, вони отримали наукове обґрунтування, на цьому фоні виникають наукові дисципліни про управління поведінкою людини та спільнот – соціологія, психоаналіз, теорія реклами, сугестологія, нейролінгвістичне програмування, контент-аналіз.

Також виникають принципово нові електронні засоби масової інформації. Це не лише традиційні новинні сайти, а також соціальні мережі та мобільні месенджери, які використовують новітні технології поширення та популяризації різних типів контенту, алгоритми видачі контенту та його пріоритезації з урахуванням індивідуальних характеристик користувачів, що сприяє поширенню контенту, який спрямований на визначені аудиторії та активно використовується в інформаційних операціях, а також створює сегрегації суспільства [2].

Усе це є достатньо новим з погляду побудови алгоритмів управління соціумом, а також підтверджує теорію про те, що інформаційна зброя – це насамперед алгоритм.

У соціальних системах, серед багатьох інших характеристик, найбільше чітко проявляється цілісність, тобто наявність таких властивостей, які не притаманні жодному елементу, що складають систему, узятому окремо. Ця властивість, яку називають «емерджентністю», є результатом виникнення між елементами системи особливих синергетичних зв'язків. Під терміном «емерджентність», уперше введеному в науковий ужиток Дж. Г. Льюїсом, розуміється те, що у фізичних системах ціле є найчастіше більшим, ніж сума частин, тобто на кожному рівні складності виникають нові, часто непередбачені якості, які не властиві окремим складовим. Емерджентність соціальної системи не дає можливості обмежитися вивченням її елементів і зв'язків між ними, а припускає цілісний аналіз усієї системи [3].

Переможцем в інформаційному протистоянні двох інформаційних систем стає та сторона, яка в змозі більш повно промодельовувати поведінку супротивника в різних ситуаціях, а також визначити свій власний алгоритм поведінки та реалізувати його.

Саме тому завданням даної публікації є підхід до інформаційних операцій не з точки зору аналізу власне інформації, а з точки зору процесів її поширення (динаміку та топологію розповсюдження контенту) в інформаційному середовищі.

Типова динаміка розповсюдження контенту при інформаційній операції, до якої звертаються більшість наукових праць, виглядає наступним чином: сплеск, хвилі із періодом зростання та затухання. Так Д. Ланде пропонує такий типовий варіант кривої: «фонові публікації» - «затухання» - «артпідготовка» - «затухання» - «атака».

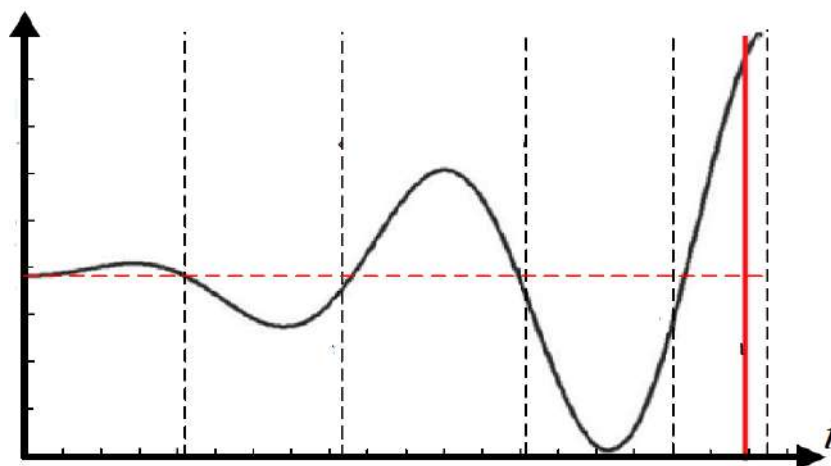


Рис. 1 Типова динаміка інформаційних потоків

При цьому, звичайно, слід брати до уваги тематику інформаційної операції, чи є вона новою в інформаційному полі, чи фігурує постійно, а також враховувати арену, де саме відбувається поширення.

Такий шаблон може використовуватись для виявлення інформаційних операцій як шляхом аналізу ретроспективи інформаційного простору, так і шляхом оперативного моніторингу в режимі реального часу (за наявності високотехнологічних моніторингових систем). Ця модель є простою в реалізації, але при цьому розпізнавання інформаційної операції відбувається вже на кінцевих стадіях її проведення [4].

Так, наприклад, науковці Ю. В. Наконечна, А. Б. Качинський розглядають також SIR-модель, яка є класичною віральною моделлю поширення інфекції в межах популяції залежно від часу. Для процесу поширення інформації застосовують наступне:

- S – агенти мережі (користувачі), які не отримали інформаційне повідомлення,
- I – отримали повідомлення та вважають надану в ньому інформацію актуальною,
- R – забули новину/втратили до неї інтерес.

Так, дану модель було застосовано для моделювання інформаційних впливів на основі даних, отриманих з новинного порталу УНІАН. Аудиторія каналу становить понад 200 тис. Підписників у Facebook, та активну щоденну аудиторію ресурсу близько 9 тис. чоловік, з яких 1428 переглянули новину про відсутність депутатів на своїх робочих місцях 06.04.18. Зважаючи на популярність цієї новини станом на день публікації, було обрано відповідні параметри моделі [5].

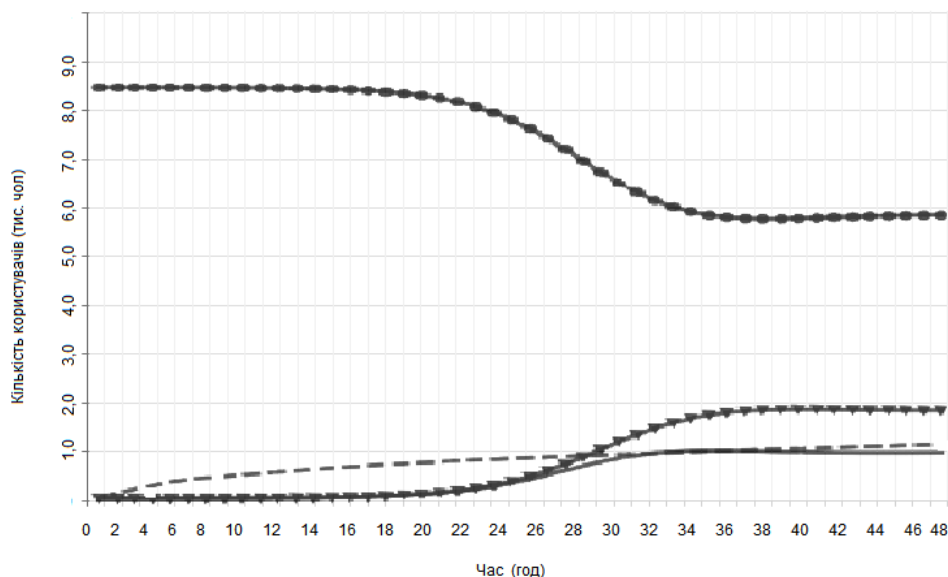


Рис. 2. Приклад структури поширення повідомлення на задану тему

За висновками авторів, розширена модель SIR дає змогу оцінити охопту аудиторії, але не відповідає реальності стосовно відображення динаміки поширення новини у часі, а також наявність параметра «забування» робить використання моделі складнішим, адже оцінка швидкості переходу новини у неактуальний стан є комплексним показником та потребує експертної оцінки [5].

Аналізуючи інформаційні операції, які проводить агресор в інформаційному просторі, слід зазначити, що основним середовищем поширення деструктивного контенту стали соціальні медіа, які спираються на новітні цифрові технології, інтерактивність та комбінування різних форм представлення інформації, наприклад текстової, звукової і графічної, анімації та відео. Такі нові медіа як канали месенджера Telegram, соціальні мережі Instagram, Facebook та Twitter мають багатомільйонні цільові аудиторії, швидкість і горизонтальність розповсюдження контенту. Вони, по-перше, дають можливість проводити інформаційні операції за кардинально різними схемами та планами, що ускладнює їх виявлення, а отже, робить неефективним протидію, по-друге, не дають можливості напрацювати чіткі шаблони для організації превентивних заходів.

Власний практичний досвід та досвід зарубіжних партнерів, таких як Трансатлантична комісія з чесних виборів при Альянсі Демократій, які аналізують інформаційні операції в соціальних мережах, показав, що особливо масово при цьому використовується соціальна мережа Twitter, контент якої містить як деструктивний посил, так і маніпулятивні технології для прихованого впливу на суспільну свідомість. Приклади таких втручань зафіксовано під час загальнодержавних виборів в Італії та Мексиці у 2018 році, на референдумі щодо зміни назви в Македонії у 2018, парламентські та президентські вибори в Україні у 2019. На рисунку 3 наведено приклад кластеризації та сегментації акаунтів-ботів в соціальній мережі Twitter, які використовувалися РФ для проведення інформаційних операцій.

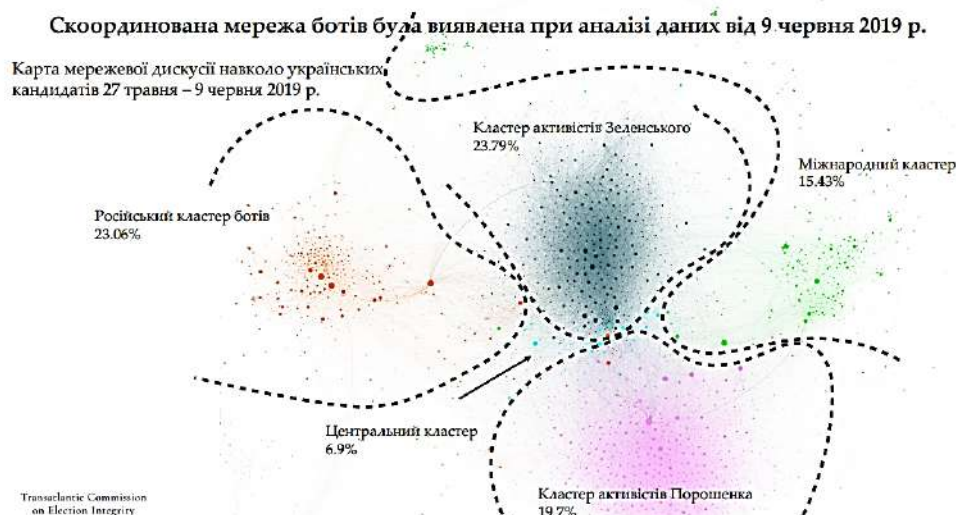


Рис. 3. Приклад кластеризації та сегментації акаунтів-ботів у соціальній мережі Twitter з подальшим використанням цих кластерів для проведення інформаційних операцій РФ

Враховуючи динамічне середовище соціальних мереж, а також динамічні соціальні процеси в інформаційній сфері, інформаційні операції неможливо описати аналітичними математичними методами та побудувати модель розповсюдження контенту в часі, яка б була деяким прототипом інформаційної операції. Для цього пропонується розглянути методи імітаційного моделювання.

Незважаючи на те, що аналіз соціальних мереж сам по собі є складною науково-технічною задачею, моделювання поширення інформації дозволяє досліджувати відповідні інформаційні процеси, виявляти закономірності, які можуть використовуватись як при вивченні механізмів передачі інформації у таких мережах, так і рівня її впливу на людей.

Тому для моделювання інформаційних операцій в соціальних мережах пропонується розглянути відносно новий вид імітаційного моделювання – агентне моделювання (agent – based modeling and simulation – ABMS). Саме агентне моделювання дозволяє зімітувати ті соціальні процеси та поведінку користувачів, які відбуваються в цих нових медіа.

Можна виділити основну особливість цього методу, що складається в такому: будуються сценарії можливих варіантів розвитку подій у майбутньому, на підставі чого формуються, а потім відбираються стратегічні альтернативи, які працюють у кожному сценарії та служать підставою для прийняття рішень про вибір інтегрованої стратегії. Агентний підхід дозволяє проводити багатоваріантний ситуаційний аналіз системи, що моделюється. Сутність агентного підходу при побудові сценаріїв полягає в побудові середовища активних агентів, визначення алгоритмів їхнього функціонування та взаємодії, виявлення нових закономірностей, зв'язків, когнітивних зв'язків, а також комплексу математичних моделей формування сценаріїв на комп'ютерному моделюючому комплексі [6].

В імітаційній агентній моделі її складові – агенти – функціонують незалежно один від одного та від системи загалом. Вони діють за своїми законами, на основі яких й формуються загальні правила функціонування системи загалом, тобто побудова моделі «від низу до верху».

Для створення агентної моделі поширення інформації, перш за все, необхідно сформувати близький до реальності віртуальний інформаційний простір, «населений» віртуальними агентами. При побудові агентної моделі однією з основних задач є визначення взаємодії агентів між собою, яким чином дані агенти формуються (виникають), що впливає на передачу інформації від одного агенту до іншого, якою може бути динаміка цієї передачі [6].

За практичним аналізом соціальної мережі Twitter на прикладі розповсюдження повідомлень із хештегом #LightOnZelenskyuOff встановлено, що більшість акаунтів, з яких здійснювалося вкидання, є ботами, що підтверджено за рахунок ПЗ Botometer. А модель поширення виглядає таким чином.

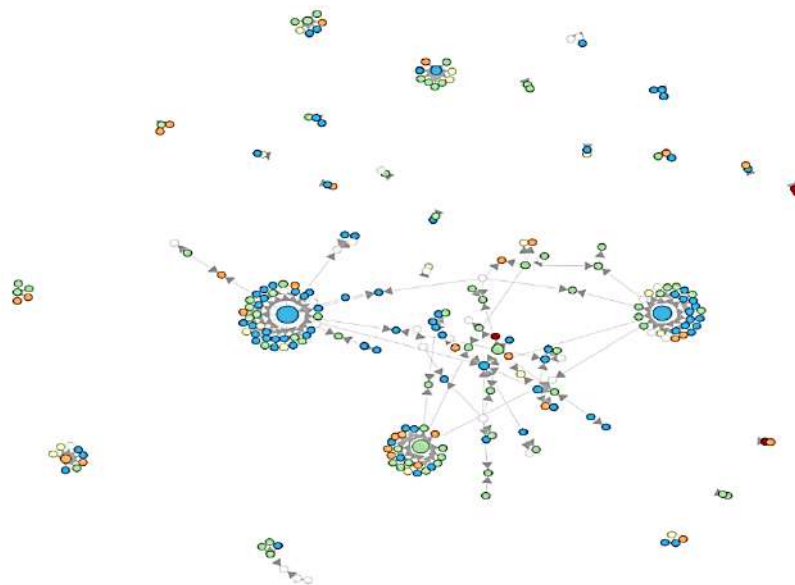


Рис. 4 Приклад моделі поширення вірусного контенту акаунтами-ботів у соціальній мережі Twitter з хештегом #LightOnZelenskyuOff

Аналізуючи типи віртуальних агентів в соціальних мережах в рамках побудови моделі, можна визначити наступні:

– першоджерело – **перший тип агентів**, які публікують контент для подальшої популяризації;

– акаунти-боти – **другий тип агентів** (бот — це спеціальна програма, що виконує автоматично і за заданим розкладом певні дії через ті ж інтерфейси, що й звичайний користувач) – використовуються для штучного нарощування «лайків» чи коментарів з метою підняття рейтингу публікації серед користувачів мережі, дають змогу посилити вплив у інформаційному середовищі шляхом залучення нових цільових аудиторій (бот поширює новину, але майже нічого не змінює, він на відміну від троля є механічним, троль – креативним);

– акаунти-тролі – **третій тип агентів** – звичайна дійова особа, яка надає кольорового забарвлення новинам. Вони оперують великими групами і подають новину з різних ракурсів. За цим типом агентів можуть знаходитись блогери, лідери думок, які репостять «вірусний» контент на власні сторінки, тим самим одразу (в один клік) збільшуючи потенційні цільові аудиторії (перегляди, лайки, репости) в рази;

– **четвертий тип агентів** – реальні люди, які є потенційною цільовою аудиторією інформаційної операції, вони «споживають» контент та сприймають його достовірним, тобто підпадають під інформаційний та психологічний вплив і стають «інфікованими» даним контентом, вірять, що інформація правдива та популяризують її далі в мережі, базуючись на своїй вірі.

Передбачається, що агенти в соціальній мережі можуть

- 1) самозароджуватися;
- 2) породжувати нових агентів шляхом репостінгу (repost);
- 3) «вмирати» — зникати з простору агентів (припинити передавати контент);
- 4) отримувати лайки (like) від інших агентів.

Після появи «вірусного» контенту в акаунті першоджерела, різні типи агентів починають безперервно взаємодіють один з одним, та передавати інформацію (репост) за такими алгоритмами:

- від одного агента до іншого – взаємодія між четвертим типом агентів;
 - від одного агента до групи агентів – взаємодія між третім та четвертим типом агентів, між першим та четвертим типом агентів та між другим та четвертим типом агентів;
 - від однієї групи агентів до іншої – взаємодія між другим типом агентів
- Характер зв'язків між агентами може бути як прямим, так і зворотним.

У такій системі рішення задачі можуть формуватися за рахунок взаємодії великої кількості агентів, що безперервно взаємодіють один з одним, а також формується колективна поведінка.

У результаті виділення типових агентів – акаунтів-користувачів – в соціальній мережі, виявлення закономірностей їх взаємодії та притаманних даним агентам характеристик, стає очевидним, що така умовна інформаційна система не належить до формальних моделей, є неоднорідною, а поведінка її елементів – акаунтів користувачів – нераціональною. Саме в таких випадках, коли інформаційна система є децентралізованою та не діє за глобальними правилами й законами, а навпаки, ці глобальні правила і закони є результатом індивідуальної активності членів групи, слід застосовувати агентний підхід.

Висновки. На сьогодні є очевидним, що пошук дієвих механізмів протидії інформаційним операціям є надзвичайно актуальним і важливим завданням. При цьому в своїй більшості запропоновані моделі виявлення націлені не на алгоритми розповсюдження, а на аналіз контенту, та як середовище розглядаються в більшості своїй електронні ЗМІ. Водночас на практиці доведено, що найбільш задіяним середовищем для проведення інформаційних операцій є соціальні мережі. Це нелінійне динамічне середовище, яке не можливо зареєструвати чи описати чіткими математичними формулами. Для такого середовища запропоновано використання агентної парадигми для моделювання інформаційних операцій.

Особливістю даної парадигми є багаторівнева абстракція опису процесу поширення інформаційних матеріалів у соціальних мережах, а також можливість у подальшому застосувати отримані результати до широкого класу аналогічних інформаційних ресурсів мережі Інтернет.

Застосування цього підходу дозволяє здійснити перехід від реального процесу розгортання інформаційної операції до її формальної моделі, у межах досліджень якої з'являється можливість прогнозувати властивості поведінки інформаційного процесу поширення інформації.

Список використаних джерел

1. Молодецька-Гринчук К. Методологія побудови системи забезпечення інформаційної безпеки держави в соціальних інтернет сервісах : дис. ... д-ра техн. наук / К. Молодецька-Гринчук. – Житомир, 2018. – 368 с.
2. Горбулін В. П. Інформаційні операції та безпека суспільства: загрози, протидія, моделювання : монографія / В. П. Горбулін, О. Г. Додонов, Д. В. Ланде. – Київ : Інтертехнологія, 2009. – 164 с.
3. Якименко Н. М. Важливість дослідження та моделювання інформаційних операцій в умовах інформаційної війни та кібервійни / Н. М. Якименко // Актуальні задачі та досягнення у галузі кібербезпеки : зб. матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції. – 2016. – С. 207-209.
4. Додонов В. О. Мультиагентний підхід до моделювання інформаційно-аналітичної системи / В. О. Додонов, Д. В. Ланде, В. Г. Путятін // Інформаційно-аналітичні системи обробки даних. – 2016. – Т. 18, № 2. – С. 22- 24.
5. Наконечна Ю. В. Математичні моделі динаміки поширення інформації в соціальних медіа / Ю. В. Наконечна, А. Б. Качинський // Математичні методи комп'ютерного моделювання та кібернетичної безпеки. – Київ, 2018. – С. 37-39.
6. Распознавание информационных операций: мультиагентный подход, Open Semantic Technologies for Intelligent System / А. Г. Додонов, Д. В. Ландэ, В. В. Цыганок, О. В. Андрейчук, С. В. Каденко, А. Н. Грайворонская. – Киев : ООО «Инжиниринг», 2017. – 282 с.

References

1. Molodetska-Hrynychuk, K. (2018). *Metodolohiia pobudovy systemy zabezpechennia informatsiinoi bezpeky derzhavy v sotsialnykh internet servisakh [Methodology of building a system for ensuring state information security in social Internet services]*. [Doctor dissertation, Zhytomyr].
2. Horbulin, V.P., Dodonov, O.H., & Lande, D.V. (2009). *Informatsiini operatsii ta bezpeka suspilstva: zahrozy, protydiia, modeliuvannia [Information operations and social security: threats, countermeasures, modeling]*. Intertekhnolohiia.
3. Yakymenko, N.M. (2016). *Vazhlyvist doslidzhennia ta modeliuvannia informatsiinykh operatsii v umovakh informatsiinoi viiny ta kiberviiny [The importance of research and modeling of information operations in the conditions of information warfare and cyber warfare]*. *Aktualni zadachi ta dosiahnennia u haluzi kiberbezpeky: zb. materialiv Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii – Actual problems and achievements in the field of cyber security: Collection. materials of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference* (pp. 207-209).
4. Dodonov, V.O., Lande, D.V., & Putiatin, V.H. (2016). *Multyahentnyi pidkhid do modeliuvannia informatsiino-analitychnoi systemy [Multi-agent approach to information and analytical system modeling]*. *Informatsiino-analitychni systemy obrobky danykh – Information and analytical data processing systems*, 18(2), 22- 24.
5. Nakonechna, Yu.V., Kachynskiy, A.B. (2018). *Matematychni modeli dynamiky poshyrennia informatsii v sotsialnykh media [Mathematical models of the dynamics of information dissemination in social media]*. *Matematychni metody kompiuternoho modeliuvannia ta kibernetichnoi bezpeky – Mathematical methods of computer modeling and cyber security* (pp. 37-39).
6. Dodonov, A.H., Lande, D.V., Tsyganok, V.V., Andreichuk, O.V., Kadenko, S.V., & Hraivoronskaia, A.N. (2017). *Raspoznavanie informatsionnykh operatsii: multiagentnyi podkhod, Open Semantic Technologies for Intelligent System [Recognition of information operations: multi-agent approach, Open Semantic Technologies for Intelligent System]*. ООО «Inzhyniring».

Отримано 30.06.23

UDC 004.738.5:351

Olha Vasylieva

graduate student

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: olga.vasiljeva37@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8263-782X>

MODELS FOR DETECTING AND FORECASTING THE DYNAMICS OF INFORMATION OPERATIONS IN SOCIAL NETWORKS

The article examines some provisions for conducting information operations as one of the main threats to national security in the information sphere, demonstrates the use of social networks as the main field for conducting them thanks to the latest technologies, and analyzes the proposed models of information operations in social networks.

The article is devoted to the problem of the complex application of theoretical models used in the study of "viral" information dissemination in social networks of cyberspace.

Formal modeling, which is used to study the peculiarities of communication in social networks, is analyzed.

Three components of formal models of online message distribution in social networks are distinguished: typology of messages, network model, formal model of signal distribution.

Special attention is paid to the possibilities of applying non-linear models of information dissemination.

It is proposed to use a relatively new type of simulation modeling - agent-based modeling and simulation (ABMS) for modeling information operations in social networks. It is agent modeling that allows you to simulate those social processes and user behavior that occur in these new media. The main feature of agent modeling is building scenarios of possible options for the development of events in the future, on the basis of which strategic alternatives, which work in each scenario and serve as a basis for making decisions about choosing an integrated strategy are formed and then selected. The agent approach allows for multivariate situational analysis of the modeled system. The essence of the agent approach in building scenarios consists in building an environment of active agents, determining the algorithms of their functioning and interaction, identifying new patterns, connections, cognitive connections, as well as a set of mathematical models for the formation of scenarios on a computer simulation complex.

The types of virtual agents in social networks are distinguished: primary source, bot accounts, troll accounts, real people.

Keywords: modeling; information operations; national security in the information sphere; social networks; dynamic environment.

Fig.: 4. References: 7.

Віолета Калюжна

аспірантка 2 курсу приладобудівного факультету, кафедри інформаційно-вимірювальних технологій
Національний університет «КПІ ім. І. Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: vita.kalu1997@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4830-7197>

**ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ІВС ЕКСПРЕС-АНАЛІЗУ
ПАРАМЕТРІВ ҐРУНТУ**

У статті описано програмне забезпечення – користувацький інтерфейс для ІВС експрес-аналізу. Наведено його можливості, які включають отримання даних про температуру, вологість, кислотність, вміст метану та електропровідність ґрунту. Програмне забезпечення має користувацький інтерфейс, можливість налаштування нормального діапазону параметрів і зберігання даних у базі даних. Воно також надає функцію аналізу даних, створення звітів і прогнозування майбутніх змін. Програма підтримує велику базу даних і може об'єднувати декілька систем. Застосування програмного забезпечення можливо в різних галузях, таких як екологія та енергетика.

Ключові слова: програмне забезпечення; ІВС; експрес-аналіз; інформаційно-вимірювальні системи; актуальність; проблема; дослідження; результати; аналіз; висновки; перспективи.

Рис.: 8. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. Ця стаття присвячена програмному забезпеченню для ІВС експрес-аналізу, що нині актуально з кількох причин. По-перше, використання ІВС в експрес-аналізі дозволяє швидко та ефективно вимірювати певні параметри та проводити аналіз даних, а саме температуру, вологість, кислотність, електропровідність та вміст метану. По-друге, зростаюча потреба в точних та швидких вимірюваннях у різних галузях науки й техніки робить цю тему актуальною. Програмне забезпечення для ІВС експрес-аналізу відповідає потребам сучасної галузі науки і техніки та враховує перспективи розвитку цієї галузі.

Постановка проблеми. Проблема, яку розглянуто у статті, полягає в розробці та застосуванні програмного забезпечення для ІВС експрес-аналізу. Ця проблема є важливою і актуальною для певної галузі науки й техніки, оскільки використання програмного забезпечення дозволяє автоматизувати процес вимірювання та аналізу даних в ІВС, що сприяє швидкості, точності та ефективності експрес-аналізу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сфері ІВС експрес-аналізу було проведено ряд досліджень, які стосуються розробки програмного забезпечення. Користувацький інтерфейс пишуть на різних мовах та різними методами. Наприклад, у роботі “Real-Time Monitoring and Management of Hardware and Software Resources in Heterogeneous Computer Networks through an Integrated System Architecture” [1] досліджувалась розробка програмного забезпечення для інтегрованих систем вимірювання з метою онлайн моніторингу написана на C++. “A Graphical-User-Interface application for multifractal analysis of soil and plant structures” [2] – програма MFA заснована на графічному інтерфейсі користувача (GUI: графічний інтерфейс користувача) і спочатку була написана в MATLAB версії 8.5 (R2015a). MATLAB версії 8.5.

Програма SoilWaterApp [3] була розроблена для пристроїв iOS з використанням власної платформи Apple Objective-C і обмінюється даними з центральним хмарним сервером для синхронізації як додатків, так і даних користувача. Програма демонструє поточний стан параметрів ґрунту, проводить прогнозування та аналізує дані (рис. 1).

За основу взято роботу «Design of Wireless Sensor Network for Monitoring of Soil Quality Parameters» (рис. 2) [4], що був розроблений на основі програми LabView, та відображає поточний стан параметрів та надає можливість користувачу налаштувати програму.

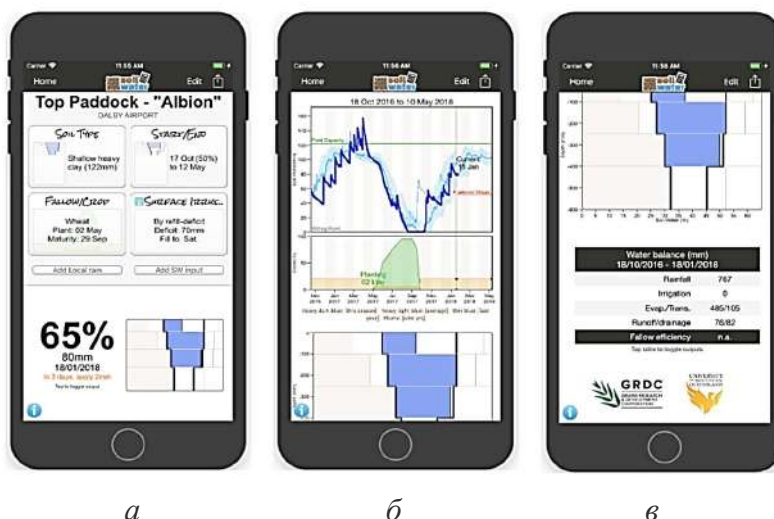


Рис. 1. Приклад інтерфейсу користувача SoilWaterApp, що показує (коли користувач прокручує сторінку вниз):

а – параметри введення та підсумковий висновок; б – тимчасові ряди ґрунту-води та рослинного покриття; в – профіль вологості ґрунту та таблиця водного балансу

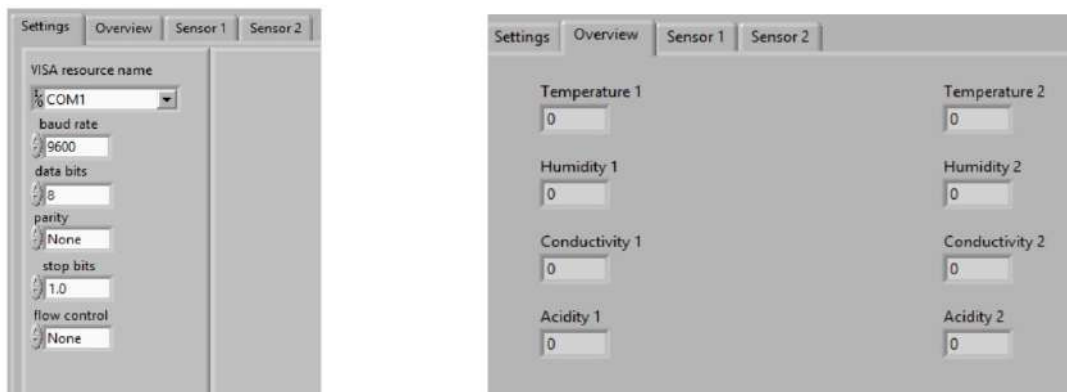


Рис. 2. Користувацький інтерфейс GUI

Останні дослідження і публікації свідчать про успішні спроби вирішення проблеми швидкого аналізу даних за допомогою програмного забезпечення для ІВС експрес-аналізу. Деякі дослідження зосереджуються на розробці нових алгоритмів та методів обробки даних, щоб покращити швидкість та точність аналізу. Інші дослідження спрямовані на розширення функціональності програмного забезпечення, зокрема, на розвиток інтерфейсу користувача, покращення візуалізації результатів та інтеграцію з іншими науковими інструментами.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проте існують недосліджені аспекти, які потребують подальшого дослідження. Наприклад, розробка нових алгоритмів для ефективного обробки та аналізу великих обсягів даних, використання штучного інтелекту та машинного навчання для автоматизації процесів аналізу, а також дослідження можливостей використання програмного забезпечення для ІВС експрес-аналізу в нових галузях, таких як екологія та енергетика.

Незважаючи на проведені дослідження в галузі програмного забезпечення для ІВС експрес-аналізу, є недосліджені аспекти. Зокрема, ще потрібно досліджувати оптимальні алгоритми оброблення даних, розробку інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу користувача та інтеграцію з іншими системами вимірювання.

Метою статті є демонстрація алгоритмів роботи розробленого програмного забезпечення для ІВС експрес-аналізу параметрів ґрунту та принцип дії і можливі покращення користувацького інтерфейсу.

Виклад основного матеріалу.

Загальний опис програмного забезпечення та його переваги. На основі програмної мови Java було розроблено програмне забезпечення - користувацький інтерфейс для попередньо розробленої інформаційно-виміральної системи експрес-аналізу параметрів ґрунту що дозволяє побачити в умовах реального часу показники таких параметрів ґрунту, як температура, вологість, кислотність, вміст метану та електропровідність. Також користувацький інтерфейс дає можливість налаштування нормального діапазону кожного окремого параметру. Це удосконалення зроблене для можливого користування приладом та ПЗ у будь якій країні та на різних видів ґрунту. Також ПЗ записує у базу даних всі параметри які надходять і цим дає змогу аналізувати дані, створювати звіти та прогнозувати майбутні зміни. Усі дані, які надходять до ПЗ зберігаються на карту пам'яті, що дає змогу працювати з великою базою даних та об'єднувати декілька систем в одну мережу. Це дає можливість збирати дані за роки та покращувати урожайність. Також система має функцію сповіщення у разі надходження даних що вважаються небезпечними. Наприклад, якщо температура на поверхні ґрунту перевищила нормальні межі, користувач отримує сповіщення на телефон та комп'ютер для подальшого регулювання проблеми. Цей функціонал дає можливість автоматизувати процес спостереження та переглядати дані та зміну параметрів у зручний час.

Загальна характеристика методик аналізу використаних у роботі ПЗ.

Титриметричним методом можна визначити багато забруднювачів на місці відбору проб. Для швидкого аналізу на місці відбору проб використовують також спеціальні індикаторні папірці (особливо при визначенні токсичних компонентів на рівні ГДК).

Поширені методики атомної абсорбції, спектрального аналізу та хроматографії. Перші з них є ефективними при визначенні мікродомішок металів, особливо у воді, ґрунті та донних відкладах. Хроматографічні методи застосовують переважно для визначення газуватих неорганічних сполук, летких органічних речовин та деяких катіонів металів, аніонів і нелетких органічних сполук.

Також запропонована методика прогнозування можливого стану ґрунту в короткостроковій перспективі на основі методу екстраполяції. У теорії і практиці в процесі прогнозування показників досить часто використовують методологію екстраполяції, за якої висновки призначення прогнозних показників у майбутніх періодах робляться на основі вивчення їх динаміки в попередніх періодах. Необхідним елементом при цьому є побудова та аналіз так званого ряду динаміки, який класифікує значення показників у часі у розрізі окремих періодів та описує динаміку їхнього розвитку. Підкреслимо, що аналіз ряду динаміки окремого показника, має суто описовий характер і не пояснює причину тих чи інших змін тенденції.

Методи екстраполяції використовують за відносно стабільного розвитку підприємства (чи окремих показників його діяльності) або за наявності сезонних чи циклічних коливань з чітко вираженим трендом. Під трендом (від англ. trend – напрям, тенденція) розуміють тривалу тенденцію зміни економічних показників в економічному прогнозуванні. Якщо ж розвиток показників фінансово-господарської діяльності підприємства у попередніх періодах характеризується значною нестабільністю і суттєвим коливанням фінансових показників, та екстраполяція на майбутні періоди буде неможливою, а отже, недоцільним є використання відповідних методів.

Методи визначення середніх величин. Прогнозні показники досить часто розраховуються як середнє значення відповідних показників попередніх періодах. Середні величини обчислюються здебільшого за алгоритмом середньої арифметичної простої чи середньої арифметичної зваженої. Найпоширенішим у процесі прогнозування є метод визначення ковзної середньої, за використання якого прогнозні показники розраховуються як середні величини відповідних показників за попередніх періодів (а не з використанням усіх значень аналізованого ряду динаміки). Кожні наступні прогнозні показники розраховуються на основі значень, одержаних у 3, 4, ... n попередніх періодах зміною значень найвіддаленіших періодів на нові.

Аналіз даних та прогнозування здійснюється таким чином:

1. Підготовка до роботи:

- Встановити систему в потрібному місті.
- Увімкнути систему за допомогою кабелю USB (під'єднати до ноутбука).
- Надати можливість системі увімкнутися автоматично (30 с).
- За цей час відкрити програмне забезпечення з користувацьким інтерфейсом.

2. Аналіз даних:

● Дані встановлені автоматично, але за необхідності користувач може змінити діапазон нормальних значень для певної території.

● Аналіз здійснюється автоматично. При зміні діапазону нормальних значень параметрів аналіз відтворюється автоматично після установки даних за допомогою кнопки SET. Система показує, до якої групи можна віднести теперішні дані:

1 група – зелена зона – значення параметра, які задовольняють користувача та відповідають нормальним значенням заданим раніше (враховуючи похибку приладу).

2 група – помаранчева зона – значення параметра, які виходять за межі нормальних на ($\pm 20...30$) %.

3 група – червона зона – значення параметра, які значно більші/менші від заданих користувачем ($> +30$ % / < -30 % від нормальних значень).

● Усі дані разом із датою, часом і власне значеннями параметрів зберігається у файлі.

● Для отримання статистики користувач може натиснути поряд з потрібним параметром кнопку STATISTIC.

● Відкрите вікно з графіками за потреби можливо зберегти як картинку.

Відповідно до алгоритму функціонування системи, який представлено на рис. 4, 5 розроблено часову діаграму роботи окремого каналу системи (рис. 6).

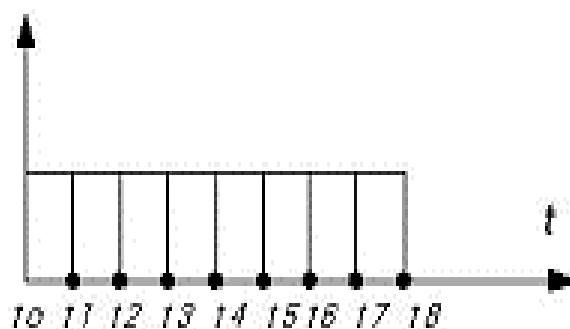


Рис. 6. Часова діаграма роботи окремого каналу системи

де $0t$ – початок вимірювання;

$[1t - 2t]$ – увімкнення живлення;

$[2t - 3t]$ – ініціалізація системи;

$[3t - 4t]$ – вибір користувачем каналу вимірювання та безпосереднє вимірювання;

$[4t - 5t]$ – перетворення аналогового сигналу в код;

$[5t - 6t]$ – запам'ятовування інформації мікроконтролером;

$[6t - 7t]$ – передача інформації;

$[7t - 8t]$ – завершення вимірювання.

Таким чином, проміжний час вимірювання на кожному етапі без урахування часу, витраченого користувачем на вибір каналу вимірювання, становитиме:

$t_0 - t_1 = 3 \mu\text{s}$; $t_1 - t_2 = 3 \mu\text{s}$; $t_2 - t_4 = 3-5 \text{ ms}$; $t_4 - t_5 = 1 \text{ ms}$; $t_5 - t_6 = 5 \mu\text{s}$; $t_6 - t_7 = 3 \mu\text{s}$;

Сумарний час вимірювання: $\approx 10 \sum t \text{ ms}$ (без урахування часу встановлення необхідних параметрів користувачем).

Тестування програмного забезпечення

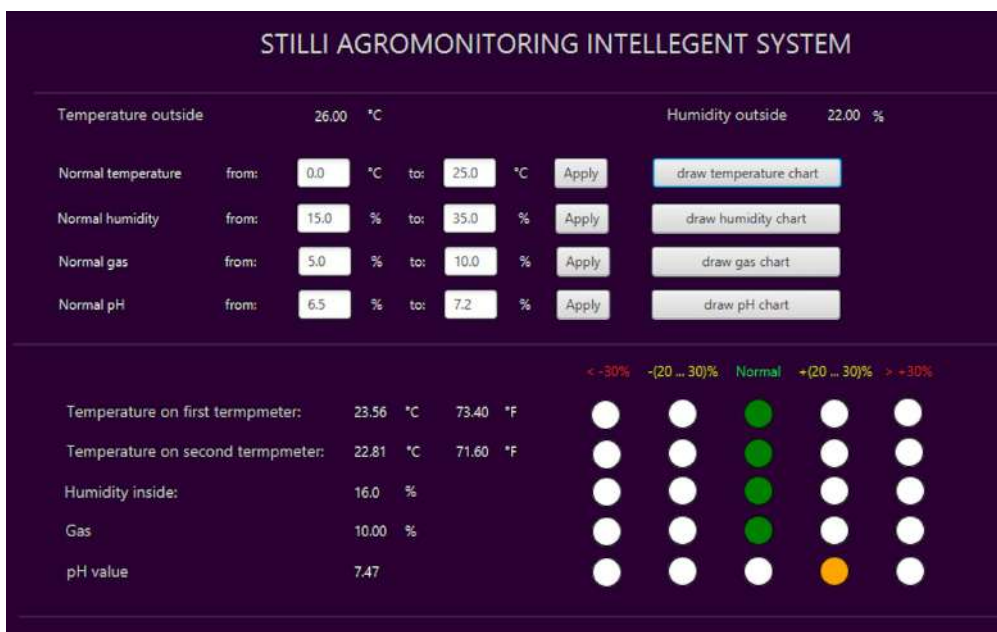


Рис. 7. ПЗ в онлайн режимі ІВС експрес аналізу параметрів ґрунту (параметри у межах встановленої норми)

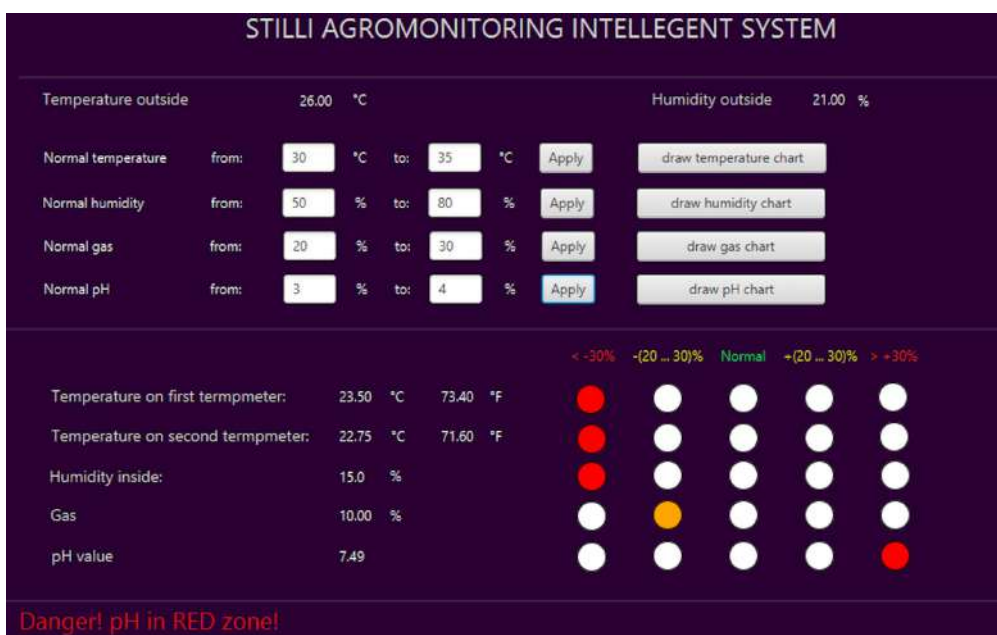


Рис. 8. ПЗ в онлайн режимі ІВС експрес аналізу параметрів ґрунту (параметри за межами встановленої норми)

Перспективи розвитку програмного забезпечення.

Для подальшого розвитку програмного забезпечення для ІВС експрес-аналізу можна розглядати такі перспективи досліджень. По-перше, можливе удосконалення алгоритмів та методів аналізу для досягнення ще більшої точності та швидкості обробки даних. По-друге, важливо зосередитися на розширенні функціональності програмного забезпечення, додавши нові модулі та інструменти, які дозволяють виконувати більш широкий спектр аналізів. По-третє, можна розглядати можливості інтеграції програмного забезпечення з іншими інструментами та системами, що дозволить забезпечити ще більшу функціональність та зручність використання.

Загальна мета дослідження та розробки програмного забезпечення для ІВС експрес-аналізу полягає в створенні потужного, швидкого та надійного інструменту для аналізу даних, що відповідає вимогам сучасної галузі науки і техніки. Результатом такого дослідження є створення програмного забезпечення, яке забезпечує точний та ефективний аналіз великих обсягів даних, сприяючи подальшому розвитку і вдосконаленню процесів наукових та технічних досліджень.

Отримані наукові результати підтверджують досягнення мети статті. Розроблене програмне забезпечення для ІВС експрес-аналізу виявляється ефективним та надійним інструментом для проведення аналізу даних, що відповідає потребам і вимогам галузі. Його новизна полягає у використанні новітніх алгоритмів і методів аналізу, що дозволяють досягти більшої точності та ефективності результатів. Отримані наукові результати свідчать про успішне вирішення поставлених завдань і виявлення цінності програмного забезпечення для ІВС експрес-аналізу.

Важливо відзначити практичне значення отриманих наукових результатів. Програмне забезпечення для ІВС експрес-аналізу може бути використане в різних галузях, таких як біологія, медицина, хімія, фармація та інші. Його застосування сприятиме прискоренню процесу аналізу даних, виявленню нових залежностей та закономірностей, а також полегшить прийняття рішень на основі отриманих результатів. Користь програмного забезпечення полягає в зниженні часу та зусиль, що витрачаються на проведення аналізу, та покращенні якості та достовірності отриманих висновків. На підставі отриманих результатів можна зробити кілька рекомендацій щодо подальшого практичного використання програмного забезпечення для ІВС експрес-аналізу. Передусім варто провести його впровадження в лабораторії та дослідницькі центри, що займаються аналізом даних. Також слід розглянути можливість співпраці з іншими розробниками програмного забезпечення для обміну досвідом та вдосконалення функціональності. Подальше вдосконалення програмного забезпечення може включати розширення його можливостей, підтримку нових технологій та інтеграцію з іншими системами та пристроями.

Висновки. У підсумку, розроблене програмне забезпечення для ІВС експрес-аналізу є актуальним і важливим напрямом розвитку сучасної науки і техніки. Воно вирішує проблему швидкого та ефективного аналізу великих обсягів даних, що використовуються в різних галузях.

Важливо продовжувати дослідження у цій галузі з метою постійного вдосконалення програмного забезпечення для ІВС експрес-аналізу. Необхідно проводити додаткові експерименти та випробування з метою перевірки його ефективності та надійності. Також можна розглядати можливості поширення його застосування на інші галузі та розробку спеціалізованих версій для конкретних сфер дослідження.

Крім того, співпраця між науковими установами, лабораторіями та промисловими підприємствами може сприяти обміну досвідом та взаємному вдосконаленню програмного забезпечення. Такі партнерства можуть сприяти розширенню можливостей програмного забезпечення, його адаптації до конкретних потреб та впровадженню на практиці.

У майбутньому, програмне забезпечення для ІВС експрес-аналізу може стати необхідним інструментом для багатьох наукових досліджень, медичних діагностики, фармацевтичної розробки та інших областей. Використання такого програмного забезпечення може значно прискорити процес аналізу та сприяти отриманню нових знань і відкриттів.

Отже, програмне забезпечення для ІВС експрес-аналізу є однією з ключових складових розвитку сучасної науки і техніки. Його актуальність постійно зростає, оскільки вимагається більшої швидкості, точності й ефективності в аналізі великих обсягів даних. Програмне забезпечення для ІВС експрес-аналізу відіграє важливу роль у різних галузях, включаючи медицину, біологію, хімію, фармацевтику та інші.

Список використаних джерел

1. Ченг Х. Архітектура користувачького інтерфейсу для автоматизованої системи експрес-аналізу параметрів ґрунту / Х. Ченг // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. – 2020. – Том 11, № 6. – С. 191-198. DOI: 10.5281/zenodo.3895507.
2. Cheng X. Software for integrated measurement systems in real-time monitoring / X. Cheng, J. Li, H. Shi // *Procedia Engineering*. – 2016. – Том 137. – С. 87-95. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.01.175.
3. Cheng X. A comprehensive review on the applications of computer-aided design, manufacturing, and engineering in the construction industry / X. Cheng, Q. Lu, Y. Yao // *Automation in Construction*. – 2018. – Том 92. – С. 380-389. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.05.018.
4. Cheng X. Intelligent System for Online Monitoring of Geotechnical Structures / X. Cheng, Q. Lu, Y. Yao // *Procedia Engineering*. – 2016. – Том 137. – С. 207-213. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.01.191.
5. Development of software for integrated measurement systems in real-time monitoring / H. Cheng, Y. Hu, W. Li, X. Luo // *Measurement*. – 2020. – № 160. – 107729.
6. Sommerville I. *Software Engineering* / I. Sommerville. – Pearson Education, 2016.
7. Pressman R. S. *Software Engineering: A Practitioner's Approach* / R. S. Pressman, B. R. Maxim. – McGraw-Hill Education, 2014.
8. Jazdi N. *Software Engineering in Industrial Automation: State of the Art and Future Trends* / N. Jazdi // *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. – 2008. – P. 362-367.
9. Duda R.O. *Pattern Classification* / R. O. Duda, P. E. Hart, D. G. Stork. – Wiley-Interscience, 2012.
10. Stein, C. *Software Engineering for Image Processing Systems* / C. Stein. – CRC Press, 2015.
11. Das, B. M. *Principles of Geotechnical Engineering = Принципи геотехнічного інжинірингу* / B. M. Das. – 2016.
12. Lambe T.W. *Soil Mechanics = Механіка ґрунтів* / T. W. Lambe, R. V. Whitman. – 2012.
13. Mitchell J.K. *Fundamentals of Soil Behavior = Основи поведінки ґрунтів* / J. K. Mitchell. – 1993.

References

1. Cheng, H. (2020). Architecture of the user interface for the automated system of express analysis of soil parameters. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 11(6), 191-198. - doi:10.5281/zenodo.3895507.
2. Cheng, X., Li, J., & Shi, H. (2016). Software for integrated measurement systems in real-time monitoring. *Procedia Engineering*, 137, 87-95. doi:10.1016/j.proeng.2016.01.175.
3. Cheng, X., Lu, Q., & Yao, Y. (2018). A comprehensive review on the applications of computer-aided design, manufacturing, and engineering in the construction industry. *Automation in Construction*, 92, 380-389. doi:10.1016/j.autcon.2018.05.018.
4. Intelligent System for Online Monitoring of Geotechnical Structures / X. Cheng, Q. Lu, Y. Yao // *Procedia Engineering*. - 2016. - Том 137. - С. 207-213. - DOI: 10.1016/j.proeng.2016.01.191.
5. Cheng, H., Hu, Y., Li, W., & Luo, X. (2020). Development of software for integrated measurement systems in real-time monitoring. *Measurement*, 160, 107729.
6. Sommerville, I. (2016). *Software Engineering* (10th ed.). Pearson Education.
7. Pressman, R. S., & Maxim, B. R. (2014). *Software Engineering: A Practitioner's Approach* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
8. Jazdi, N. (2008). *Software Engineering in Industrial Automation: State of the Art and Future Trends*. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation Science and Engineering* (pp. 362-367).
9. Duda, R.O., Hart, P.E., & Stork, D.G. (2012). *Pattern Classification* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
10. Stein, C. (2015). *Software Engineering for Image Processing Systems* (2nd ed.). CRC Press.
11. Das, B.M. (2016). *Principles of Geotechnical Engineering [Principi geotehničnogo inženiringy]*.
12. Lambe, T.W., & Whitman, R. V. (2012). *Soil Mechanics [Mehanika gruntov]*.
13. Mitchell, J.K. (1993). *Fundamentals of Soil Behavior [Osnovi povedinky gruntiv]*.

Отримано 19.06.2023

Violeta Kaliuzhna

PhD student of the 2nd year Faculty of Instrumentation Engineering, information and measurement technologies mayor
National University "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: vita.kalu1997@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4830-7197>

**SOFTWARE FOR THE INFORMATION MEASURING SYSTEM
EXPRESS-ANALYSIS OF SOIL PARAMETERS**

This research paper focuses on the analysis of software for express analysis in computer-aided systems (CAS). The increasing demand for rapid and efficient information analysis poses challenges for the scientific and technical community to develop software tools that ensure accuracy, speed, and reliability in the process of express analysis.

The problem lies in the development of software that facilitates effective CAS express analysis. It is necessary to develop software tools that can quickly and accurately process information, detect anomalies, and conduct analysis of results.

The main objective of this research paper is to investigate software for express analysis in CAS and determine its effectiveness and practical applicability.

The paper explores the fundamental aspects of software for express analysis in CAS. It analyzes various approaches and methodologies for developing such software, including requirements for functionality, architectural decisions, and data processing and analysis methods. The paper provides a concise overview of the main findings obtained during the research on software for express analysis in CAS.

The application of software for express analysis in CAS proves to be highly promising and enables rapid and accurate information analysis. The developed software tools demonstrate high efficiency and practical suitability in real-world applications.

Keywords: software; express analysis; computer-aided systems; efficiency; accuracy; reliability; information processing; anomaly detection; functionality requirements; architectural decisions; data analysis methods; practical applicability.

Fig.: 8. References: 13.

Serhiy Nikolskiy¹, Iryna Klymenko²

¹PhD Student of the Department of Computer Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: serhiy.nikolskiy@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4893-3339>

²Doctor of technical sciences, Associate Professor of the Department of Computer Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: ikliryna@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5345-8806>

**DESIGNING TOOLS FOR AUTOMATED DATA COLLECTION
FOR IoT ROAD CONDITION MONITORING SYSTEMS**

The object of the research is the data collection processes on road conditions in monitoring and maintenance systems based on Internet of Things (IoT) technologies. A concept of data collection and aggregation from sensors is proposed to ensure their effective processing at the IoT network edge, with the possibility of integration into smart city systems based on IoT. The proposed approach of automated data collection using embedded devices in vehicles enables dynamic monitoring of road conditions with minimal resource consumption. To implement the proposed concept, a complex of hardware and software has been developed in the form of an experimental prototype of an IoT road condition monitoring system. Experiments have proven that the proposed tools enable rapid response to road defects in any terrain, and the aggregated data format is appropriate for further analysis, including intelligent analysis. The proposed tools can be used in smart city maintenance systems to improve driving quality and prevent critical situations related to poor road conditions.

Keywords: IoT; SmartCity; monitoring system; road condition; STM32.

Fig. 6. References: 16.

1. Introduction.

As modern technologies for device connectivity, big data processing, and intelligent analytics continue to advance, the Internet of Things (IoT) technology is developing and increasingly influencing society in all spheres of activity. Under the influence of the huge potential and capabilities of IoT, smart cities are rapidly evolving. The Internet of Things represents a relevant paradigm for the development of a new generation of smart cities, aiming to establish complex interconnections among all sectors within these cities.

Modern smart cities are already implementing a wide range of tasks in areas such as urban mobility, safety, maintenance, healthcare, and management [1]. Monitoring the state of road conditions is one of the relevant tasks for the technical maintenance of a smart city. An effective monitoring system will enhance driver comfort and enable timely response to problematic road sections, ultimately improving overall quality of life and reducing the use of human and material resources that could otherwise be spent on repairs and development [2]. However, this is an incredibly complex task that requires simultaneous control over thousands of kilometers of road surfaces, which can be damaged by various natural and man-made factors. Various transportation systems for technical control and monitoring are described in literature sources [1–3]. Traditionally, monitoring systems are based on a large number of IoT sensors that generate a vast amount of measurements and communicate with each other and analytics servers [4]. The most pressing challenges in the development of IoT systems are associated with improving the capabilities of modern IoT data analytics, which is driven not only by frequent data anomalies and their massive volume but also by the need for high-complexity computations in near-real-time mode [4]. Current trends in moving a significant portion of analytics to the edge level of IoT further emphasize the relevance and necessity of enhancing IoT system architectures, particularly in terms of data collection and aggregation. This is also applicable to road condition monitoring systems, which are sensitive to data processing time.

Thus, the article focuses on the current challenges of improving the efficiency of road condition monitoring systems based on IoT technologies, which can be easily integrated into smart city maintenance systems.

2. Analysis of Literature Data and Problem Statement.

Among the known methods of monitoring, the most common is the use of specialized mobile road laboratories that collect information on the quality of the road surface and roadsides. The

vehicles of these mobile laboratories are equipped with a wide range of equipment and sensors, including video cameras, GPS trackers, three-dimensional laser scanners, soil analysis sensors, and positioning devices [2, 5]. The analysis of the collected data is carried out by qualified specialists using specialized tools and modern modeling techniques in laboratory settings [5]. These professional laboratories offer detailed information about the current condition, damages, and problematic sections of roads and roadsides. However, the wide-scale implementation of such laboratories has certain drawbacks, including high costs, substantial resource and time requirements, and the need for trained personnel and specialized equipment.

Methods of automatic data collecting that simplify, accelerate, and lower the costs of these operations are becoming more important as IoT becomes more widely adopted [2]. The use of video footage acquired by vehicles' cameras is a popular approach of automatically detecting road potholes. In the works [3, 6] Methods for detecting object outlines based on points within the object are considered, but intensity variation within the object's internal zone is seen as a defect. Among the drawbacks, it is worth noting the high probability of errors in video recordings and the high cost of video equipment and paid analytic services. Additionally, it should be mentioned that standardized placement of video cameras on all vehicles is necessary to obtain high-quality data.

Another widespread solution is the use of client mobile applications and services for monitoring road damages, which are installed on drivers' smartphones. Most modern smartphones are already equipped with various sensors such as a camera, accelerometer, and GPS. The authors of works [7, 8] propose utilizing the built-in accelerometers and geolocation of mobile devices. They describe useful applications that automatically update real-time road condition information by gathering data from users and displaying it on a map. Users of these applications contribute to automated data collection, and developers obtain thousands of mobile data collection units. This is the most cost-effective solution in terms of material expenses, but technically, these local systems have the potential to be integrated into smart city systems for technical monitoring. Significant drawbacks include high energy consumption due to continuous active GPS sensor operation and the requirement for constant static device positioning throughout the entire movement. For technical monitoring systems, this can result in a decrease in the quality and reliability of the collected data, which are subject to analysis and decision-making on a city management scale. For users, the inability to use their mobile phones for their primary purpose may also cause more inconvenience than benefits.

The most promising class of solutions is the monitoring systems embedded in vehicles. The viability and effectiveness of such tools are supported by their adoption by major automobile manufacturers, including Volvo, Ford, and Jaguar. According to information from open sources [9], these companies propose similar concepts for monitoring road conditions, utilizing sensors and detectors placed under the vehicles. The sensors communicate with the onboard computer, which, upon detecting problematic areas, generates control actions to enhance driving comfort on uneven roads, such as reducing speed or adjusting the suspension configuration. Simultaneously, information about identified road issues is sent to cloud storage with location coordinates. This information is used to provide early warnings to other drivers about traffic complications on specific road segments. Among the implementation challenges is real-time responsiveness, which is complicated by the reliance on cloud services to access previously collected information. This incurs significant time costs for data retrieval and decision-making, which is critical for proactive response systems. The advantages of the discussed concept, when vehicles exchange information about poor road sections through a shared database, include hypothetical easy integration into smart city systems based on the Internet of Things. However, existing commercial solutions can be problematic for widespread use, as both the reviewed technologies and cloud data storage are localized for each individual automobile brand and not readily accessible.

Both built-in vehicle diagnostic systems and mobile devices commonly utilize measurements of linear acceleration from accelerometers to detect problematic road sections [2, 7, 8]. However, the main challenge associated with using accelerometers to assess linear acceleration is the inability to accurately evaluate the road conditions solely based on accelerometer measurements [10]. As a result, classification of accelerometer data is required to determine the nature of road defects [10].

To address the complex tasks of analyzing a large number of measurements and classifying accelerometer data, modern literature sources describe intelligent data processing methods [6, 11, 12]. The authors of these works emphasize the importance of specific data preprocessing for analysis, the relevance of modern methods of intelligent analytics using neural networks, dataset preparation, and neural network training.

In existing road condition monitoring systems, there are common problems such as equipment inconvenience, the complexity of data collection and analysis processes, additional energy consumption, high equipment costs, and significant labor requirements. In terms of operational efficiency, challenges include processing large volumes of data in real-time, accuracy, and reliability of the obtained results. The localization and commercialization of existing solutions also pose obstacles to integrating monitoring systems into the paradigm of smart cities based on IoT technologies. Based on the aforementioned issues, conducting research in the development and improvement of road condition monitoring systems with integration capabilities into smart city maintenance systems based on IoT is relevant and justified.

3. The research's purpose and goals. The aim of the research is to develop approaches and tools for automated data collection from IoT devices for road condition monitoring systems. The implementation of the research goal aims to improve the efficiency of data collection, transmission, and aggregation from sensors in road condition monitoring systems. The objectives are to enhance the convenience of data collection approaches, increase the accuracy and reliability of measurements, and generate aggregated datasets for further real-time processing by intelligent analytics systems. Achieving the research goal and objectives will help improve the architecture of smart city monitoring systems based on IoT technologies and enhance the performance of time-critical applications, particularly for road condition monitoring.

To achieve this aim, the following tasks were set:

- Develop an architectural and functional concept of a road condition monitoring system with the ability to integrate into scalable IoT networks capable of efficient data collection and aggregation for real-time processing at the IoT network edge.
- Develop a complex of software and hardware tools for data collection and aggregation from IoT devices to implement the architectural and functional concept of the road condition monitoring system.

4. Data and methods of the research

4.1. Justification for sensor selection for monitoring linear acceleration indications.

The object of the research is the processes of data collection and processing related to the quality of road surfaces in IoT networks. Considering the need for automated collection of a large number of parameters from IoT sensors and the high computational complexity of real-time processing algorithms, the task arises to select hardware for effectively addressing these challenges. The solutions to these tasks are based on choosing software and hardware that meet the requirements of accuracy, high performance, ease of configuration and programming, low cost, mass production, and availability in the electronics market.

The quality and accuracy of the final results significantly depend on the reliability of the data obtained from IoT sensors. Accelerometers are typically used to measure linear acceleration. Three-axis MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) accelerometers belong to the modern family of "nano" MEMS and cover a wide range of tasks. The efficiency of MEMS accelerometers in terms of measurement quality and integration into IoT systems has

been investigated in [13], and their usefulness has been justified. Among the advantages are small size and low cost compared to analogues, high accuracy of the sensors suitable for projects of any complexity, and wide usage in the microelectronics market.

For the research, the LIS3DSH accelerometer from STMicroelectronics (a European multinational company based in France and Italy) [14] was used. The company's products are known for their high quality and come with openly available official documentation. According to the documentation [14], the LIS3DH is a high-performance three-axis linear accelerometer with low power consumption, compact size, and affordable price. The LIS3DH accelerometer has a standard I2C/SPI digital serial interface and can measure acceleration with data output rates ranging from 1 Hz to 5.3 kHz simultaneously along three axes. The available scales of $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$ can be dynamically configured for different power-saving modes or other needs. The device also features low-power, extended energy-saving modes, and smart embedded functions, withstanding overloads up to 10,000 g. The selectable measurement scales are a specific advantage for the research, providing the ability to dynamically configure different ranges of boundary values. The SPI serial peripheral interface allows for connecting a large number of peripheral devices.

4.2. Justification of technologies for the implementation of a device for collecting and aggregating IoT data from peripheral sensors

The efficiency of implementing hardware solutions for data collection and aggregation in IoT is another important factor that determines the speed of result generation. The choice of data processing processor requires high-speed performance, low power consumption, speed and ease of configuration and software development, wide availability, and affordable cost. For real-time task solutions, efficient interrupt handling mechanisms for a large number of peripheral devices and high-speed communication means are critical for processors.

Two technologies have been considered, which belong to different product lines in terms of performance and functional purpose. Firstly, the use of affordable and popular Arduino boards [10] has been examined, which meet the requirements of low cost, ease of development, and open-source software. However, their usage would require complex assembly of additional functional modules, including connecting the accelerometer to the board using wires. On the other hand, Raspberry Pi mini-computers [15] have been explored, which are based on quad-core ARM Cortex-A processors. This satisfies the requirement for high performance and the execution of computationally intensive tasks by being capable of running general-purpose operating systems. The Raspberry Pi board has a wide range of IoT applications and is based on energy-efficient technologies. It is often used for implementing audio systems, weather stations, personal computers, and servers. However, the Raspberry Pi board clearly exceeds the needs for solving the given tasks. In both cases, there is an increase in cost and development complexity.

STM32 controllers are specialized high-performance systems equipped with digital signal processors and designed for real-time signal processing [16]. These controllers are characterized by high performance and low power consumption. They have efficient interrupt-handling capabilities and high-speed interfaces for data exchange. The developer also provides high-level APIs for programming in languages like C and C++, as well as other tools for configuration, programming, and debugging.

For the aggregation and preliminary processing of IoT data obtained from the accelerometer, the STM32F407vg family controller is used. The STM32F407vg controller already has the LIS3DSH digital accelerometer integrated. Additionally, this controller includes the necessary interfaces for data exchange and provides a large number of general-purpose input/output ports. Choosing products from the same manufacturer simplifies the configuration, development, and programming of the system.

4.3. Deploying the development environment and configuring the controller

For the development of hardware drivers, the Keil uVision development environment and the low-level programming language C was used. The Keil uVision development environment includes a set of specialized utilities for programming microcontrollers, including those from

the STM microcontroller family. The choice is justified by the convenience of working with the development environment and the optimization of compiled code, which ensures high speed and minimal delays in the operation of the drivers.

The STM32CubeMX development environment was used to configure the STM32F407vg controller. Controller configuration refers to setting up the device in its operational state, configuring the appropriate values in the processor's software registers, setting the clock frequency, activating interfaces, defining the operating modes of input/output ports, and performing a set of other configurations. STM32CubeMX is a graphical interface tool developed by STMicroelectronics specifically for automatic configuration of STM32 devices and generating C language source code for the ARM Cortex-M core.

5. Results of the study of automated IoT data collection tools

5.1. Development of the architectural concept of the IoT road surface condition monitoring system and hardware for its implementation

According to the proposed architectural concept, the IoT monitoring system is considered at an architectural level, which describes the composition and interaction of the main structural components of the system. The functional components of the system are implemented through a combination of hardware and software. An overview of the system architecture is presented in figure 1.

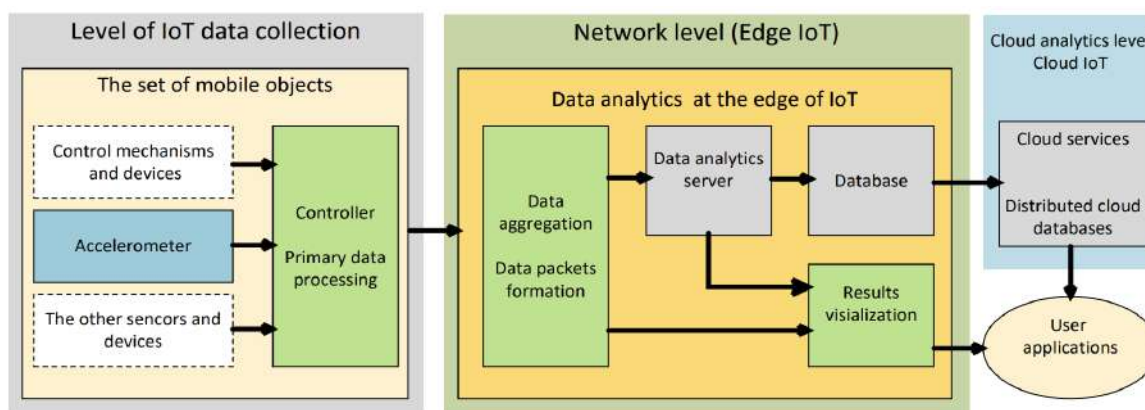


Figure 1. Structural diagram of the IoT road condition monitoring system

At the data collection level, there is a set of mobile objects, each of which contains a sensor that measures linear acceleration or other sensors and actuators. Each of these objects contains a controller that reads data from the accelerometer, performs filtering, and forms data packets that are transmitted to the analytics server for further processing. The role of the mobile object is performed by a vehicle that carries the appropriate equipment and moves in any direction within a specific IoT infrastructure area.

The data collection device is implemented on the STM32F4 DISCOVERY board. The structural diagram of the data collection subsystem is presented in Fig. 2. The STM32F4 DISCOVERY board includes necessary components, including the LIS3DSH accelerometer sensor. The sensor is interfaced with the system using the Serial Peripheral Interface (SPI). The SPI bus enables fast communication between the controller and peripheral devices and allows for the connection of multiple sensors, facilitating potential expansion of the monitoring system's functionality. The micro USB port on the board is used to transmit information to the server. A cable is used to connect the micro USB port on the board to the USB port of a computer. The server reads the data in COM port mode.

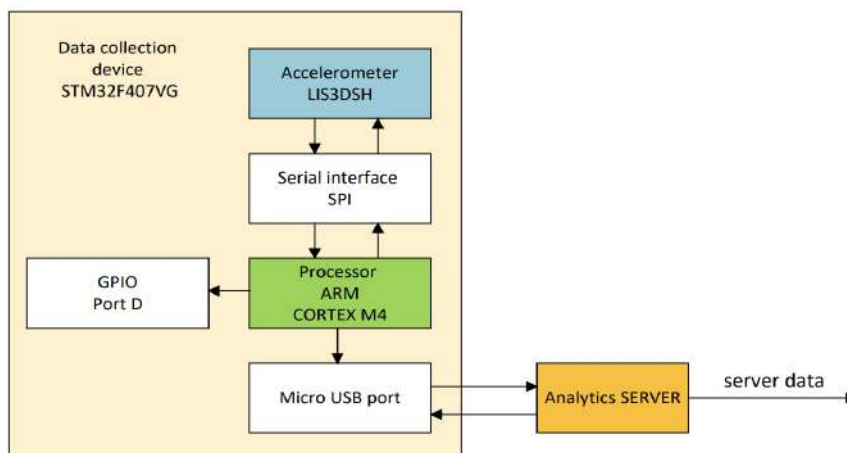


Figure 2. Block diagram of the data collection and analytics system

During the initialization of the data collection subsystem, its functionality is checked. By querying the control bits and the working state of the ports, the subsystem verifies its operability. Peripheral devices are configured, the SPI bus is initialized, and communication with the server is established. In the case of non-critical errors, the system is restarted, while in critical situations, the system operation is halted. In emergency situations, a red LED on the board is activated to indicate a system malfunction.

For the adequacy and accuracy of the data obtained based on accelerometer measurements, as mentioned earlier, the device's horizontal position is critical. The accelerometer sensor should be oriented parallel to the road surface in the vehicle. LED indicators on the board are used for device position calibration. The correct position is considered when all four LEDs are turned off, indicating that the readings obtained from the sensor can be considered relevant. Calibration of the correct device position for data collection is performed after board firmware and system initialization.

Figure 3 illustrates experiments that demonstrate the proposed methodology of using LEDs for device calibration during changes in position relative to the horizontal axis. In the correct device position, all LEDs are turned off. In positions "A" and "B," the sensor is tilted relative to the x-axis, while in positions "C" and "D," it is tilted relative to the y-axis. If one or more LEDs are lit, it indicates incorrect board placement, requiring manual adjustment of its position.

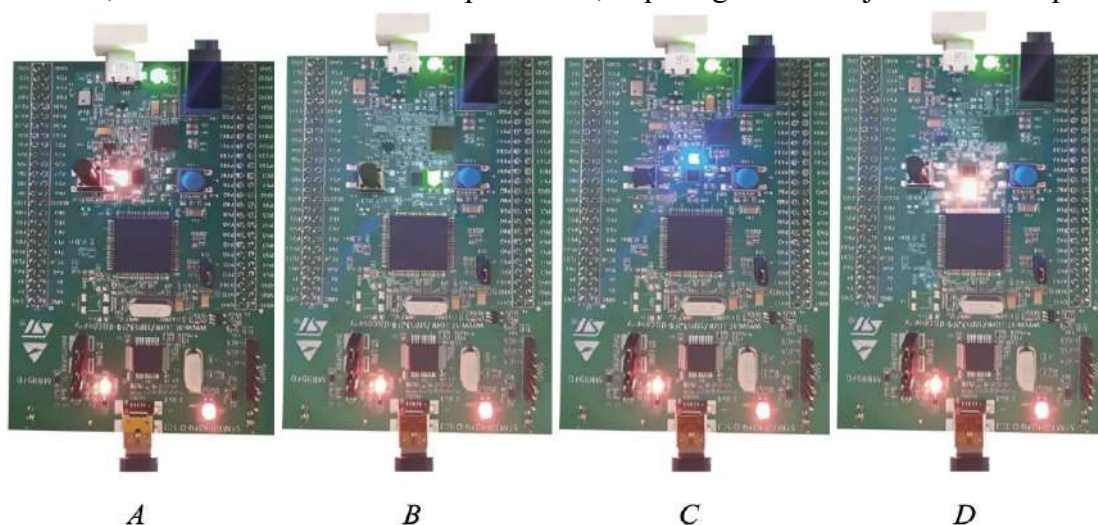


Figure 3. Calibration of the correct device position:
 A – tilt to the left relative to the X-axis; B – tilt to the right relative to the X-axis;
 C – tilt backward relative to the Y-axis; D – tilt forward relative to the Y-axis

Data collection from the linear acceleration sensor begins after the device has been configured and calibrated. The controller reads linear acceleration values from the three-axis accelerometer and transmits data packets through the SPI bus via the micro USB port to the data analytics server in serial COM port mode. On the server side, the data is converted to standard measurement units. The data received on the COM port is in hexadecimal format and is then converted to decimal values in units of measurement of $g=9.8 \text{ m/s}^2$. Next, frames of sequential accelerometer measurements of the appropriate size are formed and aggregated in the server's database for further analysis.

The aggregation, analytics, and visualization server (server) is implemented on a personal computer (PC) during the experimental stage. To operate the server software, it is necessary to connect the device to the computer via the USB interface.

5.2. Software complex for collecting and aggregating IoT data

As part of the functional implementation of the architectural concept, a software suite has been developed, which consists of the following components:

- Data collection software: drivers for connecting the accelerometer to the controller, a data collection device from the accelerometer on the controller, and communication tools between the data collection device and the server.
- Server software: data aggregation and monitoring system server, server software for testing and visualization of results with a graphical user interface.

The data collection device is implemented on the STM32F4 controller. After configuring the controller, an executable project file called main.c is obtained, which represents the working block of the program. The file contains the main() function, which is executed at project start, as well as functions for initializing general input/output ports, the SPI interface, system clock settings, and error monitoring functions. To flash the controller, the board is connected to the host computer. The compiled project is then loaded onto the STM32F4 DISCOVERY board using the programming tools provided by the STM32CubeMX development environment.

The server software consists of software modules for data aggregation, analytics, and visualization of results (Fig. 1). The aggregation module creates frames of sequential accelerometer measurements, which are stored in the server's database. The data visualization software module displays the data read from the COM port in a convenient graphical format.

The server for experimental data analytics consists of a roughness classification module (classifier). The classifier processes the aggregated data frames on the server and classifies them using simplified experimental algorithms. The purpose of this classifier is to assess the suitability of the prepared data formats for further processing, including the application of trained neural networks. The classifier generates specific analytical results, which are stored on the server and can also be transmitted to the cloud for further use and analysis. The operation of the classifier is described in detail in reference [10].

Software with a graphical user interface has been developed for visualizing the results of data aggregation and experimental processing on the analytics server. The results are displayed in the form of graphs showing the change in vertical acceleration along the three axes of the accelerometer. The developed software has communication interfaces with both the analytics server tools and the data collection device, in the form of user buttons within the graphical interface.

The server-side software is implemented using the PyQt library for graphical user interface development in the Python programming language. The pySerial library is used for communication with the COM port, and the matplotlib library is used for graphical representation of data. The Qt Designer program was utilized to configure the visual display of the classifier's results, which offers a wide range of options for customizing the graphical interface.

The graphical interface consists of a menu for selecting the COM port, scales for displaying linear acceleration values on different coordinate axes, a dynamic graph of the acceleration values along the Z-axis, and digital indicators displayed above it. The data is presented in real-

time in various visualizations. The overall layout of the graphical interface for the Accelerometer Port Monitor module, which displays the state and classification of road surfaces, is shown in Figure 4. On the left side, the measurement results along the three accelerometer axes are displayed, and real-time graphs are plotted for the three projections. On the right side, there are four indicators representing the condition of the road surface: green for a level road, yellow for speed bumps, railroad crossings, or potholes, orange for small potholes or cobblestones, and red for accident zones or large potholes. The classification is implemented using a software classifier model, which is described in detail in the reference [10]. The indicators are illuminated according to the identified types of road surface irregularities determined by the classifier.

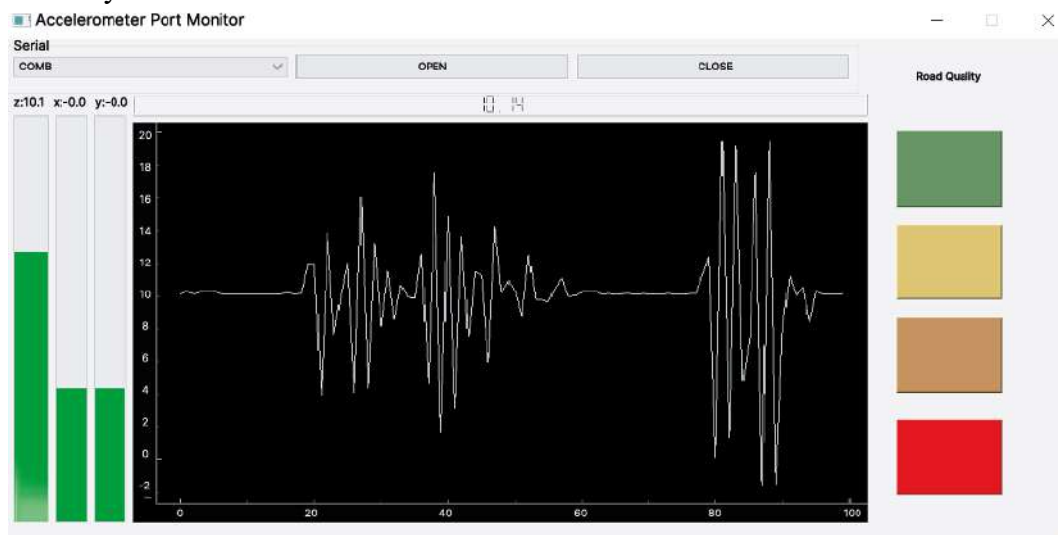


Figure 4. An example of the graphical interface

The developed module for visualizing road conditions on Google Maps is designed to visualize the experimental results of data processing in user applications. However, the current experimental prototype lacks a GPS sensor and a wireless network interface for communication with the server. To accommodate the experimental implementation, certain abstract simplifications have been made. For example, communication with the server is realized using a COM port, and GPS navigation data is obtained from the server-side PC to determine the position.

During the experimental testing of the device with accelerometer measurements visualization, it was assumed that the acceleration readings are influenced by inertial forces that cause the device to deviate from its equilibrium state. In figure 5, which visualizes the rotations and tilts of the board, the displacement of the graphs along different axes can be observed during the tilting of the board in corresponding directions.

To indicate the position of the data collection device, LEDs were used on the board. This function was implemented for system calibration during initialization (Figure 3). Experiments involving tilting the board and visualizing it in the graphical interface determined, for example, that the green LED LD4 is activated when the device deviates along the X-axis by more than -200 units (one unit corresponds to 0.06 mg according to the documentation). Therefore, the calculated sensitivity of the adjusted system to tilts is 12 mg, which corresponds to 0.1176798 m/s^2 . Tilts of the device were performed backward and forward along the X-axis, and the corresponding changes along that axis were displayed in the console (Figure 6). The maximum acceleration of 10110 units was recorded during tilting the board backward along the X-axis, and the maximum acceleration of 13395 units was recorded during tilting it forward along the X-axis. Thus, the calculated acceleration values were 606.6 mg and 803.6 mg due to inertial effects along the X-axis, representing the maximum and minimum deviations from the equilibrium state.

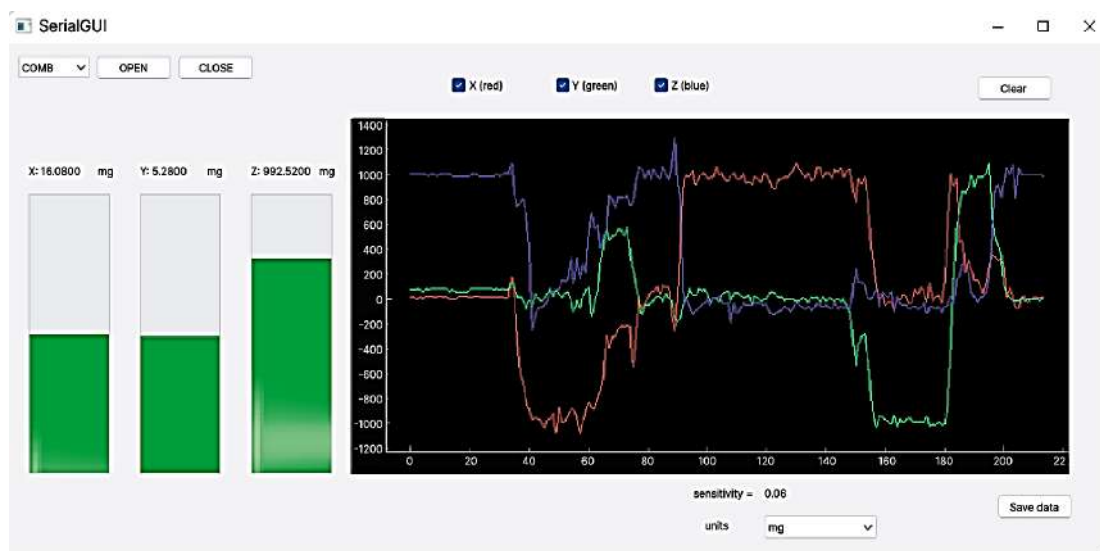


Figure 5. Influence of inertial forces on acceleration rates

The results of similar experiments along the Y-axis showed that the maximum and minimum acceleration deviations from the equilibrium state along the Y-axis correspond to 444.46 mg and 414.48 mg, respectively. Thus, the characteristics of the inertial forces affecting the device have been assessed.

X: -00004	Y: -00261	Z: 016752	X: 000027	Y: 006725	Z: 015012
X: -00031	Y: 000005	Z: 016738	X: 000498	Y: 002253	Z: 016579
X: -00038	Y: 000009	Z: 016744	X: 000511	Y: -00066	Z: 016277
X: -00054	Y: -00259	Z: 016764	X: 000831	Y: 000152	Z: 016512
X: -01306	Y: -00347	Z: 016359	X: 000858	Y: 000584	Z: 016753
X: -06148	Y: -00326	Z: 015351	X: 003308	Y: -00681	Z: 016357
X: -08878	Y: -00171	Z: 013838	X: 010514	Y: -01380	Z: 013360
X: -09409	Y: -00190	Z: 013482	X: 013297	Y: -02236	Z: 009526
X: -09746	Y: -00214	Z: 013668	X: 013395	Y: -01945	Z: 009373
X: -10034	Y: -00372	Z: 013324	X: 013530	Y: -01401	Z: 009813
X: -09874	Y: -00561	Z: 013052	X: 013047	Y: -00826	Z: 009967
X: -10110	Y: -00228	Z: 013380	X: 012794	Y: -00840	Z: 010137
X: -10070	Y: -00232	Z: 013408	X: 012797	Y: -01118	Z: 010618
X: -09979	Y: -00525	Z: 013004	X: 012617	Y: -01028	Z: 011048
X: -09983	Y: -00560	Z: 013051	X: 012211	Y: -00948	Z: 010814
X: -09911	Y: -00555	Z: 013331	X: 012556	Y: -00688	Z: 011185
X: -09963	Y: -00540	Z: 013018	X: 011281	Y: -01124	Z: 011671
X: -08052	Y: -00543	Z: 015253	X: 008983	Y: 000585	Z: 013938
X: -04944	Y: 000116	Z: 015826	X: 004762	Y: 000229	Z: 015670
X: -00255	Y: 000288	Z: 016746	X: 000750	Y: -00676	Z: 016999
X: -00023	Y: 000009	Z: 016732	X: -00079	Y: -01092	Z: 016704
X: -00029	Y: -00259	Z: 016735	X: -00087	Y: 000008	Z: 016620
X: 000262	Y: -00265	Z: 016755	X: -00065	Y: 000007	Z: 016751
X: -00058	Y: 000016	Z: 016755			

Figure 6. Changes in the X-axis values when the position of the of the data acquisition device: forward and backward tilt

Based on the visualization of the processed aggregated accelerometer measurements in the SerialGUI software interface, as shown in the graph (Figure 5), it was possible to identify the device's position and state at different time intervals as follows:

- Tilting of the board in different directions is identified as sinusoidal patterns. The gradual increase in values corresponds to an increase in the tilt angle, while the decrease in values corresponds to returning to the equilibrium state.
- Shaking of the board is identified as segments on the graph with sharp changes in values.

– Flipping of the device is characterized by a sudden change in the Z-axis value from 1000 mg to -1000 mg.

– Resting state is characterized by values close to zero for X and Y axes, and close to 1000 mg for the Z-axis.

– Impacts on the board are characterized by sudden variations along one of the accelerometer axes and a return to the initial state within a short time interval.

6. Analysis of the results of the study of IoT data collection and aggregation tools

The proposed architectural and functional concept of the IoT monitoring system is designed to be easily integrated into a large-scale smart city maintenance system based on IoT technologies. As depicted in Figure 1, the proposed concept aligns perfectly with the IoT paradigm. At the data collection and aggregation level, there is a set of sensors, detectors, and control devices for feedback. The Internet level facilitates communication between the hardware and server components, as well as connectivity with cloud services and technologies. Modern IoT technologies strive to implement edge computing, so the implementation of the server component for intelligent data analytics is considered at the edge of the IoT network.

Within the proposed concept, the task of automating the collection of data on road quality is addressed by installing inexpensive devices on user vehicles, in contrast to the approaches discussed in references [6, 9]. An autonomous embedded system has been implemented to collect and perform initial processing (aggregation) of acceleration measurements from the accelerometer. The hardware implementation is based on high-performance and cost-effective off-the-shelf boards. These boards feature specialized processors and high-precision embedded accelerometers. As a result, the developed IoT data collection device conforms to standard IoT network integration methods while meeting the requirements of low cost and availability.

The data collection devices are installed on user vehicles or public transportation vehicles for the purpose of collecting and transmitting data to the server for further analysis. Unlike local monitoring systems [6-9], these mobile nodes, moving through different regions, address the task of dynamic and scalable monitoring of large and, in general, technically unlimited volumes of road surfaces. Data on the state of the road surface, along with the vehicle's coordinates, are transmitted to the server for generating analytical insights. The analytical information is stored on the server and in distributed cloud databases for future use. The road surface database can be utilized by road authorities to assess road conditions and also by user applications to provide drivers with early warnings and alerts.

The implementation of network interfaces and the specifics of network communication between the data collection device and the server are beyond the scope of the research topic, so certain abstract simplifications have been made. For example, communication with the server is implemented using a COM port (Figure 2), and GPS navigation data is obtained through the server PC. As a continuation of the research, there are plans to migrate the server component to specialized hardware. In the context of further research, there is a need to develop distributed intelligent analytics tools to address the scalability of the IoT monitoring system, which was conceptually considered based on the proposed methods in this study. The conditions for seamless integration into IoT systems, which are met by the developed tools, will enable the realization of such scalable monitoring systems in the future.

The hardware and software complex was implemented as an experimental prototype system for monitoring the condition of the road surface. The software consists of server programs for data processing based on a neural network, which includes a classifier module, a system control module, a visualization module with a graphical interface, a navigation module, and a user application. Experiments were conducted to configure the hardware and software and test the proposed means of aggregating accelerometer data for further analysis. The experiments showed that the developed prototype is functional and responds promptly to road irregularities in

real time. The graphs in Figure 4 display the road surface profile during vehicle movement, and the classifier detects the type of irregularities and displays them using indicators on the graphical interface. During testing, it was demonstrated that the highlighting of the classifier indicators is reflected on the map by marking the corresponding color (Figure 5). Thus, drivers in the user application can choose a route based on the quality of the road surface, while municipal services can use the application to track problematic areas that require repair. The database can also be used for planning vehicle routes, taking into account poor road conditions.

Based on the obtained research results of linear acceleration indicators and testing of the prototype, it can be concluded that the proposed solution demonstrates excellent performance compared to analogs. The embedded system has very low power consumption compared to smartphone-based systems. The accuracy of the monitoring system is sufficiently high, and expanding the database of linear indicators will allow for the enlargement of the training dataset, thus further enhancing the precision of intelligent analytics.

One of the drawbacks is the need for proper device placement to obtain relevant results. This issue was addressed by fixing the device in place. However, as an assumption for further research, it was assumed that when the device deviates from its balanced state, inertial forces occur, which affect the acceleration indicators. This assumption was experimentally validated using the developed visualization programs on different datasets. The investigation of the impact of inertial forces on the acceleration indicators during device deviations along the X and Y axes allowed for the identification of changes in the board's position in the absence of fixation. The obtained data requires further research and validation to incorporate the consideration of inertial forces for improving the classifier's accuracy and reducing dependence on device placement in the vehicle. Based on the consideration of inertial forces, certain correction mechanisms are planned to be implemented by recalculating the acceleration indicators relative to the static coordinate system.

7. Summary

1. The proposed architectural-functional concept of the road condition monitoring system allows for the improvement of existing monitoring systems by:

- Automating the collection and processing of information about the road condition, minimizing human and material resources.
- Enabling dynamic and scalable monitoring, analyzing and storing reliable information about the road condition in large and virtually unlimited databases, and creating an overall map of the road condition.
- Utilizing autonomous, inexpensive, and widely accessible embedded systems for collecting IoT data about the road condition, providing a cost-effective and straightforward integration into a large IoT network, particularly in smart city maintenance systems.
- Enhancing real-time data processing efficiency by performing data aggregation for implementing analytics at the IoT network edge, including intelligent analytics.

2. The architectural concept of the IoT road condition monitoring system has been implemented as a complex of hardware and software tools for data collection and aggregation. Based on this concept, an experimental prototype of the monitoring system has been developed. The experiments demonstrated that the proposed IoT monitoring tools are capable of promptly detecting road defects.

References

1. Nkoro, A.B., & Vershinin, Y.A. (08-11 October 2014). Current and future trends in applications of Intelligent Transport Systems on cars and infrastructure. *Proceeding of 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (pp. 514-519). Qingdao, China. doi:10.1109/ITSC.2014.6957741.

2. Bhamare, L., Mitra, N., Varade, G., & Mehta, H. (02-02 October 2021). Study Of Types of Road Abnormalities and Techniques Used for Their Detection. *Proceeding of 7th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE)* (pp. 472-477). Malang, Indonesia. doi:10.1109/ICEEIE52663.2021.9616755.

3. Bishop, R. (05-05 October 2000). A survey of intelligent vehicle applications worldwide. *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000 (Cat. No.00TH8511)* (pp. 25-30). Dearborn, MI, USA. doi: 10.1109/IVS.2000.898313.

4. Wang, C., Wu, J., Zheng, X., & Pei, B. (2021). Leveraging ICN With Network Sensing for Intelligent Transportation Systems: A Dynamic Naming Approach. *IEEE Sensors Journal*, 21(14), 15875-15884. doi:10.1109/JSEN.2020.3004839.

5. Toth, C., Paska, E., & Brzezinska, D. (2008). Using Road Pavement Markings as Ground Control for Lidar Data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII(B1). <https://www.researchgate.net/publication/>.

6. Wiratmoko A.D., Syaqui A.W., Handika M.S., & Nurizki D.B. (2019). Design of Potholes Detection as Road's Feasibility Data Information Using Convolutional Neural Network(CNN). *Proceeding of 2019 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD)* (pp. 1-5). doi:10.1109/ISESD.2019.8909461.

7. Agrawal, H., Gupta, A., Sharma, A., & Singh, P. (10-12 November 2021). Road Pothole Detection Mechanism using Mobile Sensors. *2021 International Conference on Technological Advancements and Innovations (ICTAI)* (pp. 26-31). doi:10.1109/ICTAI53825.2021.9673193.

8. Eriksson, J., Girod, L., Hull, B., Newton, R., Madden, S., & Balakrishnan, H. (2008). The Pothole Patrol: Using a Mobile Sensor Network for Road Surface Monitoring. *Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys '08)* (pp. 29-39).

9. Williams, M. (2015). *Volvo cars to start talking to each other*. <https://www.computerworld.com/article/2892095/volvo-cars-to-start-talking-to-each-other.html>.

10. Kopiika, A., Piskun, R., Tkachenko, V., & Klymenko, I. (2020). Road monitoring system based on IoT technology for SmartCity. *Information, Computing and Intelligent systems*, 1, 60-67. doi:10.20535/2708-4930.1.2020.216061.

11. Hoffmann, M., Mock, M., & May, M. (2013). Road-quality classification and bump detection with bicycle-mounted smartphones. *Proceedings of the 3rd International Conference on Ubiquitous Data Mining*, 1088, 39-43. <http://www.ceur-ws.org>.

12. Ayachi, R., Afif, M., Said, Y., & Abdelali, A.B. (28-30 May 2022). Traffic Sign recognition for smart vehicles based on lightweight CNN implementation on mobile devices. *Proceeding of 2022 IEEE 9th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT)* (pp. 12-18). doi:10.1109/SETIT54465.2022.9875912.

13. Landi, E., Parri, L., Moretti, R., & Fort, A. (2022). High Performance Analog MEMS for IoT Based Condition Monitoring, Characterization with a Bearing Failure Emulation Test Bench. *2022 IEEE International Workshop on Metrology for Automotive (MetroAutomotive)* (pp. 1-5). doi:10.1109/MetroAutomotive54295.2022.9855179.

14. LIS3DH - 3-axis MEMS accelerometer, ultra-low-power, $\pm 2g/4g/8g/16g$ full scale, high-speed I2C/SPI digital output, embedded FIFO, high-performance acceleration sensor, LGA 16 3x3x1.0 package – STMicroelectronics. <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lis3dh.html>.

15. Kulkarni, A.M., & Baligar, V.P. (05-07 March 2020). Real Time Vehicle Detection, Tracking and Counting Using Raspberry-Pi. *2020 2nd International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA)* (pp. 603-607). doi: 10.1109/ICIMIA48430.2020.9074944.

16. Chen, K., Lu, M., Fan, X., Wei, M., & Wu, J. (17–19 August 2011). Road condition monitoring using on-board three-axis accelerometer and GPS sensor. *Proceedings of the 2011 6th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM)* (pp. 1032-1037).

Список використаних джерел

1. Nkoro A. B. Current and future trends in applications of Intelligent Transport Systems on cars and infrastructure / A. B. Nkoro, Y. A. Vershinin // *Proceeding of 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (Qingdao, China, 08-11 October 2014). – 2014. – Pp. 514-519. DOI: 10.1109/ITSC.2014.6957741.

2. Bhamare L. Study Of Types of Road Abnormalities and Techniques Used for Their Detection / L. Bhamare, N. Mitra, G. Varade, H. Mehta // Proceeding of 7th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE) (Malang, Indonesia, 02-02 October 2021). – 2021. – Pp. 472-477. DOI: 10.1109/ICEEIE52663.2021.9616755.
3. Bishop R. A survey of intelligent vehicle applications worldwide / R. Bishop // Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000 (Cat. No.00TH8511) (Dearborn, MI, USA, 05-05 October 2000). – 2000. – Pp. 25-30. DOI: 10.1109/IVS.2000.898313.
4. Leveraging ICN With Network Sensing for Intelligent Transportation Systems: A Dynamic Naming Approach / C. Wang, J. Wu, X. Zheng. B. Pei and all // IEEE Sensors Journal. – 2021. – Vol. 21, Is. 14, 15 July. – Pp. 15875-15884. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3004839.
5. Toth C. Using Road Pavement Markings as Ground Control for Lidar Data [Electronic resource] / C. Toth, E. Paska, D. Brzezinska // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. (Beijing, China, 3-11 Jul). – 2008. – Vol. XXXVII, Part B1. – Access mode: <https://www.researchgate.net/publication/>.
6. Design of Potholes Detection as Road's Feasibility Data Information Using Convolutional Neural Network(CNN) / A. D. Wiratmoko, A. W. Syauqi, M. S. Handika, D. B. Nurriszki and all // Proceeding of 2019 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD) (Badung, Indonesia, 2019). – 2019. – Pp. 1-5. DOI: 10.1109/ISESD.2019.8909461.
7. Road Pothole Detection Mechanism using Mobile Sensors / H. Agrawal, A. Gupta, A. Sharma, P. Singh // 2021 International Conference on Technological Advancements and Innovations (ICTAI) (Tashkent, Uzbekistan, 10-12 November 2021). – 2021. – Pp. 26-31. DOI: 10.1109/ICTAI53825.2021.9673193.
8. The Pothole Patrol: Using a Mobile Sensor Network for Road Surface Monitoring / J. Eriksson, L. Girod, B. Hull, R. Newton, S. Madden, H. Balakrishnan // Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys '08). – New York, 2008. – Pp. 29-39.
9. Williams M. Volvo cars to start talking to each other [Electronic resource] / M. Williams. – Access mode: <https://www.computerworld.com/article/2892095/volvo-cars-to-start-talking-to-each-other.html>.
10. Road monitoring system based on IoT technology for SmartCity / A. Kopiika, R. Piskun, V. Tkachenko, I. Klymenko // Information, Computing and Intelligent systems. – 2020. – No. 1. – Pp. 60-67. DOI: 10.20535/2708-4930.1.2020.216061.
11. Hoffmann M. Road-quality classification and bump detection with bicycle-mounted smartphones [Electronic resource] / M. Hoffmann, M. Mock, M. May // Proceedings of the 3rd International Conference on Ubiquitous Data Mining. – 2013. – Vol. 1088. – Pp. 39-43. – Access mode: <http://www.ceur-ws.org>.
12. Traffic Sign recognition for smart vehicles based on lightweight CNN implementation on mobile devices / R. Ayachi, M. Afif, Y. Said, A. B. Abdelali // Proceeding of 2022 IEEE 9th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT) (Hammamet, Tunisia, 28-30 May 2022). – 2022. – Pp. 12-18. DOI: 10.1109/SETIT54465.2022.9875912.
13. High Performance Analog MEMS for IoT Based Condition Monitoring, Characterization with a Bearing Failure Emulation Test Bench / E. Landi, L. Parri, R. Moretti, A. Fort and all // 2022 IEEE International Workshop on Metrology for Automotive (MetroAutomotive) (Modena, Italy, 2022). – 2022. – Pp. 1-5. DOI: 10.1109/MetroAutomotive54295.2022.9855179.
14. LIS3DH - 3-axis MEMS accelerometer, ultra-low-power, $\pm 2g/4g/8g/16g$ full scale, high-speed I2C/SPI digital output, embedded FIFO, high-performance acceleration sensor, LGA 16 3x3x1.0 package - STMicroelectronics [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lis3dh.html>.
15. Kulkarni A. M. Real Time Vehicle Detection, Tracking and Counting Using Raspberry-Pi / A. P. Kulkarni, V. P. Baligar // 2020 2nd International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA) (Bangalore, India, 05-07 March 2020). – 2020. – Pp. 603-607. DOI: 10.1109/ICIMIA48430.2020.9074944.
16. Road condition monitoring using on-board three-axis accelerometer and GPS sensor / K. Chen, M. Lu, X. Fan, M. Wei, J. Wu // Proceedings of the 2011 6th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM), Harbin, (China, 17–19 August 2011). – 2011. – Pp. 1032-1037.

Отримано 12.06.23

Сергій Нікольський¹, Ірина Клименко²¹аспірант кафедри обчислювальної техніки

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: serhiy.nikolskiy@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4893-3339>²доктор технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: ikliryna@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5345-8806>**ПРОЄКТУВАННЯ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЗБИРАННЯ ДАНИХ
ДЛЯ СИСТЕМ ІОТ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ**

Моніторинг стану дорожнього покриття – одне з актуальних завдань технічного обслуговування розумного міста. Ефективна система моніторингу дозволить підвищити комфорт водіїв, якість життя та зменшити використання людських та матеріальних ресурсів.

У відомих системах моніторингу стану дорожнього покриття наявні загальні проблеми, на кшталт незручності користування устаткуванням, складності реалізації процесу збирання та аналізу даних, додаткових енерговитрат, високої вартості устаткування та значних трудовитрат. Серед проблем ефективності функціонування, значними є проблеми швидкодії обробки великих обсягів даних у реальному часі, точності та достовірності отриманих результатів.

Метою дослідження є розроблення підходів та засобів до автоматизованого збирання даних з ІоТ пристроїв для систем моніторингу стану дорожнього покриття.

Для досягнення мети основним було розробити архітектурно-функціональну концепцію системи моніторингу стану дорожнього покриття з можливістю інтеграції в масштабовані мережі ІоТ та розробити комплекс програмно-апаратних засобів для збирання та агрегації ІоТ даних.

Запропонована архітектурно-функціональна концепція системи моніторингу стану дорожнього покриття, забезпечує можливість вдосконалення існуючих систем моніторингу шляхом автоматизації збирання та обробки інформації про стан дорожнього покриття, динамічного та масштабованого моніторингу, використання автономних, дешевих та широкодоступних вбудованих систем для збирання ІоТ даних про стан дорожнього покриття, підвищення ефективності обробки даних в реальному часі. Архітектурна концепція реалізована у вигляді комплексу програмно-апаратних засобів для збирання та агрегації ІоТ даних, на базі яких розроблено експериментальний прототип системи моніторингу.

Розроблені засоби дозволяють оперативно реагувати на нерівності дорожнього покриття на довільній місцевості, а формат агрегованих даних придатний для подальшого аналізу, в тому числі інтелектуального. Запропоновані засоби можуть бути використані в системах технічного обслуговування розумними містами з метою покращення якості водіння та упередження критичних ситуацій, пов'язаних з неякісними дорожнім покриттям.

Ключові слова: ІоТ; SmartCity; система моніторингу; дорожнє покриття; STM32.

Рис.: 6. Бібл.: 16.

Сергій Семендяй

аспірант

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: serhii_semendiai@icloud.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7751-5956>**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗПРОВОДОВИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В УМОВАХ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАСОБІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ**

У статті розглянуто деякі технології, що забезпечують автономність безпілотних літальних апаратів (БпЛА) на полі бою, методи підвищення ефективності каналів зв'язку БпЛА в умовах застосування засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ). Також розглянута розробка тестової моделі каналу зв'язку бездротових засобів передачі даних (БЗПД), призначена для відпрацювання технологій протидії засобам радіоелектронної боротьби (РЕБ) та навчання нейронної мережі.

Стаття присвячена проблемам створення методів та моделей, що використовують технології програмно визначеного радіо (SDR), когнітивного радіо та багаторівневу параметричну адаптацію кодових конструкцій турбокоду за допомогою штучного інтелекту для підвищення ефективності безпроводових систем передачі даних в умовах активного застосування засобів радіоелектронної боротьби через забезпечення достовірності інформації.

Ключові слова: когнітивне радіо; програмно визначене радіо; нейронні мережі; кодування; радіоелектронна боротьба; канал зв'язку; бездротові засоби зв'язку; аналіз спектра.

Рис.: 2. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Розроблення БпЛА, здатних працювати на полі бою без спеціально навченого обслуговуючого персоналу, має перспективи, і такі системи вже розробляються і тестуються в різних країнах світу.

Однією з основних тенденцій у розвитку БпЛА є збільшення автономності та зменшення необхідності в присутності оператора на місці. На сьогодні вже є БпЛА, які можуть виконувати певні завдання без оператора або з мінімальною його участю. Наприклад, деякі БпЛА можуть знаходити та розпізнавати об'єкти, планувати маршрути, здійснювати посадку та заряджання без допомоги людини.

Однак нині технології, що забезпечують повну автономність БпЛА на полі бою, все ще потребують подальшого розвитку та вдосконалення, особливо щодо рівня штучного інтелекту та машинного навчання, необхідного для того, щоб БпЛА могли приймати правильні рішення в мінливих умовах бойових дій.

Постановка проблеми. Розробка безпілотних літальних апаратів (БпЛА), здатних працювати на полі бою без спеціально навченого обслуговуючого персоналу, є досить перспективним напрямом конструювання. Такі БпЛА можуть виконувати широкий спектр завдань, включаючи розвідку, моніторинг, наведення вогню та інші функції, що раніше виконувалися людиною вручну.

У цій сфері активно розвиваються технології автономної навігації, штучного інтелекту та машинного навчання, що дає можливість БпЛА здійснювати складні задачі без прямого втручання з боку людини. Наприклад, розробники можуть створювати системи, що дозволяють БпЛА автоматично виявляти й розпізнавати об'єкти на землі, такі як техніка, будівлі тощо.

Проте важливо зазначити, що такі системи повинні бути досить надійними, безпечними та забезпечувати достатній рівень точності, щоб вони могли бути використані на полі бою. Крім того, важливими аспектами при розробці БпЛА для використання на полі бою є забезпечення безпеки та конфіденційності даних, зокрема даних керування та інформації про місцезнаходження.

Виробники безпілотних літальних апаратів висувають певні специфічні вимоги до радіоелектронного обладнання з метою забезпечення надійності та стабільності роботи системи зв'язку. Основні вимоги включають таке:

- радіообладнання повинно бути енергоефективним, щоб забезпечити тривалий час польоту БПЛА;
- система зв'язку повинна мати високу чутливість для забезпечення якісного зв'язку на великій відстані;
- радіообладнання повинне підтримувати роботу у широкому діапазоні частот для забезпечення гнучкості вибору каналів зв'язку;
- радіообладнання повинне бути захищеним від зовнішніх електромагнітних завад та не впливати на роботу інших електронних приладів на борту БПЛА;
- зв'язок повинен забезпечувати достатню швидкість передачі даних для реалізації завдань, пов'язаних з розвідкою, спостереженням, а також для керування БПЛА;
- радіообладнання повинне забезпечувати високу достовірність передачі даних для забезпечення якісного відеозв'язку, а також інформації про точне місцезнаходження БПЛА;
- радіообладнання повинне бути сумісним з іншими елементами БПЛА, такими як датчики, навігаційні системи, системи стабілізації, щоб забезпечити їх спільну роботу.

Діапазон радіочастот, що використовується для БПЛА, може різнитись залежно від конкретної моделі і її призначення. Зазвичай БПЛА використовують частотний діапазон від 900 МГц до 5,8 ГГц, який забезпечує достатню швидкість передачі даних і надійне з'єднання між пультом управління та БПЛА.

Для безпеки в повітрі й уникнення перебоїв у роботі інших систем радіозв'язку, у багатьох країнах є обмеження на використання певних діапазонів радіочастот для БПЛА. Наприклад, у США і Канаді для комерційного використання БПЛА дозволено використовувати лише діапазони 900 МГц, 2,4 ГГц і 5,8 ГГц. У Європі та більшості країн Азії дозволені діапазони частот від 433 МГц до 5,8 ГГц.

При виборі частотного діапазону для БПЛА необхідно враховувати рівень завад від інших пристроїв, що працюють у цьому діапазоні, а також максимальну відстань і стабільність зв'язку, які можна забезпечити в цьому діапазоні.

Слід також враховувати, що противник вестиме постійну боротьбу з БПЛА. Застосування засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) може посилити ефективність боротьби з безпілотними літальними апаратами, особливо якщо вони використовують радіоканали для комунікації з оператором. Засоби РЕБ можуть використовуватися для розриву зв'язку між БПЛА та оператором, перешкоджати роботі GPS-навігації та інших сенсорів, а також вносити завади в передачу сигналів та здійснювати інші різноманітні впливи на роботу безпілота.

Однак наявність засобів РЕБ не завжди гарантує успіх в боротьбі з БПЛА. Наприклад, деякі БПЛА можуть бути оснащені системами захисту від РЕБ та можуть використовувати криптографічні методи для захисту своїх комунікаційних каналів. Крім того, засоби РЕБ можуть використовуватися в обмеженому радіусі дії та бути не здатними підібрати свої параметри до специфіки кожного окремого випадку застосування БПЛА.

Засоби й технології РЕБ постійно розвиваються, щоб забезпечити військову перевагу в електронному бою. Ворог використовує різноманітні засоби радіоелектронної боротьби, які призначені для перешкоджання діям або знищення робототехніки, включаючи БПЛА. Для прикладу розглянемо комплекс РЕБ «Автобаза-М», який є одним з найбільш потужних засобів РЕБ в арсеналі ворожої армії [5]. Основні характеристики комплексу включають:

- діапазон частот: від 20 МГц до 18 ГГц;
- чутливість: не гірше 2 мкВ;
- селективність: не гірше 30 дБ;
- максимальна потужність виходу: до 50 Вт;
- максимальна дальність дії: до 200 км;
- кількість каналів: до 32;
- час розгортання: менше 5 хвилин;

- можливість роботи в автоматичному і напівавтоматичному режимах;
- можливість використовувати різні типи антен, включаючи направлені й широко-смугові.

Комплекс «Автобаза-М» може працювати як окремий засіб РЕБ, або в складі комплексів залпової артилерії, систем ППО та інших засобів радіоелектронного захисту. Він забезпечує ефективний захист від різноманітних БпЛА, радіоелектронної розвідки та інших засобів, що працюють у широкому діапазоні частот.

Протистояння між виробниками засобів зв'язку для БпЛА та виробниками засобів РЕБ є постійним процесом, що спонукає до постійних інновацій та вдосконалення технологій. Виробники засобів зв'язку стараються зробити свої системи якомога більш стійкими до завад та забезпечити найвищу якість передачі даних, у той час як виробники засобів РЕБ намагаються розробити нові технології, щоб забезпечити надійне блокування передачі даних.

Однак нині спостерігається тенденція до вирішення виробниками засобів зв'язку цієї задачі протистояння шляхом використання технології когнітивного радіо. Ця технологія дозволяє раціонально використовувати радіочастотний спектр та швидко переключатися між різними діапазонами, змінювати частоти або напрямок передачі сигналу, що зменшує вплив завад та забезпечує більш надійну передачу даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Когнітивне радіо було розроблено порівняно недавно, у 1990-х роках, як рішення на проблему ефективного використання радіочастотного спектра.

З появою бездротових технологій, використання радіочастотного спектра значно збільшилося, що призвело до проблеми перенасиченості радіочастотного спектра та збільшення взаємовпливу між бездротовими системами. Когнітивне радіо було розроблено для того, щоб забезпечити ефективне використання радіочастотного спектра, шляхом дозволу бездротовим пристроям виявляти та використовувати вільні радіочастотні діапазони, які не використовуються іншими пристроями в певний час у цьому місці.

Основна ідея когнітивного радіо полягає в тому, що бездротові пристрої можуть обстежувати радіочастотний спектр та аналізувати його в режимі реального часу. На основі зібраних даних про наявні радіочастотні діапазони, бездротовий пристрій може приймати рішення щодо використання вільного спектрального діапазону, оптимальних параметрів передачі та інших характеристик бездротової мережі. Застосування когнітивного радіо дозволяє забезпечити ефективне використання радіочастотного спектра, підвищити продуктивність та покращити якість передачі даних в бездротових мережах. Застосування когнітивного радіо не обмежується лише бездротовими мережами, його можна використовувати в багатьох інших сферах, таких як медична діагностика, дистанційне керування, телекомунікаційна індустрія тощо.

Розробка технологій когнітивного радіо є активним напрямом досліджень та розробок у сфері бездротових комунікацій та радіоелектроніки, і багато компаній та наукових груп займаються її вдосконаленням та застосуванням у різних сферах. Деякі з провідних компаній, що займаються розробкою технологій когнітивного радіо, включають такі компанії, як Nokia, Samsung, Huawei, Ericsson, Intel, Microsoft та Qualcomm. Крім того, існують також спеціалізовані компанії, що розробляють бездротові технології та когнітивне радіо, наприклад, Cognitive Radio Technologies, xG Technology та інші. Багато університетів та дослідницьких центрів також займаються розробкою технологій когнітивного радіо – це університети Парижа й Каліфорнії, Массачусетський технологічний інститут (MIT) у США.

Протягом багатьох років дослідженням та розробкою технологій когнітивного радіо займаються індійські вчені. Деякі з найважливіших досягнень індійських учених у цій галузі включають:

- розробку технології когнітивного радіо, яка може працювати в широкому діапазоні частот, включаючи частотні діапазони, які не використовуються для комунікаційних потреб, тому ця технологія може бути використана для забезпечення безпеки та відновлення зв'язку у разі аварій або катастроф;

- використання когнітивного радіо для сучасних систем мобільного зв'язку – розробка технологій когнітивного радіо, які можуть бути використані для оптимізації використання смуги пропускання та збільшення кількості користувачів, що можуть бути обслуговані мобільними мережами;

- розробка нових методів спектрального спостереження, які дозволяють ефективно визначати наявність вільних частотних діапазонів та відслідковувати зміни в спектрі сигналів на різних частотах;

- розробка технології когнітивного радіо, яка може бути використана для моніторингу навколишнього середовища.

Індійські вчені також працюють над розробкою когнітивних радіоприймачів, які можуть приймати сигнали від різних джерел та відновлювати дані, навіть якщо вони пошкоджені або спотворені [3]. Це може бути корисно для роботів-дослідників та БпЛА, які працюють у важких умовах. Індійська компанія Saankhya Labs представила чіп Pruthvi, який може працювати з широкосмуговими радіочастотами в діапазоні від 70 МГц до 6 ГГц. Цей чіп здатен опрацьовувати сигнали в режимі реального часу та пристосовуватися до різних умов передачі, що робить його ідеальним для застосування в когнітивних радіосистемах [6]. Крім того, індійська компанія Cognitive Systems Private Limited розробляє когнітивні радіосистеми для різних застосувань, включаючи телекомунікації та безпеку. Їхні технології вже застосовуються в інтернеті речей та системах віддаленого керування.

Також в Індії було створено Національний інститут технічних досліджень, який займається дослідженнями в області когнітивного радіо та бездротових мереж. Учені цього інституту розробляють нові алгоритми та протоколи для когнітивного радіо, що сприятиме подальшому розвитку цієї технології.

Когнітивне радіо може знайти застосування в різних аспектах функціонування БпЛА, наприклад:

- управління спектром – БпЛА, що оснащені когнітивним радіо, можуть використовувати незайняті діапазони радіочастотного спектра для передачі і отримання інформації. Когнітивне радіо може виявляти доступні діапазони спектра, визначати канали з найменшими завадами й використовувати їх для передачі даних;

- розвідка і нагляд – БпЛА з когнітивним радіо можуть використовувати додаткові засоби зв'язку, які забезпечують кращу якість передачі даних. Когнітивне радіо може автоматично переключатись між різними каналами, щоб забезпечити максимальну швидкість передачі даних при мінімальних радіозавадах;

- система навігації – БпЛА з когнітивним радіо можуть використовувати сигнали GPS, щоб визначати своє місцезнаходження. Когнітивне радіо може виявляти завади в сигналах GPS і коригувати маршрут БпЛА відповідно;

- пошук і рятування – БпЛА з когнітивним радіо можуть бути використані для пошуку загиблих під час катастроф і для надання першої допомоги на місці подій. Когнітивне радіо може виявляти діапазони радіочастотного спектра, які використовуються для екстрених викликів і коригувати маршрут БпЛА відповідно;

- автономне стеження – БпЛА з когнітивним радіо можуть стежити за мобільними пристроями, що мають підключення до мережі, і аналізувати їх рух і поведінку.

Одним із прикладів використання когнітивного радіо в БпЛА є програма DARPA Adaptive RF Technology (ART) Program. Ця програма використовує SDR-радіо та когнітивні технології для автоматичного визначення найбільш ефективних частот для передачі та прийому сигналів на БпЛА. До складу ART також входить система Rapidly Deployable Radio (RaDR), що дозволяє швидко встановлювати засоби зв'язку та РЕБ на БпЛА й забезпечувати максимальну ефективність передачі та прийому сигналів.

Інший приклад використання когнітивного радіо в БпЛА – система Intra-Drone Communication (IDC) від компанії SkySafe. Ця система використовує когнітивні технології для автоматичного визначення найбезпечнішого каналу зв'язку між різними БпЛА у повітрі та забезпечення між ними безпечної передачі даних.

Крім того, когнітивне радіо може використовуватись для автоматичного визначення заборонених зон злітно-посадкових майданчиків та автоматичного перехоплення та знищення БпЛА, що порушують ці зони.

Програма DARPA ART була створена з метою розробки інтелектуальних радіоелектронних пристроїв, які забезпечують використання доступних каналів зв'язку, включаючи ті, які не використовуються в цей момент часу, і зменшують вплив завад та інших ефектів на якість зв'язку. Програма складається з кількох етапів дослідження та розробки, і на сьогодні було розроблено кілька прототипів інтелектуальних радіоелектронних пристроїв, які можуть працювати в умовах впливу шумів, навмисних завад і інших чинників. Деякі з подробиць використання програми DARPA ART в БпЛА включають:

- адаптивне керування енергією – програмне забезпечення DARPA ART може змінювати потужність випромінювання радіохвиль для забезпечення максимальної ефективності використання каналу зв'язку;

- аналіз спектра – система використовує спектральний аналіз, щоб визначити доступні канали зв'язку та можливість їх використання, що дозволяє використовувати канали, які в цей момент не використовуються;

- автоматична адаптація – система може автоматично адаптуватися до змін у спектрі радіохвиль та інших параметрах, що дозволяє забезпечувати стійку та надійну роботу системи;

- багатоканальна комунікація – DARPA ART може використовувати багатоканальну комунікацію для забезпечення максимальної пропускну здатності та якості зв'язку;

- віддалене керування – DARPA ART може бути керована з БпЛА за допомогою радіо.

За програмою DARPA Adaptive RF Technology ведуться дослідження і розробки технологій, що дозволяють створювати радіоелектронні пристрої, які можуть адаптуватися до змінних умов роботи каналу зв'язку. Одним із напрямів розробок є використання когнітивного радіо в межах мережі БпЛА для автоматичного розподілу частотних діапазонів та мінімізації взаємовпливу радіоелектронних систем. Використання когнітивного радіо може допомогти вирішити проблему з наявністю обмежених ресурсів, зокрема, енергетичних, що виникає при роботі безпілотних літальних апаратів. За допомогою когнітивного радіо можна ефективно розподіляти обмежені ресурси, забезпечуючи оптимальну роботу БпЛА. Когнітивне радіо може бути використано для автоматичного розпізнавання сигналів, забезпечуючи БпЛА можливість самостійно виявляти й реагувати на зміни в роботі радіоканалу. Також когнітивне радіо може допомогти покращити точність геолокації БпЛА, що є важливою складовою при здійсненні розвідки та моніторингу [1].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що попри великий спектр наукових праць, на сьогодні немає універсального та загальноприйнятого підходу до застосування технологій когнітивного радіо для протидії впливу засобам РЕБ противника на бездротові засоби передавання даних (БЗПД).

Метою статті є розробка моделі каналу зв'язку БЗПД з використанням технологій програмно визначеного радіо (SDR), когнітивного радіо та нейронних мереж, призначеного для використання в БпЛА за умови активної протидії засобів РЕБ противника.

Виклад основного матеріалу. Когнітивне радіо може використовувати діапазони частот, які не глушаться РЕБ противника і залишені ним для зв'язку своїх підрозділів, шляхом використання технологій повторного використання спектра (spectral reuse). Ця технологія дозволяє використовувати частоти, які не використовуються у даному місці

в даний час, та дозволяє збільшити ефективне використання радіочастотного спектру. Крім того, когнітивне радіо може аналізувати радіочастотний спектр в режимі реального часу та визначати доступні діапазони частот для передачі сигналу з максимальною ефективністю та мінімальним впливом на інші радіозасоби. Це дозволяє забезпечити ефективне використання радіочастотного спектра та уникнути завад у зв'язку.

Створення моделі каналу когнітивного радіо для БпЛА передбачатиме виконання таких етапів:

1. Визначення характеристик каналу (рівня шуму, спотворень та втрат сигналу в каналі зв'язку).
2. Визначення характеристик передавача (потужність, частота передачі, модуляція та кодування).
3. Визначення характеристик приймача (чутливість, діапазон частот, алгоритми демодуляції та декодування).
4. Моделювання поведінки засобів РЕБ противника (моделювання спектральної активності засобів РЕБ у відповідному діапазоні частот).
5. Використання алгоритмів керування каналом – визначення критеріїв для вибору вільного діапазону частот та визначення алгоритму для зміни параметрів передачі даних в разі постановки завад.
6. Використання отриманих параметрів каналу для моделювання передачі даних у когнітивному радіо.
7. Аналіз отриманих результатів (для оцінювання ефективності роботи когнітивного радіо в різних умовах).

Враховуючи вищевказані етапи, можна створити модель каналу когнітивного радіо для БпЛА. Проте слід зазначити, що створення точної моделі каналу може бути досить складним завданням, оскільки потребує збору значної кількості даних та їх обробки. Тому здебільшого застосовуються апроксимації та спрощені моделі, які дозволяють забезпечити достатню точність [2].

Швидкість передачі інформації, необхідна для БпЛА, може значно відрізнятись залежно від його завдань та можливостей. Для деяких застосувань, таких як зйомка відео або фотографій, достатньо невеликої швидкості передачі даних. У інших випадках, наприклад, для виконання місії зі збору та передачі розвідувальної інформації, може бути необхідна велика швидкість передачі даних. Зазвичай швидкість передачі даних для БпЛА варіюється від кількох мегабіт на секунду (Мбіт/с) до кількох гігабіт на секунду (Гбіт/с), залежно від конкретних потреб і можливостей БпЛА. Наприклад, для передачі відео високої чіткості (HD) потрібна швидкість передачі даних не менше 6 Мбіт/с, а для передачі відео у форматі 4K – не менше 20 Мбіт/с. Однак для розвідувальних БпЛА можуть використовуватись не тільки передача відео, а й передача інших типів даних, таких як звукові, теплові або інші сенсорні дані. У таких випадках швидкість передачі даних може бути меншою, залежно від типу даних та їх обсягу. Для більш точного визначення потрібної швидкості передачі даних необхідно розглядати конкретні вимоги проєкту та специфікації БпЛА.

Потужність передавача БпЛА може значно варіюватись залежно від типу та розміру БпЛА, особливостей його застосування та регуляторних обмежень. Зазвичай БпЛА використовують передавачі з низькою потужністю для забезпечення компактності, низького споживання енергії та довгого часу польоту. У найменших безпілотних апаратах, таких як мікро- і нанодрони, потужність передавача може бути в межах від кількох мВт до кількох Вт. Для середніх і великих БпЛА, таких як багатоцільові дрони, потужність передавача може сягати декількох Вт або більше. Діапазони потужності передавачів БпЛА можуть бути регульовані відповідно до вимог і обмежень національних та міжнародних нормативних актів, таких як правила електромагнітної сумісності та спектрального управління. Точні значення потужності передавача БпЛА в конкретній системі можуть бути визначені вимогами проєкту та відповідними регуляторними вимогами.

У сучасних БПЛА для передачі зображень використовується цифрова модуляція. Один із найпоширеніших типів модуляції для передачі зображень є метод модуляції з фазовим зрушенням (Phase Shift Keying, PSK). PSK дозволяє передавати цифрові дані шляхом зміни фази несучої хвилі. Залежно від конкретних вимог та характеристик системи зв'язку в БПЛА можуть використовуватись різні варіації PSK, такі як Binary Phase Shift Keying (BPSK), Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), або 8-Phase Shift Keying (8-PSK). Кожен із цих варіантів PSK має різний рівень роботи та швидкість передачі даних. Використання цифрової модуляції дозволяє передавати зображення у високій якості та ефективно використовувати доступну пропускну здатність каналу зв'язку. Точний тип модуляції, що використовується, може варіюватись залежно від конкретних вимог системи та особливостей зображення, що має передаватися.

Характеристики приймача БПЛА можуть варіюватись залежно від конкретних моделей і виробників БПЛА, а також вимог до системи зв'язку. Можуть включати наступне:

- чутливість – вказує на мінімальну потужність сигналу, яку може сприймати приймач із заданою якістю сигналу;
- робочий діапазон – частотний діапазон, у межах якого приймач може працювати (залежно від типу БПЛА та його застосування, цей діапазон може бути різним);
- селективність – характеристика, яка вказує на здатність приймача розрізняти та приймати сигнали з різних джерел або каналів (висока селективність дозволяє приймачу обирати конкретні сигнали і виключати небажані);
- завадозахищеність – властивість, що описує здатність приймача працювати в умовах наявності електромагнітних завад або шуму (висока завадозахищеність дозволяє приймачу ефективно фільтрувати шум та завади й отримувати чистий сигнал);
- швидкість прийому даних – число, яке вказує на швидкість передачі даних, яку приймач може обробляти. Швидкість прийому даних може варіюватись залежно від специфікацій приймача та вимог конкретної системи зв'язку.

Моделювання спектральної активності засобів радіоелектронної боротьби у відповідному діапазоні частот може виконуватись з використанням спеціалізованих програмних засобів або інженерних інструментів. Основна мета моделювання – дослідження поведінки РЕБ-системи та визначення її впливу на радіоелектронні пристрої та системи у спектральному діапазоні. Основні кроки моделювання спектральної активності засобів РЕБ включають:

- визначення параметрів РЕБ-системи (це включає в себе параметри, такі як потужність сигналів, ширина смуги, частотні діапазони та модуляційні схеми, які використовуються РЕБ для генерації радіозавад);
- створення моделі спектральної активності (на основі визначених параметрів РЕБ-системи створюється модель спектральної активності, яка відображає часовий характер активності РЕБ-сигналів у відповідному діапазоні частот, може бути представлена у вигляді часових діаграм, спектральних графіків або математичних рівнянь);
- симуляція та аналіз (застосовуються спеціалізовані програмні засоби для симуляції впливу спектральної активності РЕБ на радіоелектронні пристрої та системи, що дозволяє аналізувати вплив радіоперешкод на якість та продуктивність комунікаційних систем, виявляти можливі проблеми та знаходити шляхи їх уникнення).

Вибір вільного діапазону частот і алгоритму для зміни параметрів передачі даних в разі постановки завад є важливими аспектами роботи системи когнітивного радіо. Основні критерії для вибору вільного діапазону частот можуть включати:

- перевірку спектральної доступності, тобто чи не використовується цільовий діапазон частот іншими пристроями або системами комунікації;
- оцінку рівня інтерференції та завад в обраному діапазоні частот, щоб забезпечити якісну передачу сигналу;
- дотримання встановлених правил і обмежень використання радіочастотного спектра згідно з регуляторними вимогами.

Щодо алгоритму для зміни параметрів передачі даних в разі постановки завад, це може включати:

- аналіз отриманого сигналу для виявлення наявності завад або інтерференції;
- адаптація параметрів (зміна параметрів передачі, таких як частота, потужність або модуляція, для уникнення або зменшення впливу завад на якість сигналу);
- вибір альтернативного діапазону частот (у разі непридатності поточного діапазону через велику кількість завад або низьку якість зв'язку, може бути виконана автоматична зміна на інший доступний діапазон частот).

Алгоритм для зміни параметрів передачі даних може базуватися на інтелектуальних рішеннях, таких як машинне навчання або розпізнавання патернів, для прийняття рішень щодо оптимальних параметрів передачі в конкретних умовах завад.

Існує кілька типів нейронних мереж, які можуть бути використані для когнітивного радіо:

1. Зворотна зв'язна мережа – це один із найбільш поширених типів нейронних мереж. Вона складається зі шарів нейронів, кожен з яких зв'язаний із попереднім і наступним шарами нейронів. Ця мережа добре підходить для задач розпізнавання образів та класифікації даних.

2. Мережі радіальних базисних функцій – ці мережі використовують радіальні базисні функції як функції активації нейронів. Вони використовуються для задач класифікації даних, виявлення аномалій та передбачення.

3. Мережі довільних функцій – ці мережі мають можливість створення складних нелінійних функцій за допомогою складних математичних функцій. Вони використовуються для задач розпізнавання мови, розпізнавання образів та класифікації даних.

4. Мережі довгої короткочасної пам'яті (LSTM) – це тип нейронних мереж, який добре підходить для обробки послідовних даних, таких як мова або часові ряди. Вони здатні запам'ятовувати довгі послідовності даних та роблять їх короткочасну пам'ять доступною для довшого часу.

Ми використовуватимемо у своїй моделі саме LSTM мережу. Використання LSTM (Long Short-Term Memory) мережі для когнітивного радіо БпЛА має декілька переваг:

- обробка послідовних даних – LSTM мережа є рекурентною нейронною мережею, яка має здатність ефективно обробляти послідовні дані, такі як часові ряди радіосигналів, що надходять від різних джерел. Це особливо корисно для когнітивного радіо, яке повинне аналізувати й моделювати динамічні зміни в спектрі радіочастотного діапазону;

- моделювання контексту – LSTM мережа може зберігати та використовувати довгострокові залежності в даних. Це дозволяє моделювати контекстуальну інформацію, яка може бути важливою для когнітивного радіо. Наприклад, врахування історії змін у спектрі може допомогти виробити кращі рішення щодо вибору вільних частот для передачі даних;

- здатність до узагальнення – LSTM мережі можуть відтворювати складні залежності в даних і мати здатність до узагальнення на нові дані. Це важливо для когнітивного радіо, оскільки спектральні характеристики можуть змінюватися в різних умовах та середовищах. LSTM мережа може навчитися розпізнавати шаблони та залежності, що дозволяє зробити більш точні прогнози та рішення;

- адаптивність до зміни умов – когнітивне радіо повинне бути адаптивним до змін у спектральному середовищі та радіоумовах. LSTM мережа може бути тренувана на основі нових даних та адаптуватися до нових умов. Це дозволяє забезпечити високу робочу ефективність когнітивного радіо БпЛА у мінливих радіоумовах;

- здатність до вирішення послідовних задач, таких як передбачення майбутніх значень частотного спектра або розпізнавання радіосигналів з динамічною модуляцією. Це дозволяє використовувати LSTM мережі для реалізації різних функцій когнітивного радіо, включаючи виявлення вільних частот, управління спектром та адаптивне кодування й модуляцію.

Таким чином, використання LSTM мереж для когнітивного радіо БпЛА може покращити здатність системи до аналізу й адаптації до змінних спектральних умов, забезпечуючи більш ефективне використання доступного радіочастотного ресурсу та підвищуючи продуктивність комунікації та спектрального управління [4].

Для розробки й відлагодження нашої тестової моделі використовуємо SDR-радіо HackRF One. Це програмно-визначена радіопериферія, здатна передавати або приймати радіосигнали в діапазоні від 1 МГц до 6 ГГц. Розроблена для тестування і розробки сучасних радіотехнологій і радіотехнологій наступного покоління, HackRF One – це апаратна платформа з відкритим вихідним кодом, яку можна використовувати як USB-периферійний пристрій або запрограмувати для автономної роботи (рис. 1) [8].

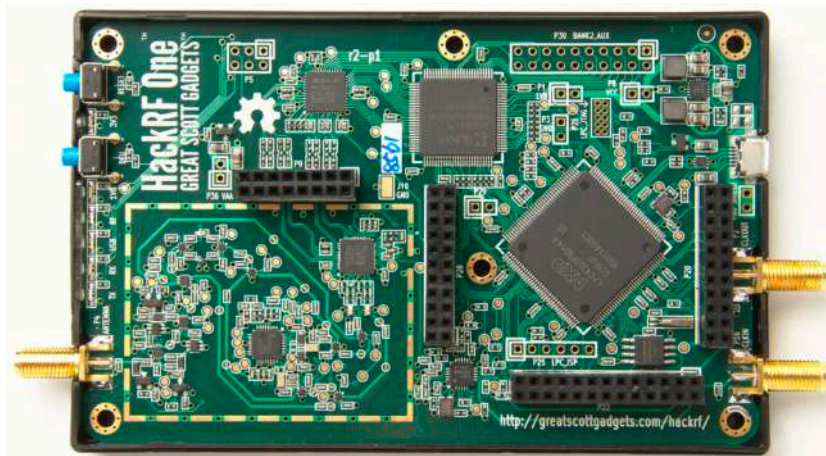


Рис. 1. Зовнішній вигляд SDR-платформи HackRF One

Розроблена модель каналу зв'язку БЗПД, призначеного для використання в БпЛА за умови активної протидії засобів РЕБ противника, зображена на рис. 2. Приймач, передавач, блок узгодження, модулятор і демодулятор використовуються зі складу апаратної частини HackRF One.

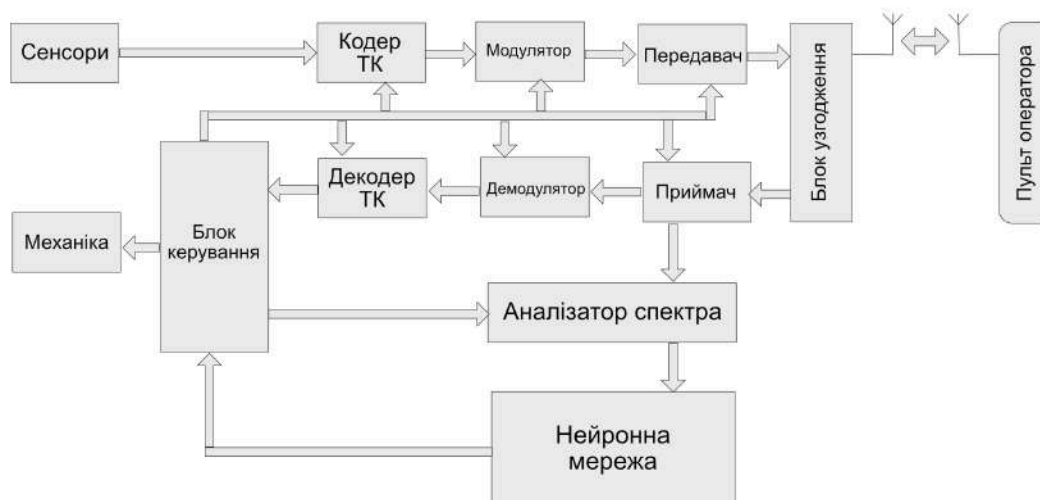


Рис. 2. Модель каналу зв'язку БЗПД з використанням технологій програмно визначеного радіо (SDR), когнітивного радіо та нейронних мереж, призначеного для використання в БпЛА за умови активної протидії засобів РЕБ противника

Як аналізатор спектра використовуємо GNU Radio – вільний інструментарій для розробки програмного забезпечення, який надає блоки обробки сигналів для реалізації програмно-визначених радіостанцій та систем обробки сигналів. Його можна використовувати із зовнішнім радіочастотним обладнанням для створення програмно-визначених

радіостанцій, або без обладнання у середовищі, подібному до симулятора. Він широко використовується в аматорському, академічному та комерційному середовищах для підтримки як досліджень бездротового зв'язку, так і реальних радіосистем [7].

Для наших інформаційних потоків застосовуємо також адаптивне кодування із використанням багатокомпонентних турбокодів. Турбокоди є одними з найефективніших кодів для каналів передачі даних. Оскільки когнітивне радіо використовує доступ до радіочастотного спектра, який може бути перенасиченим і вимагати використання менших діапазонів частот, технології з кодуванням та декодуванням, такі як турбокодування, можуть бути корисними для забезпечення більшої ефективності передачі даних в обмежених частотних діапазонах. Турбокодування може зменшити кількість помилок при передачі даних, що може збільшити надійність комунікації, особливо в умовах шуму та інтерференції. Крім того, турбокодування може забезпечити більшу пропускну здатність каналу, що може бути корисним для передачі великих обсягів даних в обмежених діапазонах частот.

Не треба забувати, що є деякий компроміс між ефективністю та складністю турбокодування та декодування в когнітивному радіо. Висока складність кодування та декодування може збільшити затримку передачі даних та споживання енергії, що може бути непрактичним для використання в пристроях з обмеженнями по об'єму, масі та споживаній потужності, таких як малі БпЛА. Тому, для кожного конкретного випадку варто провести аналіз ефективності та складності використання турбокодів для когнітивного радіо.

Висновки. На сьогодні є очевидним, що існує нагальна потреба в технологіях забезпечення автономності БпЛА на полі бою. Одним із ключових напрямків досягнення такої автономності є створення моделей і методів підвищення ефективності безпроводових систем передачі даних в умовах активного застосування засобів радіоелектронної боротьби через забезпечення достовірності інформації. В статті ми розглянули розробку тестової моделі каналу зв'язку бездротових засобів передачі даних, призначеної для відпрацювання технологій протидії засобам радіоелектронної боротьби та навчання нейронної мережі. Застосування цієї моделі дозволить розробити оригінальні вітчизняні алгоритми протидії засобам РЕБ противника.

Список використаних джерел

1. Abe Dr. D. K. Wideband Adaptive RF Protection (WARP) / Dr. D. K. Abe [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.darpa.mil/program/wideband-adaptive-rf-protection>.
2. Valieva I. Spectrum Sensing for Dynamic Spectrum Access in Cognitive Radio / I. Valieva. – Stockholm : E-Print AB, 2020. – 68 p.
3. Cooperative Communications Based on Deep Learning Using a Recurrent Neural Network in Wireless Communication Networks / M. Rathika, P. Sivakumar, K. R. Kumar, I. Garip // *Mathematical Problems in Engineering*. – Vol. 2022. – Article ID 1864290. – 12 p.
4. Jiang W. Recurrent Neural Networks with Long Short-Term Memory for Fading Channel Prediction / W. Jiang, H. D. Schotten // *Proceedings of the 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)* (Antwerp, Belgium, May 2020). – Antwerp, 2020. – Pp. 1-5.
5. Avtobaza [Electronic resource]. – Access mode: <https://en.wikipedia.org/wiki/Avtobaza>.
6. Cognitive RAN Solution [Electronic resource]. – Access mode: <https://saankhyalabs.com/solutions/#cognitive-ran-solution>.
7. GNU Radio [Electronic resource]. – Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/GNU_Radio.
8. HackRF One Hardware [Electronic resource]. – Access mode: <https://hackrf.readthedocs.io/en/latest/index.html>.

References

1. Abe, Dr. D. K. (n.d.). *Wideband Adaptive RF Protection (WARP)*. <https://www.darpa.mil/program/wideband-adaptive-rf-protection>.
2. Valieva, I. (2020). *Spectrum Sensing for Dynamic Spectrum Access in Cognitive Radio*. E-Print AB.

3. Rathika, M., Sivakumar, P., Kumar, K.R., & Garip, I. (2022). Cooperative Communications Based on Deep Learning Using a Recurrent Neural Network in Wireless Communication Networks. *Mathematical Problems in Engineering*, ID 1864290.
4. Jiang, W., Schotten, H.D. (May 2020). Recurrent Neural Networks with Long Short-Term Memory for Fading Channel Prediction. *Proceedings of the 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*. (pp. 1-5).
5. Avtobaza. <https://en.wikipedia.org/wiki/Avtobaza>.
6. Cognitive RAN Solution. <https://saankhyalabs.com/solutions/#cognitive-ran-solution>.
7. GNU Radio. https://en.wikipedia.org/wiki/GNU_Radio.
8. HackRF One Hardware. <https://hackrf.readthedocs.io/en/latest/index.html>.

Отримано 30.06.23

UDC [004.738.5:351]621.396.6

Serhii Semendiai

graduate student

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: serhii_semendiai@icloud.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7751-5956>**IMPROVING THE EFFICIENCY OF WIRELESS DATA TRANSMISSION SYSTEMS IN THE CONDITIONS OF ELECTRONIC WARFARE**

The article discusses some of the technologies that ensure the autonomy of unmanned aerial vehicles (UAVs) on the battlefield, methods of increasing the efficiency of UAV communication channels in the context of electronic warfare (EW). The author analyzes the threats to autonomous UAVs that may arise from the use of electronic warfare, and also presents the characteristics of one of the typical modern electronic warfare complexes. This article discusses the development of a test model of a wireless data transmission channel designed to develop technologies for countering electronic warfare and training a neural network. The use of this model will allow the development of original domestic algorithms for countering enemy electronic warfare. The requirements of manufacturers to the electronic equipment of autonomous UAVs are analyzed. The possibility of using non-professional SDR radio equipment and open source software and hardware platforms for the development and verification of these countermeasures algorithms is considered. The algorithm for changing data transmission parameters in the event of interference is determined. The choice of the type of neural network for use in the cognitive radio system of the UAV is substantiated. The idea of applying adaptive coding in UAV communication channels using multicomponent turbo codes in combination with neural networks that are simultaneously used for cognitive radio was further developed. Using information from the neural network about subsequent changes in the communication channel will reduce the adaptation time of the coding system, which will reduce the number of errors in data transmission and increase the reliability of communication, especially when using dynamic spectrum access.

The article is devoted to the problems of creating methods and models that use software-defined radio (SDR), cognitive radio, and multi-level parametric adaptation of turbo-code structures using artificial intelligence to improve the efficiency of wireless data transmission systems in the context of active use of electronic warfare by ensuring the reliability of information.

Keywords: cognitive radio; software-defined radio; neural networks; coding; electronic warfare; communication channel; wireless communications; spectrum analysis.

Fig.: 2. References: 8.

Владислав Корчан¹, Ірина Морозова²

¹магістр, аспірант кафедри електроніки, робототехніки, технологій моніторингу та інтернету речей
Національний авіаційний університет (Київ, Україна)

E-mail: korchan.vlad22@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6769-7529>

²кандидат технічних наук, професор кафедри електроніки, робототехніки, технологій моніторингу та інтернету речей
Національний авіаційний університет (Київ, Україна)

E-mail: iramoro@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4238-4001>

МЕТОДИ СУМІСНОСТІ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПРИСТРОЇВ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ У ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ НА БАЗІ АРХІТЕКТУРИ ЦИФРОВИХ ОБ'ЄКТІВ

Нині продукти, підходи та ініціативи, пов'язані з питанням сумісності Інтернету речей, поки що перебувають у стадії розробки. Пропріетарний характер випуску пристроїв Інтернету речей спостерігався до 2017 року, що створило передумови та необхідність замислитися про створення вимог щодо сумісності пристроїв як для завдань спільної взаємодії, так і для завдань спільної ідентифікації, тобто щоб один пристрій Інтернету речей розумів інший пристрій Інтернету речей. Таким прикладом є системи, побудовані з урахуванням загального рівня послуг і реалізацій сутностей загальних послуг, сервіс-орієнтованих архітектур, архітектур цифрових об'єктів і доменних імен.

Ключові слова: Інтернет речей; ідентифікація; цифровий об'єкт; передача даних.

Рис.: 2. Бібл.: 6.

Актуальність теми дослідження. Більшість підходів сконцентровані на визначенні набору базових інтерфейсів у межах різних програм. Архітектура цифрових об'єктів визначає базовий набір послуг, що дозволяють зробити інкапсуляцію інформації, її реєстрацію та виявлення незалежно від меж застосування, тим самим дозволяючи здійснювати обмін інформацією в межах різних додатків. Описані підходи можуть бути інтегровані в будь-якому аспекті сумісності (загальний рівень послуг, сервіс-орієнтована архітектура та ін.), що дозволить здійснювати обмін інформацією в межах різних додатків.

Постановка проблеми. Архітектура цифрових об'єктів визначає мінімальний набір необхідних архітектурних компонентів, протоколів та сервісів для забезпечення загальної інформації та сумісності сервісів. Наведений опис є технологічно нейтральним, а також може бути реалізовано з наявними технологіями для завдань глобальної ідентифікації Інтернету речей. Це полегшить сумісність ідентифікації, опису, представлення, доступу, зберігання та безпеки пристроїв Інтернету речей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій з питань методів цифрової ідентифікації пристроїв Інтернету речей у гетерогенних мережах показав, що питанням вибору методів цифрової ідентифікації пристроїв у гетерогенних мережах на базі архітектури цифрових об'єктів на сьогодні приділено мало уваги в науковій літературі.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Представлена архітектура дозволяє будь-якій цифровій інформації, попередньо структурованій як цифровий об'єкт, бути безпечно ідентифікованою, незалежно від конкретної системи, сервісу або програми, де інформація створювалася або зберігалася.

Метою статті є представлення методів і підходів, які можуть бути інтегровані в будь-якому з раніше перерахованих аспектів сумісності (загальний рівень послуг, сервіс-орієнтована архітектура та ін.), що дозволить здійснювати обмін інформацією в межах різних додатків Інтернету речей.

Виклад основного матеріалу. Представлена архітектура дозволяє будь-якій цифровій інформації, попередньо структурованій як цифровий об'єкт, бути безпечно ідентифікованою, незалежно від конкретної системи, сервісу або програми, де інформація створювалася або зберігалася. Як відомо, DOA складається із трьох базових фундаментальних компонентів, які реалізують такі послуги: сервіс глобальної ідентифікації, сервіс зберігання цифрових об'єктів, сервіс-реєстр цифрових об'єктів. На (рис. 1) показаний процес створення цифрового об'єкта та присвоєння атрибутів.

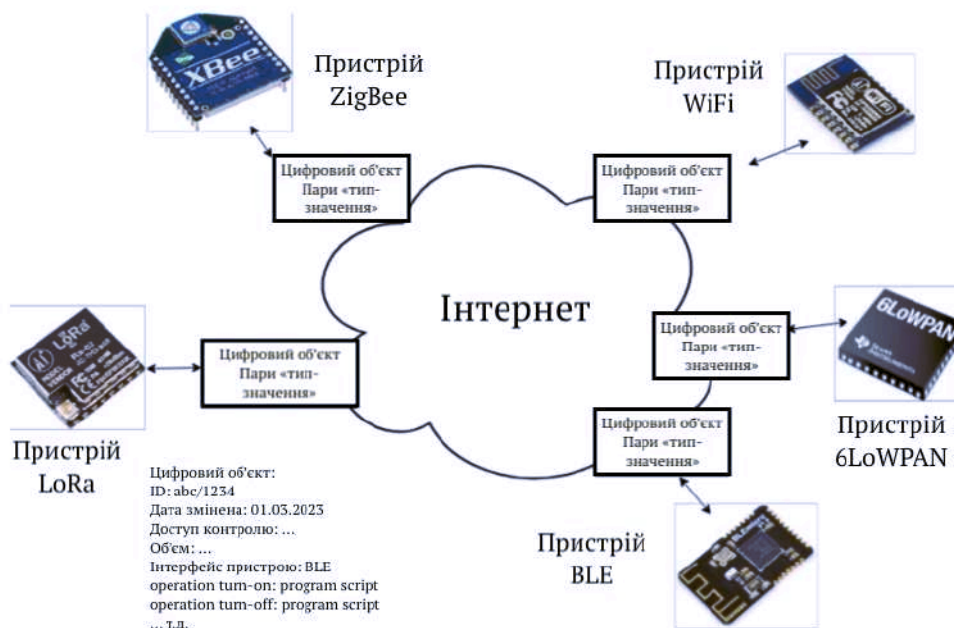


Рис. 1. Процес створення цифрового об'єкта та присвоєння атрибутів

Сервіс глобальної ідентифікації дозволить призначати глобальний ідентифікатор будь-якого цифрового об'єкта. Цей сервіс надає протокол резолюції та адміністрування, призначений для визначення пов'язаної з цифровим об'єктом допоміжної інформації: місце зберігання, походження інформації, з можливістю вилучення та керування з дотриманням необхідних заходів безпеки. Сервіс ідентифікації повинен бути розподіленою системою із вбудованими механізмами захисту для забезпечення цілісності сервісу, його безвідмовності, цілісності даних, що зберігаються. Обов'язковою є також автентифікація та конфіденційність операцій зі збереженими даними, наявність вибіркового управління доступом для будь-яких метаданих, пов'язаних з ідентифікатором. Набір розподілених сервісів для зберігання цифрових об'єктів сприяє безпечному зберіганню, доступу та поширенню об'єктів із використанням їх ідентифікаторів. Саме сховище є цифровим об'єктом, що може зберігати в собі інші об'єкти (що є обов'язковим) [3]. Сховище цифрових об'єктів може являти собою набір пристроїв Інтернету речей, при цьому будучи також цифровими об'єктами.

Цифровий об'єкт може мати безліч атрибутів, пов'язаних із реальним об'єктом. Частина атрибутів може описувати природу пристрою Інтернету речей. Зокрема, об'єкт може мати керуючі атрибути, пов'язані з програмним забезпеченням, надаючи пряму взаємодію з функціями пристрою інтернету речей, наприклад, включення або вимкнення системи, отримання показань температурного сенсора на пристрої. Крім цього, цифровий об'єкт може мати атрибути, що визначають доступність основних атрибутів пристроїв, таким чином визначаючи, хто може взаємодіяти з пристроєм інтернету речей за допомогою інтерфейсу, описаного в атрибутах об'єкта. На рис. 2 представлена схема взаємодії пристроїв інтернету речей, що підключаються до мережі зв'язку з використанням різних технологій передачі даних, та компонентів цифрової архітектури [4].

Структура цифрового об'єкта може бути сформована у вигляді цифрового уявлення фізичного пристрою інтернету речей. Система компонентів, а саме реєстр, має можливості для визначення способів знаходження та доступу до подібних сутностей. Критерій сумісності в термінах інтернету речей передбачає наявність API, щоб цифрові об'єкти могли взаємодіяти з пристроями, до яких вони прив'язані. Цей підхід може бути використаний для досягнення конкретних засобів керування доступом для зручності кожного сховища. З іншого боку, сховище може надавати доступ до даних, генерованим окремим пристроєм інтернету речей. Архітектура цифрових об'єктів не обмежує кількість можливих сховищ.

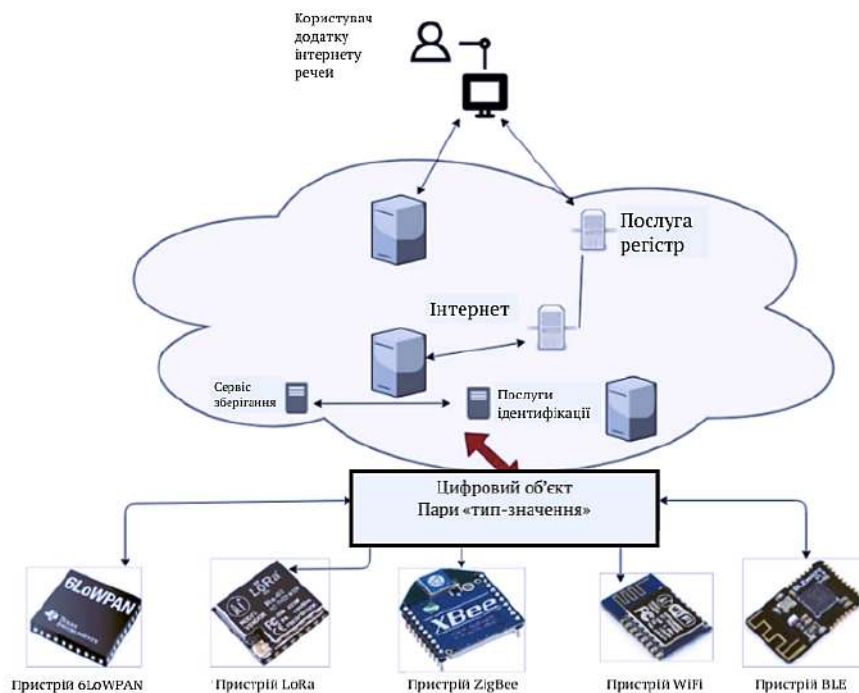


Рис. 2. Схема взаємодії пристроїв інтернету речей та компонентів архітектури цифрових

Приклади типів і/або атрибутів:

- тип пристрою IoT;
- опис пристрою IoT як для розуміння людиною, так і для розуміння машиною;
- супровідна інформація, включає інформацію про стан пристроїв IoT;
- характеристики інтерфейсу. Кожен пристрій IoT надає ідентифікатор, який унікально визначає інтерфейси, які використовуються для взаємодії з іншими системами та пристроями IoT. Наприклад, така специфікація інтерфейсу забезпечує низькорівневий опис фізичних інтерфейсів, які використовуються для взаємодії з пристроєм;
- доступ до інтерфейсу сервісу. Кожен пристрій IoT, доступний у мережі, може надавати рекомендації для інтерфейсів обслуговування. Для деяких пристроїв це може бути URL-адреса, для інших – проста IP-адреса, а також будь-які інші параметри. Конкретний пристрій IoT може мати різні сервісні інтерфейси;

- взаємозв'язок з архівним сховищем пристрою IoT. Багато пристроїв IoT можуть генерувати дані під час роботи. DOA може підключити пристрій до сховища подібних даних.

Існують різні типи взаємодії пристроїв інтернету речей у гетерогенних мережах, одним з яких є технічна сумісність, яка зазвичай пов'язана з програмними та апаратними компонентами, системами та платформами, які забезпечують взаємодію між пристроями.

Цей тип взаємодії найчастіше базується на протоколах зв'язку та інфраструктурі, необхідній для роботи цих протоколів. Інший тип сумісності, синтаксична сумісність, зазвичай асоціюється з форматами даних. Немає сумніву, що всі повідомлення, що передаються за допомогою протоколів, повинні мати чітко визначений синтаксис і методи кодування, навіть якщо вони мають форму бітових таблиць. Третій вид сумісності – це семантична сумісність, зазвичай пов'язана зі значенням вмісту, що впливає на інтерпретацію вмісту людиною, а не машиною. Таким чином, сумісність на цьому рівні означає спільне розуміння сенсу обмінюваного контенту (інформації).

Результат розділення має бути у формі пари тип-значення. У структурі даних DOA цифровий об'єкт – це файл, служба, база даних, пристрій або їх комбінація.

Висновки. У роботі запропоновані методи сумісності та архітектура взаємодії пристроїв при ідентифікації Інтернету речей у гетерогенних мережах зв'язку на базі архітектури цифрових об'єктів. Описано процес створення цифрового об'єкта, присвоєння атрибутів та особливості місця зберігання даних і інформації. Ядром структури є архітектура цифрових об'єктів, в якому будь-яка інформація, представлена в цифровому вигляді, може бути структурована як цифровий об'єкт, якому присвоюється глобально унікальний ідентифікатор. Описані підходи можуть бути інтегровані у будь-якому з раніше перерахованих аспектів сумісності (загальний рівень послуг, сервіс-орієнтована архітектура та ін.), що дозволить здійснювати обмін інформацією в межах різних додатків.

Список використаних джерел

1. Recommendation ITU-T E.164: The international public telecommunication numbering plan. – November 2010 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.itu.int/rec/T-REC-E.164-201011-I>.
2. Recommendation ITU-T P.10 : Vocabulary for performance and quality of service // ITU-T. – 2006. – № 12.
3. Владимиров С. С. Методика идентификации устройств Интернета вещей на основе принудительной деградации участка флеш-памяти / С. С. Владимиров, Р. В. Киричек // Электросвязь. – 2017. – № 2. – С. 32-35.
4. Аль Бахри М. С. Обзор внедрения технологии SigFox в государстве Оман / М. С. Аль Бахри, Р. В. Киричек. – 2017. – С. 172-173.
5. Lam K. Y. Identity in the Internet-of-Things (IoT): New challenges and opportunities / K. Y. Lam, C. H. Chi // International Conference on Information and Communications Security. – Springer, Cham, 2016. – Pp. 18-26.
6. Koo J. Interoperability of device identification in heterogeneous IoT platforms / J. Koo, Y. G. Kim // 2017 13th International Computer Engineering Conference (ICENCO). – IEEE, 2017. – Pp. 26-29.

References

1. Recommendation ITU-T E.164: The international public telecommunication numbering plan (November 2010). <https://www.itu.int/rec/T-REC-E.164-201011-I>.
2. ITU. (2006). *Recommendation ITU-T P.10: Vocabulary for performance and quality of service*, 12.
3. Vladimirov, S.S., Kirichek, R.V. (2017). Method for identifying Internet of Things devices based on forced degradation of a flash memory section. *Electrosvyaz*, 2, 32-35.
4. Bahri, Al M.S., Kirichek, R.V. (2017). *Overview of the implementation of SigFox technology in the state of Oman* (pp. 172-173).
5. Lam, K.Y., Chi, C.H. (2016). Identity in the Internet-of-Things (IoT): New challenges and opportunities. *International Conference on Information and Communications Security* (pp. 18-26). Cham.
6. Koo, J., Kim, Y.G. (2017). Interoperability of device identification in heterogeneous IoT platforms. *13th International Computer Engineering Conference (ICENCO)* (pp. 26-29). IEEE.

Отримано 03.04.2023

UDC [004.738.5:330.341.1]004.2

Vladyslav Korchan¹, Iryna Morozova²

¹master's, PhD student of the Department of Electronics, Robotics, Monitoring Technologies and the Internet of Things
National Aviation University (Kyiv, Ukraine)

E-mail: korchan.vlad22@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6769-7529>

²PhD in Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Electronics, Robotics, Monitoring Technologies and the Internet of Things
National Aviation University (Kyiv, Ukraine)

E-mail: iramoro@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4238-4001>

COMPATIBILITY METHODS FOR IDENTIFICATION OF INTERNET OF THINGS DEVICES IN HETEROGENOUS COMMUNICATION NETWORKS BASED ON THE ARCHITECTURE OF DIGITAL OBJECTS

Most of the listed approaches are focused on defining a set of basic interfaces within various programs. The architecture of digital objects defines a basic set of services that allow encapsulation of information, its registration and detection, regardless of application boundaries, thereby allowing the exchange of information within various applications. The described approaches can be integrated in any of the previously listed aspects of compatibility (general level of services, service-oriented architecture, etc.), which will allow information exchange within different applications.

The architecture of digital objects defines a minimum set necessary architectural components, protocols and services to ensure general information and service compatibility. The given description is technologically neutral and can also be implemented with existing technologies for global identification tasks of the Internet of Things. This will facilitate the interoperability of identification, description, representation, access, storage and security of IoT devices.

Analysis of the latest research and publications on digital identification methods for Internet of Things devices in heterogeneous networks showed that the issue of choosing digital identification methods for devices in heterogeneous networks based on the architecture of digital objects has received little attention in the scientific literature.

The presented architecture allows any digital information, previously structured as a digital object, to be securely identified, regardless of the specific system, service or program where the information was created or stored.

The purpose of the article is to present methods and approaches that can be integrated in any of the previously listed aspects of interoperability (general level of services, service-oriented architecture, etc.), which will allow information exchange within various Internet of Things applications.

The paper proposes methods of compatibility and the architecture of device interaction in the identification of the Internet of Things in heterogeneous communication networks based on the architecture of digital objects. The process of creating a digital object, assigning attributes, and features of data and information storage is described. The core of the structure is the architecture of digital objects, in which any information presented in digital form can be structured as a digital object, which is assigned a globally unique identifier. The described approaches can be integrated in any of the previously listed aspects of compatibility (general level of services, service-oriented architecture, etc.), which will allow information exchange within different applications.

Keywords: Internet of Things; identification; digital object; data transfer.

Fig.: 2. **References:** 6.

**Світлана Кравченко¹, Інна Сугоняк², Галина Марчук³,
Євгеній Гришкун⁴, Оксана Швед⁵**

¹старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)
E-mail: svetlanakravcenko2012@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5895-9615>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)
E-mail: isugonyak@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0484-4839>

³старший викладач кафедри комп'ютерних наук
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)
E-mail: mgv.555.mgv@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2954-1057>

⁴старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)
E-mail: evgenii2081991@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9996-2167>

⁵студентка кафедри інженерії програмного забезпечення
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)
E-mail: irongalaxy6@gmail.com

UML-МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗРОБКИ ДОДАТКА ПЛАНУВАННЯ РОЗВАГ ТА МЕНЮ ГОТЕЛІВ

У цій статті представлено UML-моделювання процесу побудови додатка для планування розваг та меню готелів. Визначено алгоритм роботи та стани програмної системи, фізична модель. Продемонстровано застосування об'єктноорієнтованої моделі системи, здійснено проектування додатка й етапи розробки вебдодатка. Використано UML-модель для візуалізації та оптимізації представлення сайту.

У роботі визначено аналіз вимог, концептуальне моделювання побудови моделі розробки додатка, Проаналізовано основні етапи створення додатка. Охарактеризовано функціональні можливості використання UML-моделювання при розробці додатка з планування розваг та меню готельного бізнесу.

UML-моделі мають більше функціональних можливостей для відображення об'єктів реальної та віртуальної реальності через застосування графічних та структурованих вербальних описів.

Ключові слова: моделювання програмного забезпечення; фізична модель; UML; вебсайт, середовище розробки.
Рис.: 8. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. Створення свого власного сайту наразі є обов'язковим для успіху підприємницької діяльності, адже це забезпечує зручний обмін інформацією з клієнтами. Головним атрибутом того, що компанія сучасна та прогресивна, є наявність у них сайту.

Поступово в ресторанах відмовляються від фізичного меню та вводять меню на власні сайти, аби позбавитися від зайвого використання паперу. Тому конкуренція за найзручніше та найгарніше меню збільшується. Доцільно було б змоделювати UML- процес, в якому буде представлено концептуальне моделювання побудови моделі додатка, який дозволить не лише переглядати меню, але й заздалегідь замовляти його та приходити на час його готовності. А для ресторану було б зручно зробити всі замовлення в одному місці.

Тому для легшого орієнтування, створюються блок-схеми з усіма згаданими можливостями. Особливо це корисно у великих ресторанах.

Постановка проблеми. Для того щоб розробити додаток з планування розваг та меню готелів, обов'язково треба спочатку чітко визначити аналіз вимог та функціональні можливості розробки додатка й потім його спроектувати.

Існують вимоги, якими повинні відповідати ці типи вебдодатків, щоб мати можливість добре виконувати покладені функції, тим самим відповідно задовольнивши всі зазначені стандарти, специфікації та інші формальні документи. Тому було б доцільно на етапі проектування використання UML-моделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням щодо використання UML-моделювання займалися такі закордонні та вітчизняні вчені, як У. Боггс, М. Боггс, Р. Буч, Дж. Рамбо, А. Джекобсон, А. М. Вендров, Т. Кватрані, А. Г. Українець, М. Ф. Бондаренко. Базова система позначень UML популярно і доступно викладена в книзі Мартіна Фовлера [1; 2].

UML є дуже важливою частиною процесу розробки об'єктноорієнтованого програмного забезпечення. Цей вид моделювання забезпечує переважно графічні позначення для опису дизайну програмних проєктів. Використання UML допомагає проєктним групам спілкуватись, вивчати потенційні проєкти та перевіряти архітектурний дизайн програмного забезпечення [3].

У документі [4] описані розширення UML, включаючи діаграми протоколів, ролі агентів, багатопотокові лінії життя, розширену семантику повідомлень UML та вкладені протоколи.

UML (Unified Modeling Language) являє собою стандартизовану мову моделювання, що складається з інтегрованого набору діаграм, яка розроблена, щоб допомогти розробникам систем та програмного забезпечення визначати, візуалізувати, створювати і документувати артефакти програмних систем, а також для бізнес-процесів моделювання. UML – це набір найкращих інженерних практик, які дуже ефективні при моделюванні великих та складних систем.

В основу UML-моделей покладений принцип спрощення моделі об'єктів через їхню класифікацію, тобто поділ на різновиди відповідно до важливих ознак (структури або атрибутики, поведінки або зв'язку з іншими класами, спадкоємності ознак) та поєднання у класи [5].

У статті [6] показано використання технології доповненої реальності та створення мобільного додатку для проведення реклами освітніх послуг факультету інформаційно-комп'ютерних технологій Державного університету «Житомирська політехніка». Проєктування додатка здійснювалося за допомогою UML. Для опису поведінки додатка використано діаграму станів.

У статті [7] описано основні алгоритми та методи роботи системи розпізнавання вільних місць для паркування автомобілів на парковках міста. Для проєктування додатка було використано діаграми UML, а саме діаграма активності та класів.

Метою статті є визначення доцільності використання UML-моделювання при стадії проєктування вебдодатків для готельного бізнесу.

Виклад основного матеріалу. Створення додатку планування розваг та меню готелів є спрощення процесу обміну інформації між клієнтом та компанією, а саме, готелями. Реалізація цього вебдодатка може бути корисною для клієнтів готелю в пошуках гарно провести відпочинок та економити свій час.

Представлено процес створення веб-додатку, який буде корисний для клієнтів готелю та буде мати можливість замовлення страв заздалегідь, а також записуватися на цікаві розважальні заходи і налаштовувати нагадування про них за необхідності.

Проєктування та реалізація алгоритмів роботи додатка. Як основний алгоритм, було вирішено використовувати звичайний алгоритм односторінкового додатка (SPA) для клієнтської частини системи (рис. 1). При переході на сторінку додатка або відкритті мобільного додатку, сервер надсилає користувачеві актуальну версію сторінки (клієнтську частину). Потім, залежно від дій користувача, клієнт надсилає запити на сервер. Після отримання відповіді від серверу, клієнт змінює вигляд сторінки.

Діаграма прецедентів.

Для забезпечення неперервного виконання необхідних функцій і відповідності встановленим стандартам та специфікаціям, наведено високорівневі вимоги, які повинні задовольняти веборієнтована система планування розваг та меню готелів. Ці вимоги допомагають забезпечити безперебійну роботу системи та виконання всіх необхідних стандартів і специфікацій.

Діаграма варіантів використання описує систему на концептуальному рівні та показує відносини між акторами (персонажами, які беруть участь у ситуації або грі) та прецедентами (діями гравця, що призводять до певного відчутного результату). Така діаграма дозволяє побачити повторюваність дій, зайві рухи, що дає підстави для оптимізації або свідомого збагачення дійової системи-об'єкта.

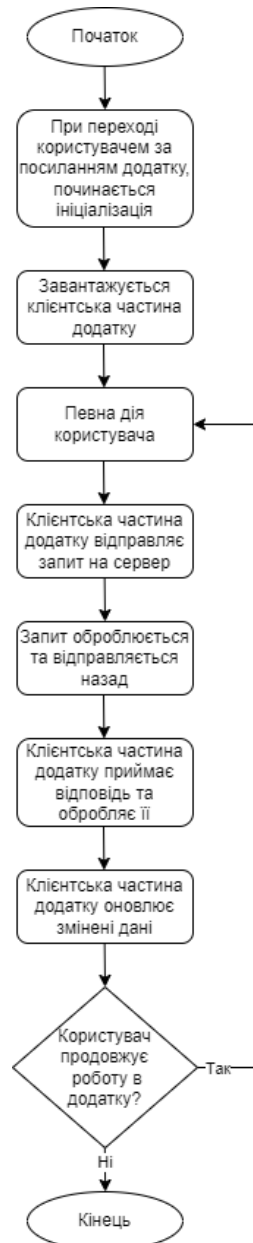


Рис. 1. Загальний алгоритм роботи додатка

На рисунку 2 представлено діаграму прецедентів для визначення варіантів використання додатку планування розваг та меню готелів.

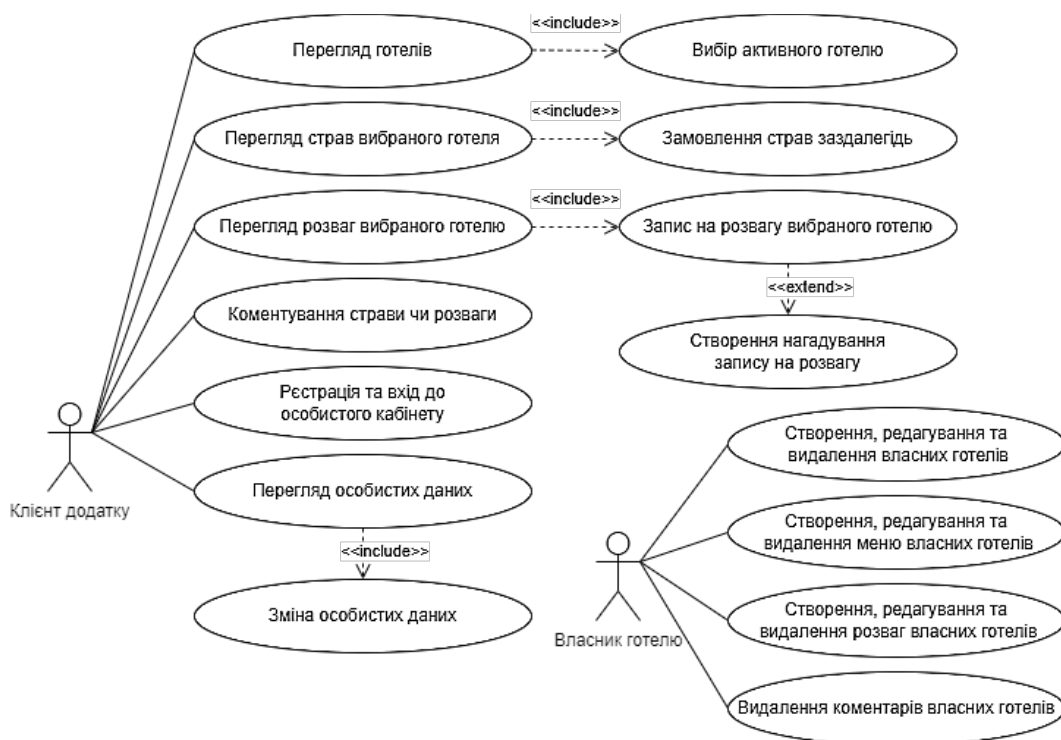


Рис. 2. Варіанти використання додатка планування розваг та меню готелів

У результаті аналізу функціональних вимог було створено модульні діаграми (рис. 3), що відображають складові частини системи, діаграму сутностей (рис. 3), яка визначає класи, що відображають відповідні таблиці у базі даних, та наближену діаграму класів модуля, за допомогою прикладу модуля відгуків (рис. 4).

На діаграмі модулів зображені частини системи – модулі, кожен з яких відповідає за свою дію.

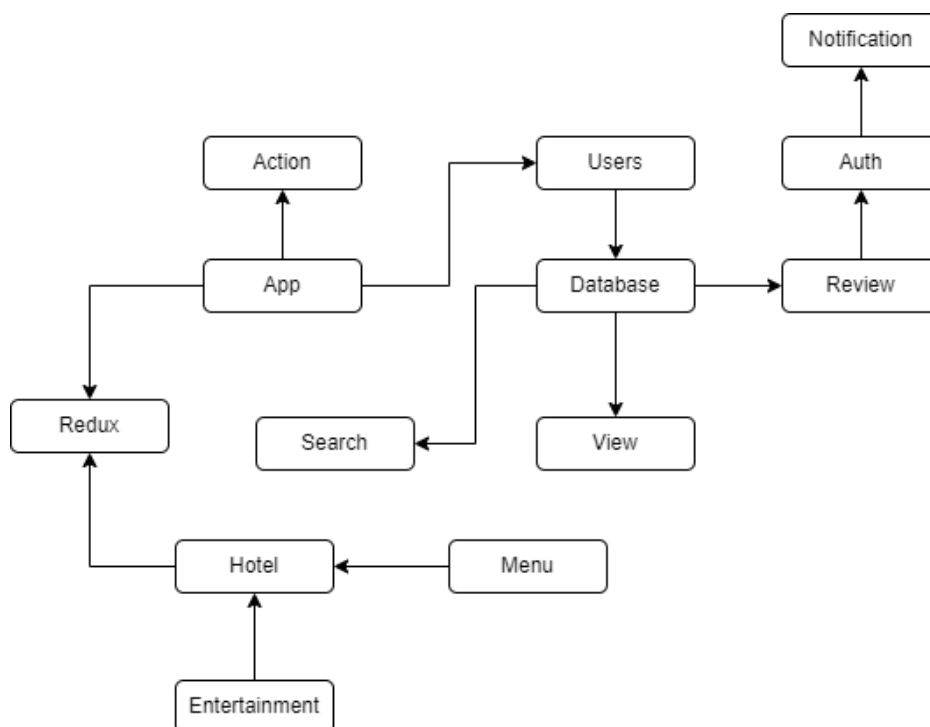


Рис. 3. Діаграма модулів додатка планування розваг та меню готелів

Об’єктно-орієнтована модель системи

Діаграма класів являє собою набір статичних, декларативних елементів моделі. Вона дає найбільш повне і розгорнуте уявлення про зв’язки в програмному кодї, функціональність та інформацію про окремі класи. Додатки генеруються часто саме з діаграми класів. При моделюванні об’єктно-орієнтованих систем цей тип діаграм використовують найчастіше.

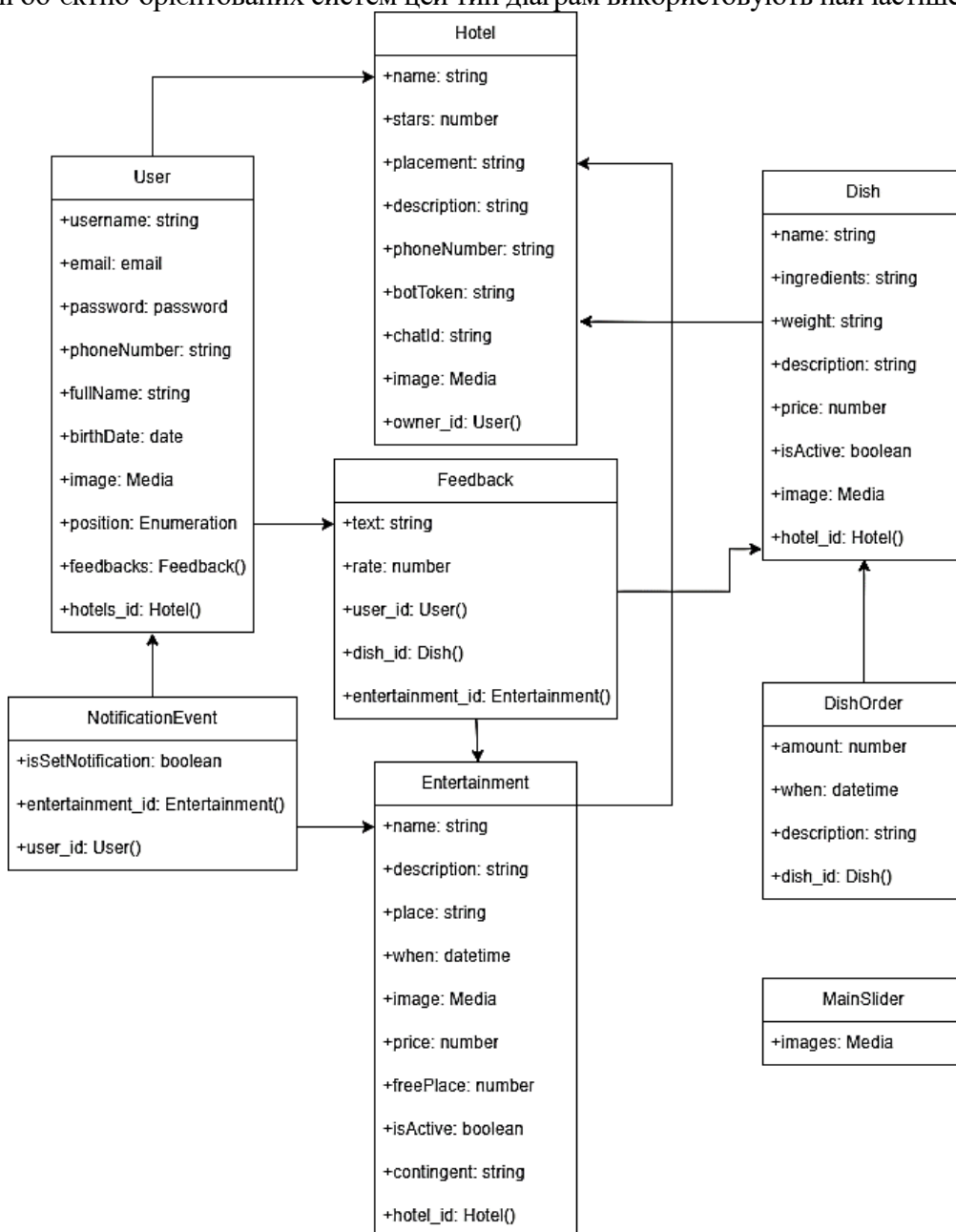


Рис. 4. Діаграма класів сутностей додатка планування розваг та меню готелів

Склавши загальний алгоритм додатку, далі було продумано алгоритм для окремих випадків. Для представлення подібних сценаріїв зазвичай використовуються діаграми діяльності (activity diagram).

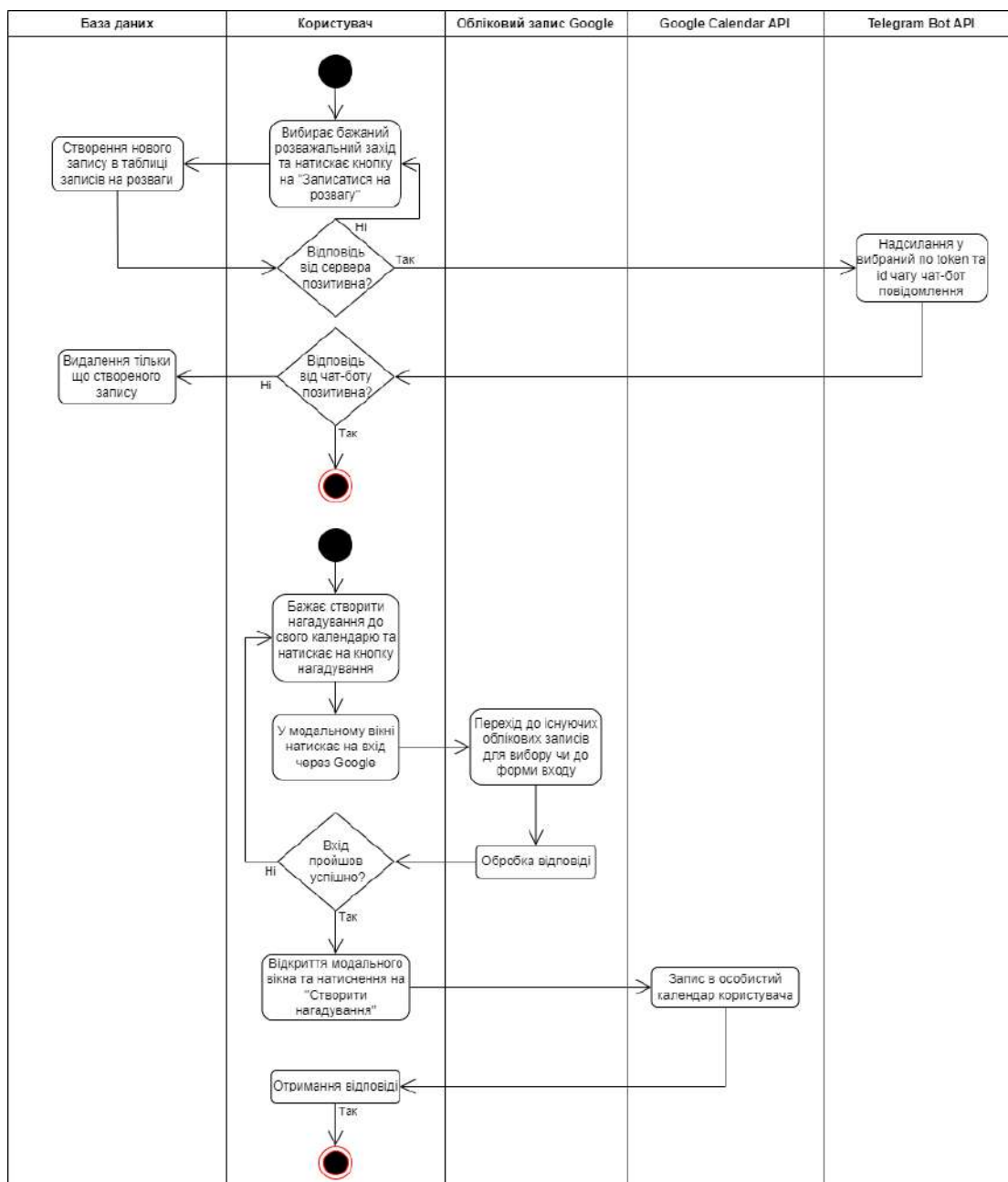


Рис. 5. Діаграма діяльності «Запис користувача на розважальний захід»

Додаток планування розваг та меню готелів складається з низки компонентів, що вимагає їх окремого розгортання та налаштування. Для відображення компонентів системи та візуалізації процесу їх розгортання була створена діаграма розгортання (рис. 6).

На діаграмі розгортання зображена система, яка складається з трьох вузлів: серверу, серверу бази даних та комп'ютер або інший пристрій користувача. Зв'язок між комп'ютером або іншим пристроєм користувача та веб-сервером здійснюється через протокол HTTPS. Протокол HTTP використовується для взаємодії між клієнтським та серверним додатками всередині сервера.

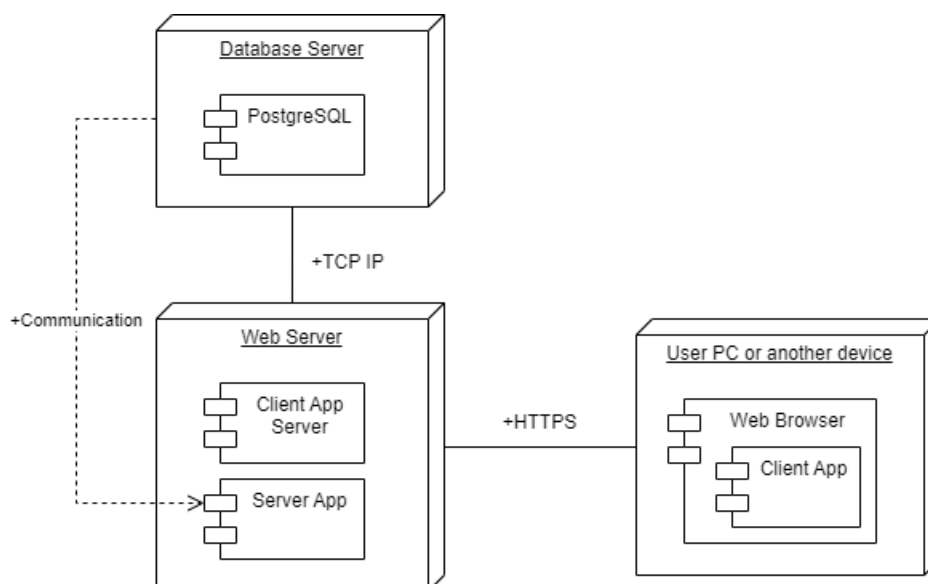


Рис. 6. Діаграма розгортання

Структура інтерфейсу вебдодатка та порядок роботи

Сайт є повністю адаптивним для стандартних пристроїв.

Перше, що побачить користувач, перейшовши за посиланням на додаток, це головну сторінку (рис 7).

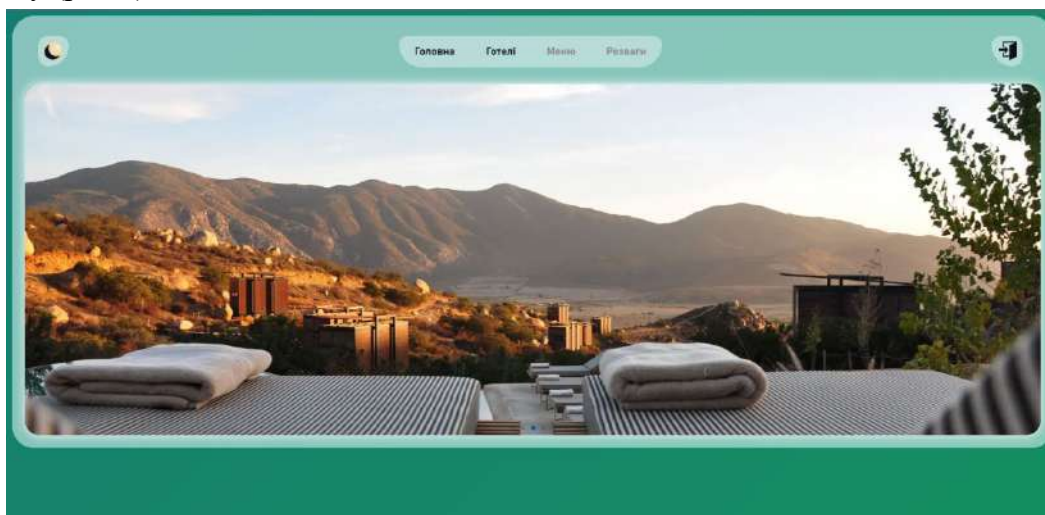


Рис. 7. Головна сторінка

Для того, щоб отримати доступ до створення власного готелю, потрібно при реєстрації особистого запису вказати, що користувач бажає бути власником готелю. У такому випадку в особистому кабінеті знизу під інформацією користувача будуть вкладки (рис. 8), які відповідають за страви, розваги, відгуки та готелі.

Id	Name	Ingredients	Weight	Description	Price	Rate	IsActive	Image	Actions
1	Поке боул з посасем	Рис, Лосось, Авокадо, Боби, Морква, Огірок, Цибуля зелена, Капуста червоноголова, Семена чіа, Кунжут	550 грам	Боул у перекладі з англ...	220	4.7	<input checked="" type="checkbox"/>		
2	Риба під томатним соусом	Хек, Морква, Цибуля, Томатний соус, Помідори, Солодкий перець, Боршно	600 грам	Апетитна соковита туш...	200	4.5	<input checked="" type="checkbox"/>		
9	Гранола з йогуртом та ягодами	Гранола, Йогурт з ложикою, Лохина, Малина, Манго, Ківі	500 грам	Йогурт з гранолою є на...	210	4.2	<input checked="" type="checkbox"/>		
13	Лосось у вершковому соусі	Лосось, Боршно, Йогурт, Вершки, Помідори, Базилик, Пармезан, Лимон, Куркума	600 грам	В страві, на які хочеть...	350	4.5	<input checked="" type="checkbox"/>		
14	Поке боул салат	Курка, Помідори, Кукурудза, Боби, Капуста, Соус Песто, Базилик, Кет-чуп	640 грам	Ще декілька років тому...	300	4.4	<input checked="" type="checkbox"/>		

Рис. 8. Головна сторінка. Вкладки, які доступні тільки для власників готелів

Висновки. У роботі визначений підхід до застосування UML-моделювання при проектуванні сценарію додатку. Представлено, що UML-моделі мають більше функціональних можливостей для розробки веб додатку.

Вебдодаток може бути налаштований та використовуваний для різних компаній. Реалізований вебдодаток може бути використаний для планування для будь-якого готелю.

Визначено, що запропонований підхід може застосовуватись в даній сфері розробки, а саме дає широкі можливості застосування UML-моделей для відображення подій (концептуальне моделювання, логічний та фізичний рівень) при розробці даних веб сайтів.

Список використаних джерел

1. Booch G. The Unified Modeling language UserGuide / G. Booch, J. Rumbaugh, I. Jacobson. – MA. : Addison-Wesley Publishing Co., 1999. – 512 p.
2. Distefano S. From UML to Petri nets: The PCM-based methodology / S. Distefano, M. Scarpa, A. Puliato // IEEE Transactions on Software Engineering. – 2010. – Vol. 37 (1). – Pp. 65-79.
3. Fowler M. UML Distilled: A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language / M. Fowler, K. Scott. – MA.: Addison-Wesley, 2000. – 472 p.
4. Bauer B. An extension of UML by protocols for multi-agent interaction / B. Bauer, J. P. Muller, J. Odell // Proceedings Fourth International Conference on MultiAgent Systems – Boston, MA, USA, 2000. – P. 207-214.
5. Gogolla M. USE: A UML-based specification environment for validating UML and OCL / M. Gogolla, F. Büttner, M. Richters // Science of Computer Programming. – 2007. – 69 (1-3). – P. 27-34.
6. Mobile application for advertising faculty educational services. Educational Technology Quarterly / G. V. Marchuk, V. V. Levkivskyi, M. S. Graf, Y. A. Dombrovska, I. V. Panarina // Educational Technology Quarterly. – 2023. – № 1. – Pp. 92-105. DOI: <https://doi.org/10.55056/etq.30>
7. Available parking places recognition system / V. Levkivskyi, D. Marchuk, N. Lobanchykova, et al. // CEUR Workshop Proceedings 4th Workshop for Young Scientists in Computer Science & Software Engineering. – 2022. – Vol. 3077. – Pp. 123-134.

References

1. Booch, G., Rumbaugh, J., & Jacobson, I. (1999). *The Unified Modeling language UserGuide*. Addison-Wesley Publishing Co.
2. Distefano, S., Scarpa, M., & Puliato, A. (2010). From UML to Petri nets: The PCM-based methodology. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 37(1), 65-79.
3. Fowler, M., & Scott, K. (2000). *UML Distilled: A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language* (3rd Edition). Addison-Wesley.
4. Bauer, B., Muller, J. P., & Odell, J. (2000). An extension of UML by protocols for multi-agent interaction. *Proceedings Fourth International Conference on MultiAgent Systems* (pp. 207-214).
5. Gogolla, M., Büttner, F., & Richters, M., (2007). USE: A UML-based specification environment for validating UML and OCL. *Science of Computer Programming*, 69(1-3), 27-34.

6. Marchuk, G.V., Levkivskiy, V.V., Graf, M.S., Dombrovska, Y.A. and Panarina, I.V., 2023. Mobile application for advertising faculty educational services. *Educational Technology Quarterly*, 2023(1), 92–105. <https://doi.org/10.55056/etq.30>.

7. Levkivskiy, V., Marchuk, D., Lobanchykova, N. et al. (2022). Available parking places recognition system. *CEUR Workshop Proceedings 4th Workshop for Young Scientists in Computer Science & Software Engineering*, 3077, 123–134.

Отримано 26.06.23

UDC 004.584

***Svitlana Kravchenko¹, Inna Suhoniak², Halyna Marchuk³,
Yevheniy Gryshkun⁴, Oksana Shved⁵***

¹Senior Lecturer of the Department Software Engineering
State University «Zhitomir polytechnic» (Zhitomir, Ukraine)

E-mail: svetlanakravcenko2012@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5895-9615>

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor Department of Computer Sciences
State University «Zhitomir polytechnic» (Zhitomir, Ukraine)

E-mail: isugonyak@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0484-4839>

³Senior Lecturer of the Department Computer Sciences
State University «Zhitomir polytechnic» (Zhitomir, Ukraine)

E-mail: mgv.555.mgv@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2954-1057>

⁴Senior lecturer of the Department Software Engineering
State University «Zhitomir polytechnic» (Zhitomir, Ukraine)

E-mail: evgenii2081991@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9996-2167>

⁵Student of the Department Software Engineering
State University «Zhitomir polytechnic» (Zhitomir, Ukraine)

E-mail: irongalaxy6@gmail.com

**UML MODELING OF THE ENTERTAINMENT AND HOTEL MENU PLANNING
APPLICATION DEVELOPMENT PROCESS**

The object of the study is the principle of applying the UML modeling model for the process of building a web application for planning entertainment and hotel menus.

The analysis of the study of this area of similar processes and the conduct of own research, which in turn require a more in-depth immersion in the very essence of the scientific area and expanding the horizons for further research, has been carried out.

The work algorithm and states of the software system, physical model are determined. The application of the object-oriented model of the system was demonstrated, and the design of the software product was carried out. The UML model was used to visualize and optimize the presentation of the application.

The work defines the analysis of requirements, conceptual modeling of the construction of the site development model. The main stages of creating the application are analyzed. The functional possibilities of using UML modeling in application development are characterized.

Keywords: software modeling; physical model; UML; website, development environment.

Fig.: 8. **References:** 5.

Наталія Сокоринська¹, Юрій Постернак², Лілія Зайцева³, Олександр Руденок⁴

¹старший науковий співробітник

Центральний науково-дослідний інститут Збройних сил України (Київ, Україна)

E-mail: sokor-nata@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9713-7289>

²аспірант

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: posternak21051976@meta.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9881-5253>

³аспірант

Інститут телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України (Київ, Україна)

E-mail: lili5990n@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0668-711X>

⁴аспірант

Інститут телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України (Київ, Україна)

E-mail: a_rudenok@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6910-1823>

МЕТОД АДАПТИВНОГО ВИБОРУ РОЗМІРУ ДІАГРАМ СТАНІВ ТУРБО КОДІВ У СИСТЕМАХ 5G ТА ІoT

У статті запропоновано метод оптимізації роботи кодера/декодера турбокоду в системах 5G та ІoT за рахунок адаптивного вибору розміру діаграм станів з використанням запропонованого показника невизначеності декодування. Розглянуто принципи формування діаграм станів кодера та декодера турбокоду, з'ясовано невизначеність декодування даних. Використовуючи апостеріорні та апостеріорні дані декодера турбокоду запропоновано алгоритм зміни діаграми станів кодера/декодера турбокоду. На відміну від відомих результатів, залежно від відношення сигнал-шум у каналі та значень нормалізованої кількості змін знаку апостеріорно-апостеріорних логарифмічних відносин функції правдоподібності про передані біти даних декодера турбокоду здійснюється адаптивний вибір розміру діаграми станів кодера/декодера ТК. Аналіз моделювання показує, що для забезпечення заданих показників достовірності інформації метод здійснює вибір раціонального розміру діаграми станів кодера/декодера ТК, що підтверджено порівнянням з іншими результатами моделювання.

Ключові слова: завадостійке кодування; турбокод; моделювання; ітеративне додування; функції правдоподібності.

Рис.: 11. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Безпроводовий зв'язок – це галузь, що швидко розвивається, та спрямована на взаємодію між людьми як у повсякденному житті, так і в бізнесі. Розвиток безпроводового зв'язку сприяє розвитку економіки та суспільства. Як показано на рис. 1, технологія безпроводового зв'язку пройшла багато років змін. У наш час дедалі більше людей прагнуть отримати вищі швидкості передачі та кращий безпроводовий доступ до Інтернету.

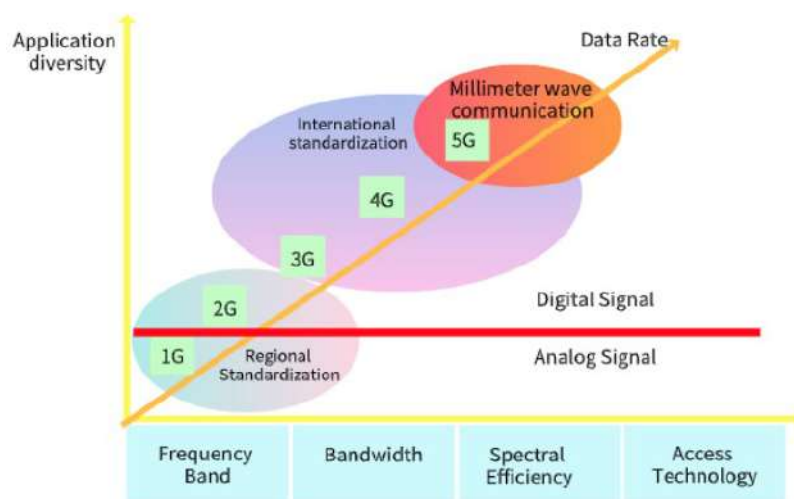


Рис. 1. Еволюція безпроводового зв'язку

У такому разі, мобільний зв'язок четвертого покоління 4G Long Term Evolution (LTE) широко використовується в теперішній час. Завдяки розробленим технологіям, при низькій мобільності, безпроводові мережі 4G можуть максимально запропонувати швидкість передачі даних 1 Гбіт/с, наприклад локального безпроводового доступу. Для високої мобільності системи 4G можуть підтримувати швидкість передачі даних 100 Мбіт/с [1; 2].

Системи 4G забезпечують гарну продуктивність у безпроводовому зв'язку, але при цьому існують проблеми споживання енергії та обмеження частотного спектра. Комунікаційні компанії завжди стикаються з різними вимогами до збільшення швидкості передачі даних та покращення енергоефективності. Тому постало питання розробки систем нового покоління мобільного зв'язку під назвою The Fifth Generation (5G).

Вчені вважають, що порівняно з 4G мережа 5G може досягти в тисячу разів більшу ємність системи, в десять разів більшу спектральну ефективність та швидкість передачі даних (до 10Гбіт/с), і в двадцять п'ять разів вищу середню пропускну здатність комірки [3].

Технологія мережі 5G та її розвиток головним чином обумовлені двома значними тенденціями. Доставка послуги з великими даними, такі як відео тощо, вимагають більшої пропускну здатності та швидшого безпроводового широкосмугового зв'язку. Потреба в надширокосмугових послугах викликана зростанням відеотрафіку та таких програм, як віртуальна реальність, прямі відеотрансляції та відео повної високої чіткості (FHD). Технологія 5G вимагає швидкостей передачі даних для підвищення в тисячу разів ємності системи. Швидка еволюція Інтернету речей (IoT) також вимагає потреби в технології 5G з надзвичайно низькою затримкою та наднадійністю підключення. Такі програми, як «розумні будинки», «розумне місто», послуги доповненої та віртуальної реальності, безпроводові медичні послуги, комунальні програми, промислова автоматизація, допомога водієві, автономні водіння, транспортні системи, інфраструктура між транспортним засобом і зв'язок між транспортним засобом потребують провадження технології 5G. Вимоги додатків із низькою швидкістю передачі даних потребують високої надійності та низької затримки, що робить цю технологію відмінною від мобільних широкосмугових послуг. Ці програми також вимагають спілкування між машинами, а не людьми. Крім того, програми IoT вимагають меншої вартості та споживання енергії.

Постановка проблеми. На рис. 2 представлена базова архітектура технології 5G, у якій є різні сервери для потокової передачі, зберігання даних, зв'язку у реальному часі, політики системи керування та передачі даних за протоколами 3G, LTE, WLAN і GPRS/EDGE, які підключаються до терміналу 5G.

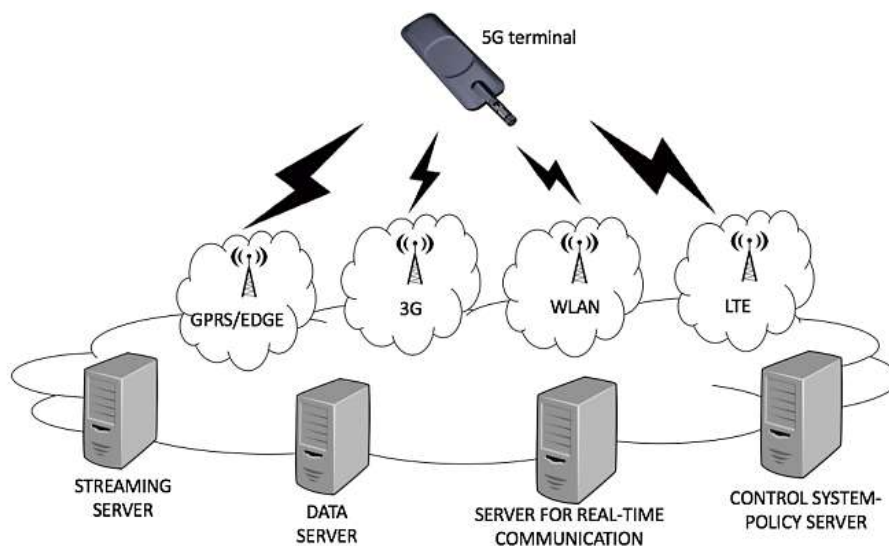


Рис. 2. 5G архітектура

У теперішній час оператори зв'язку впроваджують цифрову трансформацію для створення сучасного цифрового світу. Надавати підприємствам і приватним особам в реальному часі високошвидкісну передачі даних, потребує End-to-End (E2E) скоординова-

ної архітектури з гнучким, автоматичним та інтелектуальним керуванням протягом кожної фази. Комплексна хмарна адаптація мереж, операційних систем, і послуги є необхідною умовою цієї довгоочікуваної цифрової трансформації.

У зв'язку з цим одним із основних завдань є забезпечення достовірності передачі інформації та підвищення пропускну здатності систем.

Забезпечення достовірності можна досягти використанням завадостійких кодів, наприклад: LDPC-кодів [4; 5], турбокодів (ТК), в поєднанні з методами адаптації. ТК та LDPC-коди прийняті стандартами мобільного зв'язку п'ятого покоління відповідно 4G LTE та 5G.

У системах 4G та 5G використовуються методи адаптивної модуляції, потужності та кодування. У системах 4G, 5G при адаптації регулюється швидкість кодування R діапазоні від $1/5$ до $2/3$. При цьому застосування ТК є доцільним при малих швидкостях кодування, а LDPC-кодів – при великих.

У 4G LTE для високошвидкісної передачі використовуються ТК в поєднанні з модуляціями ФМ-4, КАМ-16, КАМ-64, а для низькошвидкісної - згорткові та блокові коди. У системах 5G для високих швидкостей застосовується код LDPC, для низьких - полярні коди. Як модуляції використовуються ФМ-4, КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [6] представлений адаптивний алгоритм дискретної оптимізації сигнальних конструкцій та швидкості кодування завадостійкого коду для систем DS-CDMA. Залежно від значень відношення сигнал/шум розраховується значення ймовірності помилки для різних схем модуляції сигналу і порівнюється із заданим значенням. Залежно від результатів порівняння здійснюється вибір потрібних параметрів. При цьому розглядаються канали з адитивним білим гауссівським шумом (АБГШ) та релеївськими завмираннями.

У дослідженнях [7] представлений алгоритм дискретної адаптації швидкості кодування з допомогою псевдовипадкового перемешувача залежно від значення ймовірності помилки.

У роботі [8] представлена система гібридного автоматичного запиту на повторну передачу HARQ (hybrid automatic repeat request) з м'яким/жорстким прийняттям рішення при декодуванні. М'яке ухвалення рішення при декодуванні обмежене рівнем відношення сигнал-шум 1,4 дБ. Процес адаптації відбувається так: змінюється розмір блоку інформації та швидкості кодування залежно від відношення сигнал/шум. При цьому розглядається канал із АБГШ.

У роботі [9] застосовуються LDPC-коди та розглядається канал з АБГШ. Основною ідеєю даного підходу є оцінка в реальному часі відношення сигнал/шум і подальша адаптація в залежності від даного значення. Як показник достовірності інформації в роботі вибрано середню ймовірність бітової помилки декодування.

У роботі [10] також застосовуються LDPC-коди та застосовується однорівнева параметрична адаптація швидкості кодування R . Вибір оптимальної швидкості кодування шляхом порівняння поточної бітової помилки з табличними значеннями.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що недостатньо розглянуті методи багаторівневої адаптації, як за параметрами, так і за структурою.

Метою статті є розробка методу адаптивного вибору розміру діаграм станів турбо кодів в системах 5G та IOT за рахунок використання показника невизначеності декодування, з урахуванням апріорної та апостеріорної інформації декодера турбо кода.

Виклад основного матеріалу. Турбокод утворюється при паралельному з'єднанні двох або більше коригувальних компонентних кодів, які розділяються пристроєм обмеження. У ролі компонентних кодів можуть використовуватися згорткові коди та блокові коди – коди Хеммінга, Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема, Ріда-Малера, Ріда-Соломона.

Розглянемо двійковий згортчний код зі швидкістю $R = 1/2$ з обмеженням K і пам'яттю $M = K - 1$. Цей кодер можна представити як лінійну систему з дискретною кінцевою імпульсною характеристикою, що породжує добре знайомий несистематичний згортчний (nonsystematic convolutional – NSC) код (НЗК), різновид якого показаний на рис. 3.

На вхід кодера у момент k поступає біт d_k і відповідним кодовим словом є двійкова пара (u_k, v_k) , де $u_k = \text{mod}_2 g_{1i} = 0,1$, $v_k = \text{mod}_2 g_{2i} = 0,1$.

$G1: \{g_{1i}\}$, $G2: \{g_{2i}\}$ – два генератори коду, зазвичай виражаються у вісімковій системі числення.

У цьому випадку $M = 3$ і використовуються два генератори $G1 = \{111\}$ і $G2 = \{101\}$.

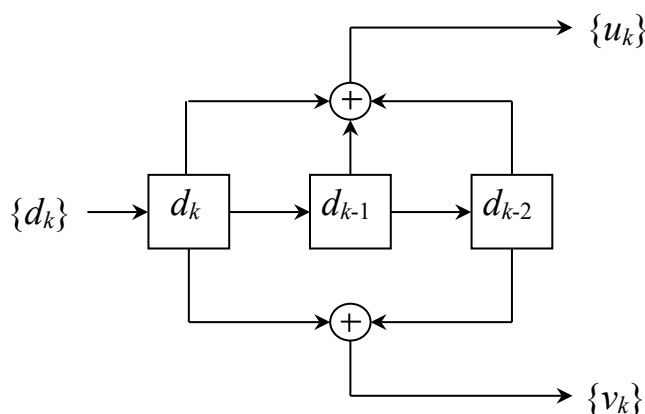


Рис. 3. Структурна схема кодера НЗК

Показано, що при великих значеннях відношення сигнал/шум достовірність передачі з кодом НЗК вища, ніж у систематичного коду з тією ж пам'яттю. При малих значеннях відношення сигнал/шум як складові компоненти для турбокоду було запропоновано клас згортчних кодів з нескінченною імпульсною характеристикою. Такі ж компоненти використовуються в рекурсивних систематичних загортчних (recursive systematic convolutional – RSC) кодах (РСЗК), оскільки в них заздалегідь кодовані біти даних постійно повинні подаватися назад на вхід кодера. При високих швидкостях коди РСЗК забезпечують кращі характеристики, ніж найкращі коди НЗК при будь-яких значеннях відношення сигнал/шум.

Двійковий код РСЗК з $R = 1/2$ виходить з коду НЗК за допомогою контура зворотного зв'язку й установки одного з двох виходів (u_k або v_k) рівним d_k . На рис. 4 показаний приклад такого РСЗК, де a_k отримується з рекурсивної процедури: $a_k = d_k + \gamma_i a_{k-1} \text{ mod } 2$, а $\gamma_1 = g_{1i}$, якщо $u_k = d_k$, и g_{2i} – якщо $v_k = d_k$.

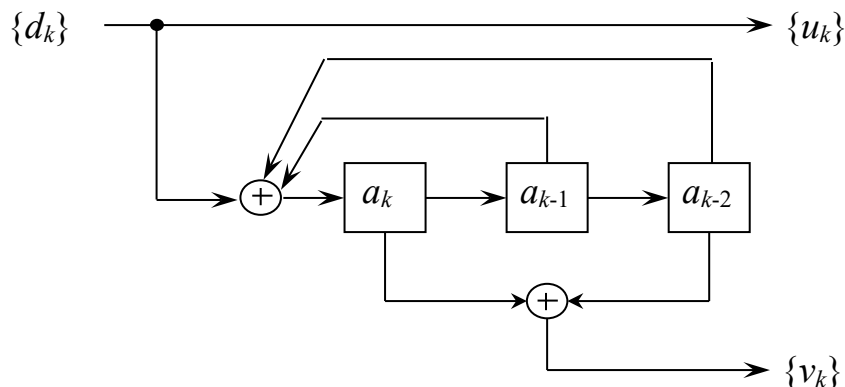


Рис. 4. Структурна схема кодера РСЗК

На рис. 5 зображена решітчаста структура РСЗК, представленого на рис. 4.

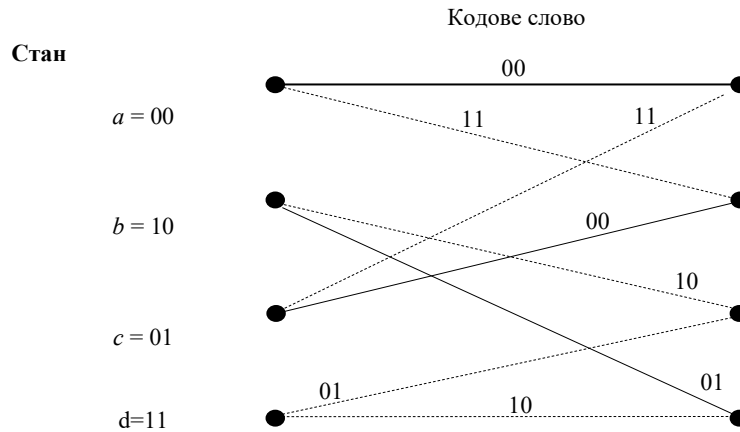


Рис. 5. Решітчаста діаграма РСЗК ТК

Декодування турбокодів відбувається за тією ж ґратчастою діаграмою, за якою відбувається і кодування.

Наприклад, ґратчасті діаграми для РСЗК (1, 5/7) і (1, 13/11) показані на рис. 6 та 7.

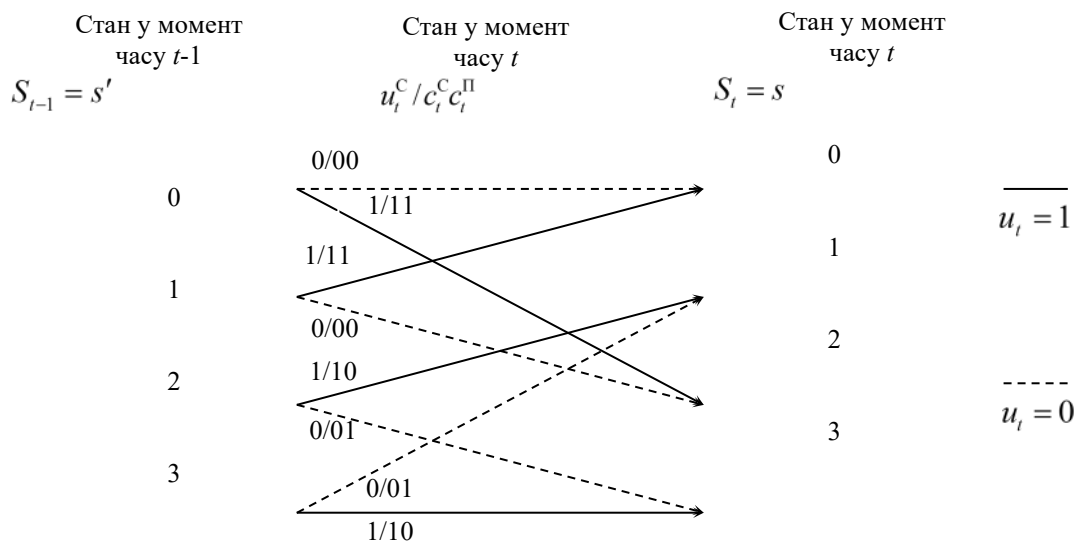


Рис. 6. Ґратчаста діаграма станів для компонентного коду (1, 5/7)

При адаптивній зміні розміру блоку \tilde{N} адаптивно змінюється кількість діаграм станів РССК, причому їх кількість дорівнює кількості біт в блоці розміром \tilde{N} .

Для декодування кожного біта обчислюється пряма $\tilde{\alpha}_{t-1}(s')$, зворотна $\tilde{\beta}_t(s)$ рекурсія і параметр $\gamma_t(s', s)$, $t \in \overline{1, \tilde{N}}$, логарифмічне відношення функцій правдоподібності (ЛВФП) для переданий біт $L(u_k)$.

Наприклад, алгоритм декодування турбокоду MAP при адаптивній зміні розміру блоку \tilde{N} для компонентного коду (1, 5/7) має такий вигляд (рис. 8).

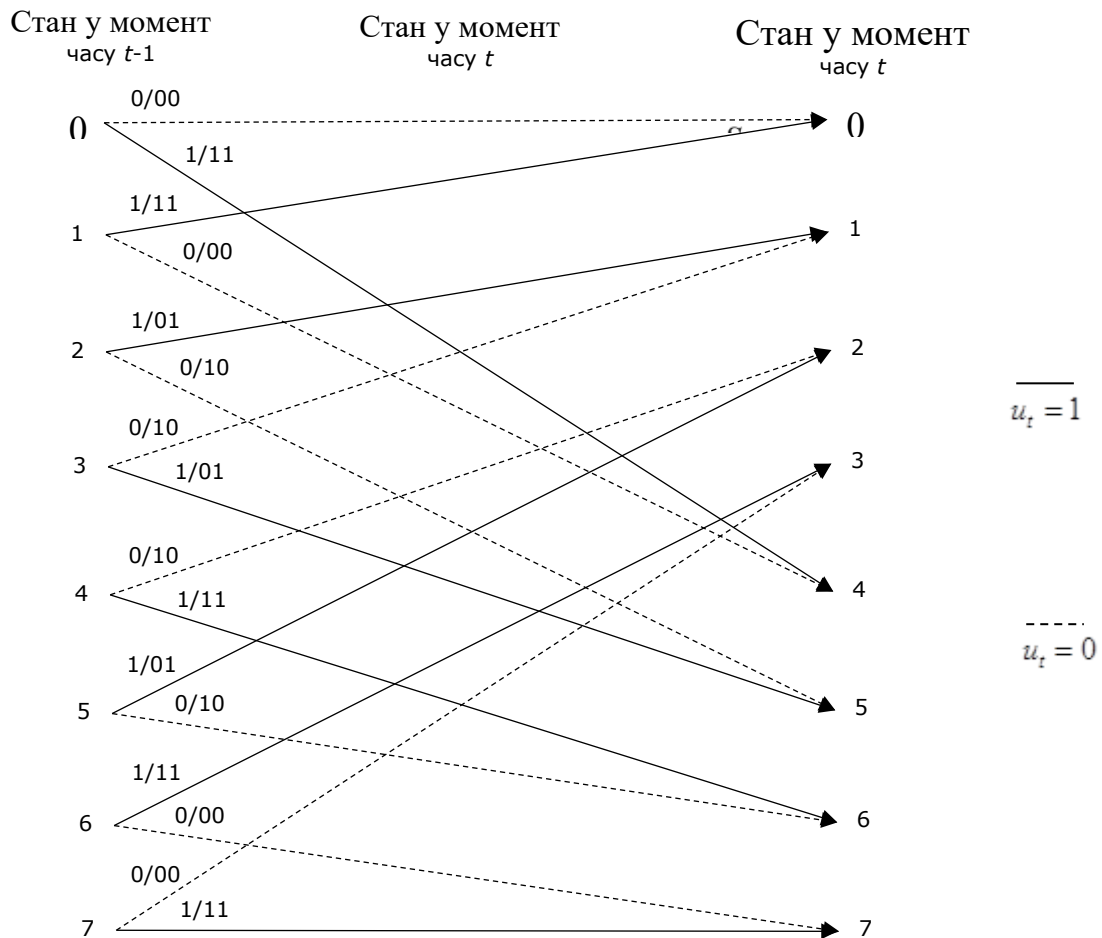


Рис. 7. Ґратчаста діаграма станів для компонентного коду (1, 13/11)

Логарифмічне відношення функцій правдоподібності $L(u_t)$ про переданий біт u_t визначається таким чином:

$$L(u_t) = \log \left[\frac{\sum_{u^+} P(s_{t-1} = s', y_1^{t-1}) P(u_t = 1, y_t, y_{t+1}^N / s_{t-1} = s', y_1^{t-1}) / P(y_1^N)}{\sum_{u^-} P(s_{t-1} = s', y_1^{t-1}) P(u_t = 0, y_t, y_{t+1}^N / s_{t-1} = s', y_1^{t-1}) / P(y_1^N)} \right] =$$

$$= \log \left[\frac{\sum_{u^+} P(s_{t-1} = s', y_1^{t-1}) P(u_t = 1, y_t, y_{t+1}^N / s_{t-1} = s') / P(y_1^N)}{\sum_{u^-} P(s_{t-1} = s', y_1^{t-1}) P(u_t = 0, y_t, y_{t+1}^N / s_{t-1} = s') / P(y_1^N)} \right],$$

де s' – стан для моменту часу $t - 1$, s – стан для моменту часу t , $y_1^N = \{y_1^{t-1}, y_t, y_{t+1}^N\}$ – один кадр прийнятого символу, який може бути розбитий на три частини. Перша частина містить спостереження перед моментом часу t , друга частина – поточне спостереження, третина – спостереження після моменту t .

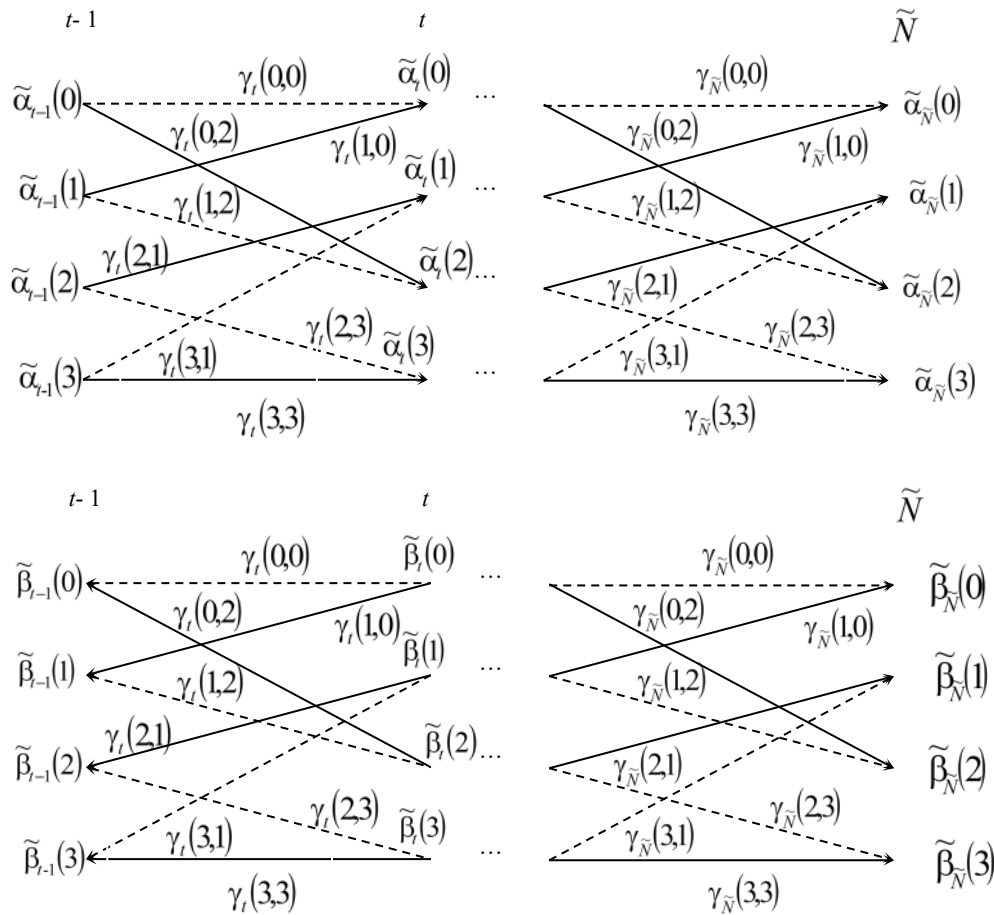


Рис. 8. Алгоритм декодування турбокоду MAP для РСЗК виду (1, 5/7) при адаптивній зміні розміру блоку \tilde{N}

Алгоритм реалізації методу адаптації діаграм станів кодування/декодування турбокодів є наступним.

Крок 1. Формування початкової діаграми станів кодера та декодера ТК.

Крок 2. Формування множини значень інформаційних та перевірочних символів кодером ТК: $\bar{X} = (\bar{X}^C, \bar{X}^P)$, $\bar{X}^P = (\bar{X}^{P1}, \bar{X}^{P2})$.

Крок 3. Формування множини значень інформаційних та перевірочних символів, прийнятих з каналу для декодера ТК: $\bar{Y}^1 = (L_c \bar{Y}^{C1}, L_c \bar{Y}^{P1})$, $\bar{Y}^2 = (L_c \bar{Y}^{C2}, L_c \bar{Y}^{P2})$.

Крок 4. Формування множини ЛВФП на вході декодера про передані біти даних на 1-му і 2-му декодери j -ї ітерації

$$LA = \begin{bmatrix} L_a^{1,j}(x_1^C) & L_a^{1,j}(x_2^C) & \dots & L_a^{1,j}(x_{\tilde{N}}^C) \end{bmatrix},$$

$$LA = \begin{bmatrix} L_a^{2,j}(x_1^C) & L_a^{2,j}(x_2^C) & \dots & L_a^{2,j}(x_{\tilde{N}}^C) \end{bmatrix}.$$

Крок 5. Формування множини апостеріорних значень ЛВФП про передані біти на 1-му та 2-му декодери ТК:

$$LE = \begin{bmatrix} L_e^{1,j}(x_1^C) & L_e^{1,j}(x_2^C) & \dots & L_e^{1,j}(x_{\tilde{N}}^C) \end{bmatrix},$$

$$LE = \begin{bmatrix} L_e^{2,j}(x_1^C) & L_e^{2,j}(x_2^C) & \dots & L_e^{2,j}(x_{\tilde{N}}^C) \end{bmatrix}.$$

Крок 6. Виконання циклу: якщо $\text{sign}(L_a^{d,j}(x_t^C)) \neq \text{sign}(L_e^{d,j}(x_t^C))$, то $R^{d,j}(i+1) = R^{d,j}(i) + 1, R_{\Sigma} = \sum_{j=1}^I \sum_{d=1}^2 R^{d,j}, t \in \overline{1, N}, d \in \overline{1, 2}, j \in \overline{1, I}$. Якщо умова не виконується, то $R^{d,j}(i+1) = R^{d,j}(i)$.

Крок 7. Обчислення середнього значення за результатами прийому блоків В: $\tilde{R} = \sum_{i \in I} R_{\Sigma i}$.

Крок 8. Розраховується значення відношення сигнал-завада Z та за рішенням умовної дискретної задачі оптимізації: $N^* = \min_S f(|\tilde{R}(\tilde{N}) - R_{\text{зад}}(\tilde{N})|, Z)$, вибирається параметр \tilde{N} розмірів діаграм станів кодера та декодера турбо коду. Задані значення показника невизначеності $\tilde{R}_{\text{зад}}$ обчислюються за результатами імітаційного моделювання для заданих значень середньої ймовірності бітової помилки декодування $P_{B \text{ дек}}$. При цьому задані значення показника невизначеності $\tilde{R}_{\text{зад}}$ відповідають значенням відношення сигнал/шум і ці відповідності визначаються за допомогою імітаційного моделювання, $f(\cdot)$ – задається у вигляді таблиці.

У табл. 1 та 2 показано значення нормованих показників невизначеності, що застосовуються при адаптації розмірів діаграм станів кодера та декодера турбокоду, які отримані шляхом проведення імітаційного моделювання для ТК з поліномами (1, 13/11), швидкістю кодування $R = 1/3$, алгоритмом декодування Max Log Map для різних ітерацій декодування та розмірів діаграм станів кодера/декодера ТК при використанні каналу з адитивним білим гауссівським шумом з різними значеннями відношення сигнал-шум (ВСП).

Таблиця 1 – Результати моделювання при турбокодуванні з регулярним алгоритмом перемежування, алгоритмом декодування Max Log Map при різних ітераціях декодування та розмір діаграми станів 100 біт

ВСП/Ітерація	$I = 1$	$I = 2$	$I = 4$	$I = 8$
0	77,055	39,833	13,957	5,421
0,2	75,115	37,435	12,693	4,869
0,4	72,899	35,795	11,551	4,387
0,6	68,789	32,861	10,644	3,907
0,8	65,224	30,402	9,340	3,418
1,0	61,513	27,722	8,232	2,807
1,2	57,511	24,928	6,873	2,373
1,4	53,407	21,915	5,813	1,888
1,6	49,420	19,394	4,826	1,534
1,8	45,169	16,687	3,800	1,134
2,0	40,738	14,079	2,990	0,843
2,2	37,090	11,551	2,354	0,630
2,4	33,434	9,646	1,661	0,427

Таблиця 2 – Результати моделювання при турбокодуванні з регулярним алгоритмом перемежування, алгоритмом декодування Max Log Map при різних ітераціях декодування та розміру діаграми станів 500 біт

ВСП/Ітерація	$I = 1$	$I = 2$	$I = 4$	$I = 8$
0	71,354	32,638	9,481	3,239
0,2	68,186	30,242	8,435	2,784
0,4	65,008	27,651	7,461	2,388
0,6	61,692	25,121	6,443	2,012
0,8	58,037	22,555	5,451	1,643
1,0	53,983	19,950	4,629	1,347
1,2	50,121	17,343	3,753	1,059
1,4	46,066	15,072	3,014	0,841
1,6	42,116	12,718	2,406	0,620
1,8	38,062	10,720	1,849	0,458
2,0	34,356	8,798	1,372	0,345
2,2	30,336	7,161	1,037	0,232
2,4	26,674	5,607	0,716	0,152

Для аналізу ефективності методу адаптації діаграм станів кодера та декодера ТК за рахунок використання адаптивного вибору розміру діаграм станів використовувалося імітаційне моделювання. Для порівняння було обрано стандарт мобільного зв'язку четвертого покоління LTE-Advanced. Моделювання проводилося в середовищі Visual Studio 2019. Моделювалася система передачі даних з турбокодами, модулятором (демодулятором) OFDM, каналом з адитивним білим гауссівським шумом. Результати імітаційного моделювання були отримані з достовірності $\alpha = 0,95$, $t_\alpha = 0,95$ (аргумент функції Лапласа) відносної точності $d = 0,1$.

Застосовувався турбокод з генераторами (1, 23/21), алгоритмом декодування Log Map та Max Log Map, швидкості кодування $R = 1/3$, псевдовипадковим та регулярним перемежуванням (деперемежуванням), адаптивним вибору розміру діаграм станів $\tilde{N} = 100, 500, 1000$. Відношення сигнал-завада змінювалося від 0 до 2,5 дБ. Як задане значення достовірності інформації вибрано середнє значення ймовірності бітової помилки декодування $P_{V \text{ дек_зад}} = 10^{-4}$.

На рис. 9-11 показані графічні залежності середньої ймовірності бітової помилки декодування $P_{V \text{ дек}}$ від відношення сигнал/шум E_b / N_J , де E_b – енергія біта, N_J – спектральна щільність потужності білого гауссівського шуму в каналі з адитивним білим гауссівським шумом, ТК з поліномами (1, 23/21), швидкістю кодування $R = 1/3$, алгоритмом декодування Max Log Map для різних ітерацій декодування та розмірів діаграм станів кодера/декодера ТК.

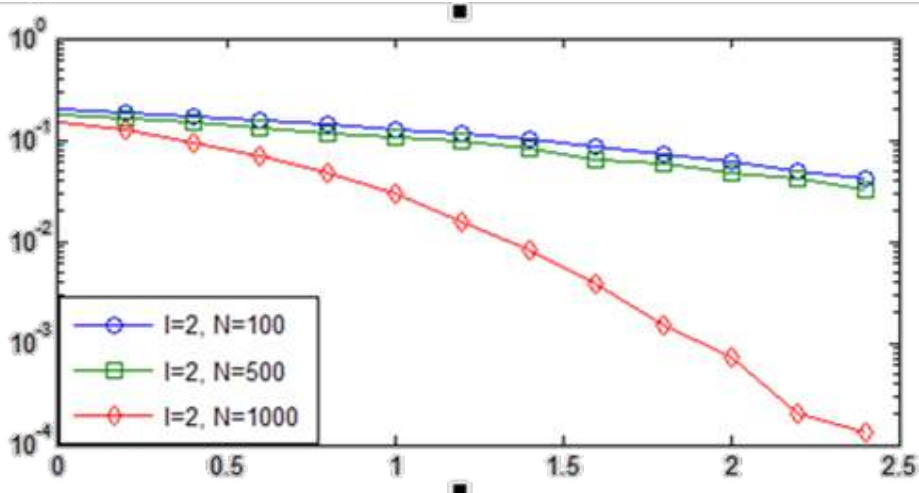


Рис. 9. Графік залежності середньої ймовірності біткової помилки від відношення сигнал/шум у каналі для другої ітерації декодування та різних розмірів діаграм стану в кодера/декодера ТК

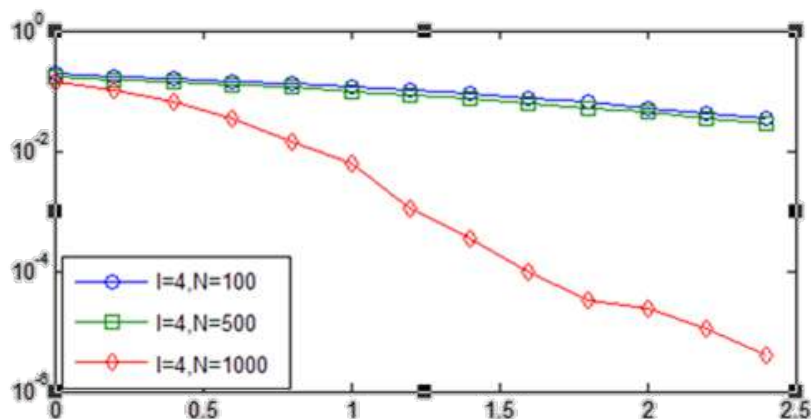


Рис. 10. Графік залежності середньої ймовірності біткової помилки від відношення сигнал/шум у каналі для четвертої ітерації декодування та різних розмірів діаграм станів кодера/декодера ТК

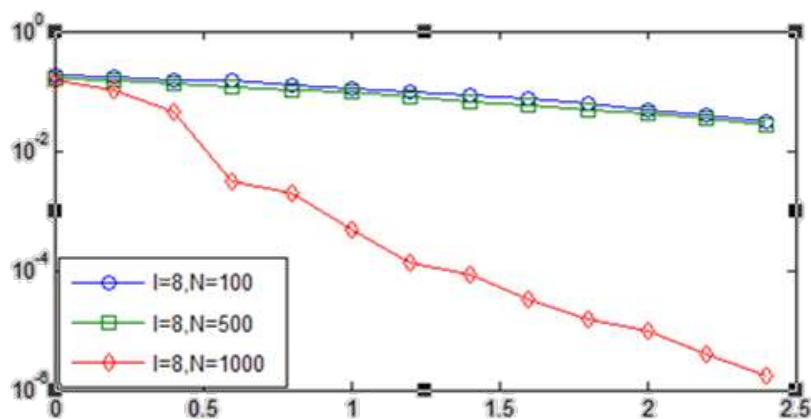


Рис. 11. Графік залежності середньої ймовірності біткової помилки від відношення сигнал/шум у каналі для восьмої ітерації декодування та різних розмірів діаграм станів кодера/декодера ТК

Аналіз результатів моделювання свідчить, що з адаптивним збільшенням розміру діаграми станів кодера/декодера ТК відбувається зменшення ймовірності помилки декодування. Так, при зміні параметра розміру діаграми станів кодера/декодера \tilde{N} з 100 до 1000 ймовірності помилки декодування зменшується. Наприклад, з $2 \cdot 10^{-1}$ до $6 \cdot 10^{-4}$ для відношення сигнал/шум рівного 1 дБ при 8 ітераціях декодування, з $8 \cdot 10^{-1}$ до 10^{-5} для відношення сигнал/шум, що дорівнює 2 дБ при 8 ітераціях декодування.

Висновки. Сутність методу полягає в оптимізації роботи кодера та декодера турбокоду за рахунок використання адаптивного вибору розміру діаграм станів з використанням запропонованого показника невизначеності декодування. Реалізація методу дозволить підвищити задані показники достовірності інформації без зниження пропускнуєї спроможності трактів систем і мереж безпроводових систем передачі даних.

На відміну від відомих результатів, залежно від відношення сигнал-шум у каналі та значень нормалізованої кількості змін знаку апостеріорно-апріорних логарифмічних відносин функцій правдоподібності про передані біти даних декодера турбокоду здійснюється адаптивний вибір розміру діаграми станів кодера/декодера ТК.

Аналіз моделювання показує, що для забезпечення заданих показників достовірності інформації метод здійснює вибір раціонального розміру діаграми станів кодера/декодера ТК, що підтверджено порівнянням з іншими результатами моделювання.

Метод можна застосовувати спільно з іншими методами адаптації, наприклад з адаптацією швидкості кодування, поліномами компонентних кодів ТК, в системах з багато-параметричною адаптацією, що функціонують в умовах апріорної невизначеності.

Список використаних джерел

1. 5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment and Practice / M. Shafi, A. F. Molisch, P. J. Smith, T. Haustein, P. Zhu, P. De Silva, F. Tufvesson, A. Benjebbour, G. Wunder // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. – 2017. – Vol. 35, № 6. – Pp. 1201-1221. DOI: 10.1109/JSAC.2017.2692307.
2. An Overview of 5G Technology / J. A. Adebisola, A. A. Ariyo, O. A. Elisha, A. M. Olubunmi, O. O. Julius // *2020 International Conference in Mathematics, Computer Engineering and Computer Science (ICMCECS)*. – 2020. – Pp. 1-4. DOI: 10.1109/ICMCECS47690.2020.240853.
3. Zaitsev S. V. Structural adaptation of the turbo code coder and decoder for generating the transmission repeat request under conditions of uncertainty / S. V. Zaitsev, V. V. Kazymyr // *Radioelectronics and Communications Systems*. – Springer, 2017. – Vol. 60. – Pp. 18-27.
4. An overview of channel coding for 5G NR cellular communications / J. Bae, A. Abotabl, H. P. Lin, K. B. Song, J. Lee // *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*. – 2019. – Pp. 1-14. DOI: 10.1017/ATSIP.2019.10.
5. MacKay D. J. C. Near Shannon limit performance of low density parity check codes / D. J. C. MacKay, R. M. Neal // *Electron. Lett.* – 1996. – Vol. 32, № 18. – Pp. 457-458.
6. Arora K. A survey on channel coding techniques for 5G wireless networks / K. Arora, J. Singh, Y. S. Randhawa // *Telecommun. Syst.* – 2020. – Vol. 73 – Pp. 637-663.
7. Interleaver Design for Turbo Codes / H. R. Sadjadpour, N. J. A. Sloane, M. Salehi, G. Nebe // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. – 2006. – Vol. 19. – Pp. 831-837.
8. Submarine Transmission Systems Using Digital Nonlinear Compensation and Adaptive-Rate Forward Error Correction / A. Ghazisaeidi, I. Fernandez, L. Schmalen [and other] // *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*. – 2016. – Vol. 34, № 8. – Pp. 1886-1895.
9. Kumar S. Performance comparison of turbo codes and modified turbo codes with different rate / S. Kumar, H. Dalal // *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*. – 2014. – Vol. 3, Is. 5, May.
10. Noise Adaptive LDPC Decoding Using Particle Filtering / S. Wang, L. Cui, S. Cheng, Y. Zhai, M. Yeary, Q. Wu // *IEEE Transactions on Communications*. – 2011. – Vol. 59, № 4. – Pp. 913-916.
11. A Novel Algorithm to Design Rate-Adaptive Irregular LDPC Codes / R. Mahalakshmi, P. Bhuvaneshwari, V., Tharini, et al. // *Wireless Pers Commun.* – 2020. – № 113. – Pp. 453-468.

Список використаних джерел

1. Shafi, M., Molisch, A. F., Smith, P. J, Haustein, T., Zhu, P., De Silva, P., Tufvesson, F., Benjebbour, A., & Wunder, G. (2017). 5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment and Practice // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. – 2017. – Vol. 35, № 6. – Pp. 1201-1221. DOI: 10.1109/JSAC.2017.2692307.
2. Adebisola, J.A., Ariyo, A.A., Elisha, O.A., Olubunmi, A.M., & Julius, O.O. (2020). An Overview of 5G Technology. *2020 International Conference in Mathematics, Computer Engineering and Computer Science (ICMCECS) (pp. 1-4)*. DOI: 10.1109/ICMCECS47690.2020.240853.
3. Zaitsev, S.V., & Kazymyr, V.V. (2017). Structural adaptation of the turbo code coder and decoder for generating the transmission repeat request under conditions of uncertainty. *Radioelectronics and Communications Systems*, (60), 18-27.
4. Bae J., Abotabl A., Lin H. P., Song K. B., & Lee J. (2019). An overview of channel coding for 5G NR cellular communications. *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, 1-14. DOI: 10.1017/ATSIP.2019.10.
5. MacKay, D. J. C., & Neal, R. M. (1996). Near Shannon limit performance of low density parity check codes. *Electron. Lett.*, 32(18), 457-458.

6. Arora, K., Singh, J., & Randhawa, Y.S. (2020). A survey on channel coding techniques for 5G wireless networks. *Telecommun. Syst.*, 73, 637-663.
7. Sadjadpour, H.R., Sloane, N. J. A., Salehi, M., & Nebe, G. (2006). Interleaver Design for Turbo Codes. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 19, 831-837.
8. Ghazisaeidi, A., Fernandez, I., & Schmalen, L. (2016). Submarine Transmission Systems Using Digital Nonlinear Compensation and Adaptive-Rate Forward Error Correction. *IEEE/OSA Journal on Lightwave Technology*, 34(8), 1886-1895.
9. Kumar, S., & Dalal, H. (2014). Performance comparison of turbo codes and modified turbo codes with different rate. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, 3(5).
10. Wang, S., Cui, L., Cheng, S., Zhai, Y., Yeary, M., & Wu, Q. (2011). Noise Adaptive LDPC Decoding Using Particle Filtering. *IEEE Transactions on Communications*, 59(4), 913-916.
11. Mahalakshmi R., Bhuvaneshwari P., Tharini V. et al. (2020). A Novel Algorithm to Design Rate-Adaptive Irregular LDPC Codes. *Wireless Pers Commun*, 113, 453-468.

Отримано 14.06.23

UDC 681.327

Natalia Sokorynska¹, Yurii Posternak², Liliia Zaitseva³, Oleksandr Rudenok⁴¹senior research fellow

Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: sokor-nata@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9713-7289>²postgraduate

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: posternak21051976@meta.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9881-5253>³postgraduate

Institute of Telecommunications and Global Information Space

of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: lili5990n@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0668-711X>⁴postgraduate

Institute of Telecommunications and Global Information Space

of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: a_rudenok@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6910-1823>

THE METHOD OF ADAPTIVE SELECTION OF THE SIZE OF TURBO CODE STATE DIAGRAMS IN 5G AND IOT SYSTEMS

The article proposes a method for optimizing the operation of the turbocode encoder/decoder in 5G and IoT systems due to the adaptive selection of the state diagram size using the proposed decoding uncertainty indicator.

The principles of forming state diagrams of the turbo code encoder and decoder are considered, and the uncertainty of data decoding is clarified. Using the a priori and a posteriori data of the turbo code decoder, an algorithm for changing the state diagram of the turbo code encoder/decoder is proposed.

The essence of the method is to optimize the operation of the turbo code encoder and decoder by using adaptive selection of the state diagram size using the proposed decoding uncertainty indicator. The implementation of the method will allow to increase the given indicators of reliability of information without reducing the bandwidth of systems and networks of wireless data transmission systems.

In contrast to the known results, depending on the signal-to-noise ratio in the channel and the values of the normalized number of sign changes of the a posteriori-prior logarithmic relations of the likelihood functions about the transmitted data bits of the turbo code decoder, an adaptive selection of the state diagram size of the TC encoder/decoder is made.

The simulation analysis shows that in order to ensure the given indicators of information reliability, the method selects a rational size of the TC encoder/decoder state diagram, which is confirmed by comparison with other simulation results.

The method can be used together with other methods of adaptation, for example, with adaptation of coding speed, polynomials of TC component codes, in systems with multi-parameter adaptation operating under conditions of a priori uncertainty. The types of virtual agents in social networks are distinguished: primary source, bot accounts, troll accounts, real people.

Keywords: interference-resistant coding; turbo code; modeling; iterative addition; likelihood functions.

Fig.: 11. References: 10.

РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2023-2(32)-261-268
УДК 628.3

Микола Гомеля¹, Інна Трус², Олена Глушко³, Ірина Макаренко⁴

¹доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та технології рослинних полімерів
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: m.gomelya@kpi.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1165-7545>

ResearcherID: [J-4345-2017](https://orcid.org/0000-0003-1165-7545), Scopus Author ID: [6507653734](https://orcid.org/0000-0003-1165-7545)

²кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: inna.trus.m@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6368-6933>

ResearcherID: [I-3204-2017](https://orcid.org/0000-0001-6368-6933), Scopus Author ID: [56152219600](https://orcid.org/0000-0001-6368-6933)

³кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: alyona_glushko@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8243-5707>

ResearcherID: [J-5495-2017](https://orcid.org/0000-0002-8243-5707), Scopus Author ID: [57200946561](https://orcid.org/0000-0002-8243-5707)

⁴кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри екології та технології рослинних полімерів
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: Irina.makarenko@chemicals.org.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7895-2664>

Scopus Author ID: [41761940300](https://orcid.org/0000-0002-7895-2664)

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЛУЧЕННЯ СУЛЬФАТІВ НА ЗВОРотноОСМОТИЧНІЙ МЕМБРАНІ НИЗЬКОГО ТИСКУ

Досліджено вплив вихідних концентрацій натрій сульфату в діапазоні 10–650 мг/дм³ та ступеня відбору перміату в межах 10-90 % на продуктивність зворотноосмотичної мембрани марки Filmtec TW30-1812-50 при застосуванні тиску 4 атм. Показано, що вміст сульфатів у перміаті зростає при підвищенні їх вихідної концентрації в розчині та збільшенні ступеня відбору перміату. Встановлено, що збільшення ступеню відбору перміату призводить до зниження продуктивності мембрани та підвищення концентрації солей у передмембранному просторі. Для визначення стабільності концентрацій порівнювали відповідність експериментальних та розрахункових значень солей у розчині.

Ключові слова: знесолення; зворотний осмос; низьконапірна мембрана; сульфати; перміат; концентрат.

Рис.: 6. Бібл.: 5.

Актуальність теми дослідження. Питання водопідготовки є надзвичайно актуальними й нагальними в реаліях сьогодення. Йдеться не лише про підготовку води питного призначення, а й про підготовку води промислового призначення. Підвищена мінералізація води є одним із аспектів, який потребує певної уваги при організації процесів водопідготовки. Південні та південно-східні регіони України мають значні проблеми з якісним водозабезпеченням. Навіть водопровідні води характеризуються значним рівнем солевмісту, зокрема і твердості води. Слід зазначити, що в умовах збройної агресії сусідньої держави відбувається забруднення поверхневих водойм і ґрунтових вод унаслідок бойових дій, ракетних обстрілів та, як наслідок, руйнування об'єктів критичної інфраструктури. Це, відповідно, зумовлює пошук методів та засобів, технологічних рішень для отримання зокрема якісної води питного призначення в сучасних реаліях. Локальні системи водопостачання набувають певного значення, проте існуючі технології, часто не забезпечують необхідного рівня демінералізації води. Проблема підвищеного солевмісту при централізованому водопостачанні ефективно вирішується широким впровадженням у побуті мембранних установок доочищення води. Ефективність використання таких установок в значній мірі обумовлена фізико-хімічними характеристиками води та обраним типом обладнання. Тому актуальним є визначення ефективності та доцільності використання в побуті локальних мембранних установок і визначення впливу характеристик водопровідної чи артезіанської води, яка потребує доочищення, на процес водопідготовки.

Постановка проблеми. Одним із показників якості води як питного, так і промислового призначення, є її мінералізація. Найвні технології підготовки води, що були спроектовані переважно наприкінці ХХ століття, не забезпечують регламентовані норми, оскільки спостерігається значне стає погіршення якості води в поверхневих водоймах. Використання артезіанських та ґрунтових вод певною мірою дозволяє вирішувати ці питання. Проте процеси демінералізації води залишаються актуальними й у цьому випадку. Методи та технологічні рішення зменшення карбонатної твердості води досить широко розглянуті в літературі. Проте важливим є питання зменшення некарбонатної жорсткості у процесі водопідготовки, зокрема вилучення сульфатів і хлоридів з води. З погляду промислового водопостачання вилучення сульфатів є актуальним питанням, оскільки підвищений вміст їх впливає на технологічні процеси та призводить до посилення корозії трубопроводів та обладнання. Високий вміст сульфатів у водопровідній воді впливає на її смакові якості та підвищує її електропровідність, що своєю чергою посилює процеси корозії трубопроводів і, відповідно, призводить до вторинного забруднення води [1]. Основними методами вилучення сульфатів є іонний обмін та баромембранні методи, зокрема зворотний осмос [2].

У цьому контексті важливою є оцінка ефективності використання в процесах доочищення води зворотньоосмотичних мембран низького тиску, вибір оптимального тиску та визначення впливу якості вихідної води на продуктивність та селективність мембран.

Представлені дослідження певним чином дають відповідь на зазначені питання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [3–5] представлені дослідження щодо визначення селективності і продуктивності зворотньоосмотичних мембран низького тиску в процесах демінералізації води з невисоким вмістом солей.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проте питання ефективності використання зворотньоосмотичних мембран при високих рівнях мінералізації води залишається відкритим.

Метою роботи є вивчення залежності ефективності зворотньоосмотичного вилучення сульфатів із води залежно від концентрації сульфатів та ступеня відбору перміату.

Виклад основного матеріалу.

Дослідження процесів зворотньоосмотичного очищення води від сульфатів.

Вилучення сульфатів з води проводили з використанням касети із зворотньоосмотичною низьконапірною мембраною марки Filmtec TW30-1812-50.

Робочими розчинами були розчини сульфату натрію (приготовані на дистильованій воді) з концентрацією по сульфат-аніонам: $C(\text{SO}_4^{2-}) = 10,0 \text{ мг/дм}^3$; $40,0 \text{ мг/дм}^3$; $70,0 \text{ мг/дм}^3$; $650,0 \text{ мг/дм}^3$.

Процес проводили на зворотньоосмотичній установці, принципова схема якої представлена на рис. 1.

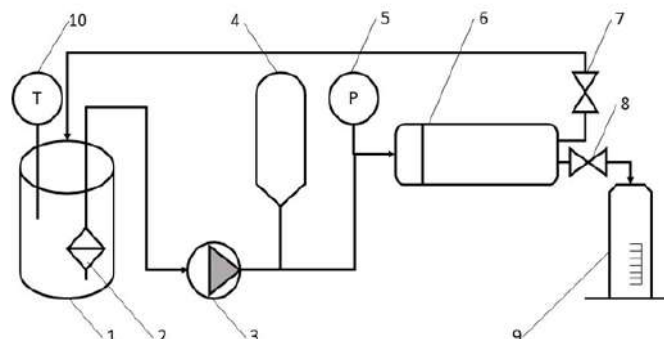


Рис. 1. Схема установки зворотньоосмотичного знесолення води:

1 – резервуар вихідного розчину; 2 – водозабірний пристрій; 3 – плунжерний насос – дозатор; 4 – гідроакумулятор; 5 – манометр; 6 – зворотньоосмотичний модуль із картриджем із мембраною Filmtec TW30-1812-50; 7, 8 – крани для регулювання, відповідно, витрати концентрату та перміату; 9 – приймач перміату; 10 – термометр

Тиск у системі підтримували на рівні 4 атм, регулюючи подачу води насосом та витрату концентрату краном. Об'єм проби перміату становив 1,0 дм³, вихідні об'єми розчинів – 10,0 дм³. Отриманий концентрат повертали у робочий розчин. У кожній пробі перміату та концентрату визначали концентрацію сульфатів. Проводили також теоретичний розрахунок даних показників для концентрату.

Вміст сульфатів визначали турбідиметрично [6] з іонами барію. Дослідження проводили на фотоколориметрі КФК-2-УХЛ42.

Розрахунок селективності мембрани (R , %) проводили за формулою:

$$R = \frac{C_0 - C_n}{C_0} 100, \% , \quad (1)$$

де R – селективність мембрани, %; C_0 та C_n – концентрація сульфатів у вихідному розчині та перміаті відповідно.

Концентрацію сульфатів у i -й пробі концентрату (C_{ki} , мг/дм³) визначали за формулою:

$$C_{ki} = \frac{V_0 \cdot C_0 - \sum_{i=1}^n (C_{ni} \cdot V_{ni})}{V_0 - \sum_{i=1}^n V_{ni}}, \frac{\text{мг}}{\text{дм}^3}, \quad (2)$$

де C_{ki} – концентрація сульфатів у концентраті після відбору i -ї проби перміату, мг/дм³; C_0 та V_0 – концентрація сульфатів у вихідному розчині (мг/дм³) та об'єм вихідного розчину (дм³), відповідно; V_{ni} – об'єм проби перміату, 1 дм³; C_{ni} – концентрація сульфатів в i -й пробі перміату, мг/дм³; i – число проб перміату, $n=1-9$.

Продуктивність мембрани (швидкості трансмембранного потоку) (j , дм³/(м²·год)) розраховували за формулою:

$$j = \frac{V_n}{S \cdot \Delta\tau}, \frac{\text{дм}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{год}}, \quad (3)$$

де j – продуктивність мембрани, дм³/(м²·год); V_n – об'єм проби перміату, 1 дм³; S – площа мембрани, м²; $\Delta\tau$ – час відбору проби, год.

Оцінка впливу вихідних концентрацій солей на селективність та продуктивність мембрани.

Відомо, що рушійною силою зворотного осмосу є різниця прикладеного (робочого) тиску води і різниці осмотичних тисків вихідної води і перміату. Продуктивність і селективність, що є основними характеристиками мембран, залежать не тільки від марки мембрани, але й від параметрів процесу розподілу – зокрема тиску, температури та початкового вмісту солей у воді.

Збільшення робочого тиску призводить до росту питомої продуктивності мембрани. Водночас зростає й селективність, оскільки дифузійне перенесення іонів від тиску не залежить, а через мембрану проходить більше розчинника. У випадку збільшення концентрації солей у вихідній воді спостерігається зростання осмотичного тиску вихідного розчину і значно меншою мірою – осмотичного тиску перміату, що призводить до зменшення питомої продуктивності мембрани.

Також знижується селективність мембрани через зростання дифузійного потоку пропорційно вихідній концентрації. Підвищення конверсії призводить до збільшення середньої концентрації розчинених речовин, підсилює виразність концентраційної поляризації, через що особливо підвищується концентрація солей над поверхнею мембрани. Усе це призводить до падіння як селективності, так і питомої продуктивності.

Збільшення конверсії можливо лише до певної межі, поки значення осмотичного тиску концентрату через збільшення його солевмісту не наблизиться до тиску живильної

води. Тоді процес перенесення розчинника припиняється. Крім того, можливе досягнення концентрацій малорозчинних солей межі розчинення, що призведе до масового забруднення мембран відкладеннями.

Збільшення ступеню відбору перміату при підвищеному солевмісті призводить до зростання осмотичного тиску у воді, що значно впливає на параметри процесу очищення води.

Вибір сульфату натрію як модельний розчин продиктовано тим, що найчастіше підвищення солевмісту пов'язують саме з наявністю сульфатів.

При проведенні досліджень визначали ступінь знесолення води за залишковими концентраціями сульфатів у перміаті, визначали селективність мембрани при збільшенні ступеня відбору перміату.

Як свідчать результати досліджень, що представлені на рис. 2 і 3, вилучення сульфатів із води на мембрані Filmtec TW30-1812-50 є достатньо ефективним.

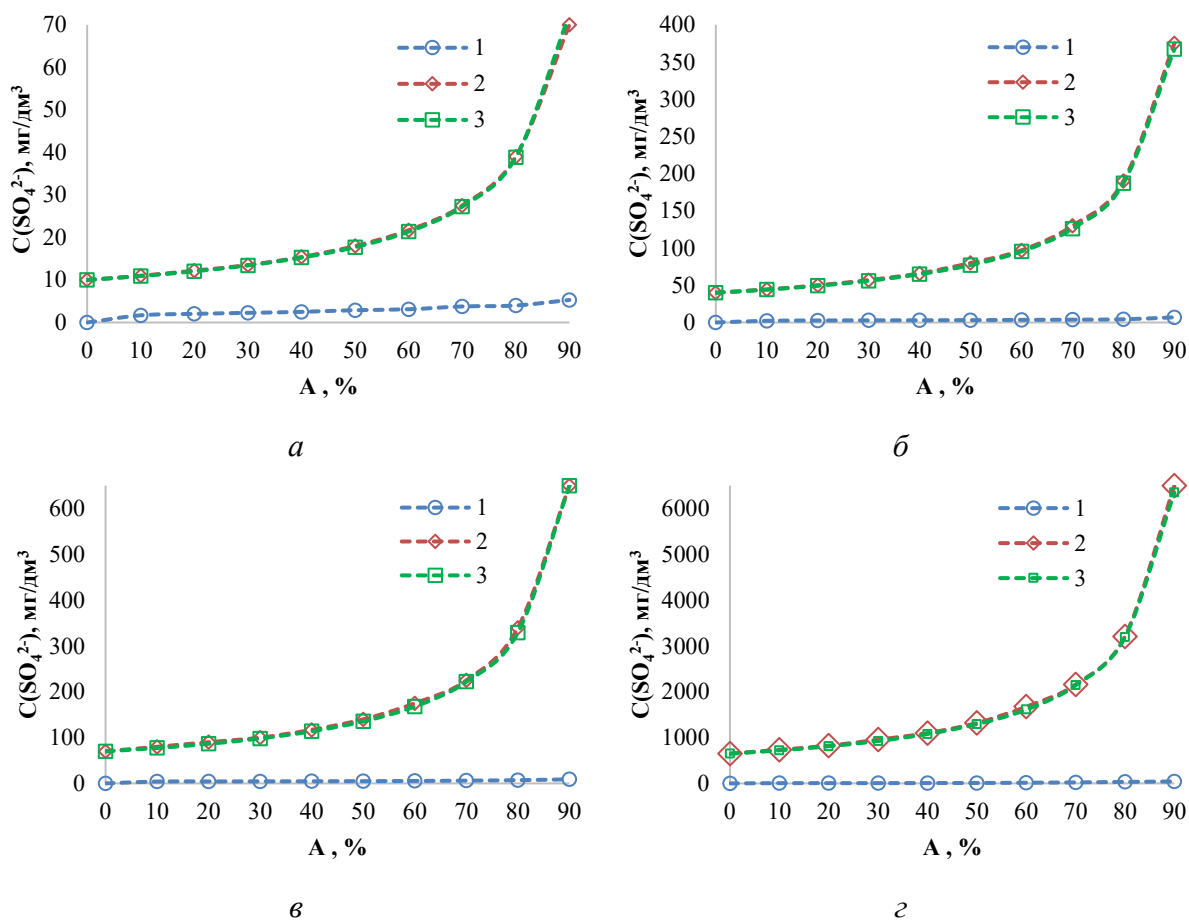


Рис. 2. Залежність концентрації сульфатів у перміаті (1), концентраті (2; 3) (реальна (2) і розрахована (3)) від ступеню відбору перміату (A , %) при робочому тиску 4,0 атм. при фільтруванні розчину Na_2SO_4 з різною початковою концентрацією:

$a - C_{\text{вих}}(\text{Na}_2\text{SO}_4) = 10,0 \text{ mg}/\text{dm}^3$; $б - C_{\text{вих}}(\text{Na}_2\text{SO}_4) = 40,0 \text{ mg}/\text{dm}^3$;

$в - C_{\text{вих}}(\text{Na}_2\text{SO}_4) = 70,0 \text{ mg}/\text{dm}^3$; $г - C_{\text{вих}}(\text{Na}_2\text{SO}_4) = 650,0 \text{ mg}/\text{dm}^3$

Моделювання процесу на основі ПФЕ дозволяє визначити концентрації сульфатів у перміаті та концентраті при будь-яких вихідних концентраціях сульфатів у визначеному діапазоні даних (рис. 3, рис. 4).

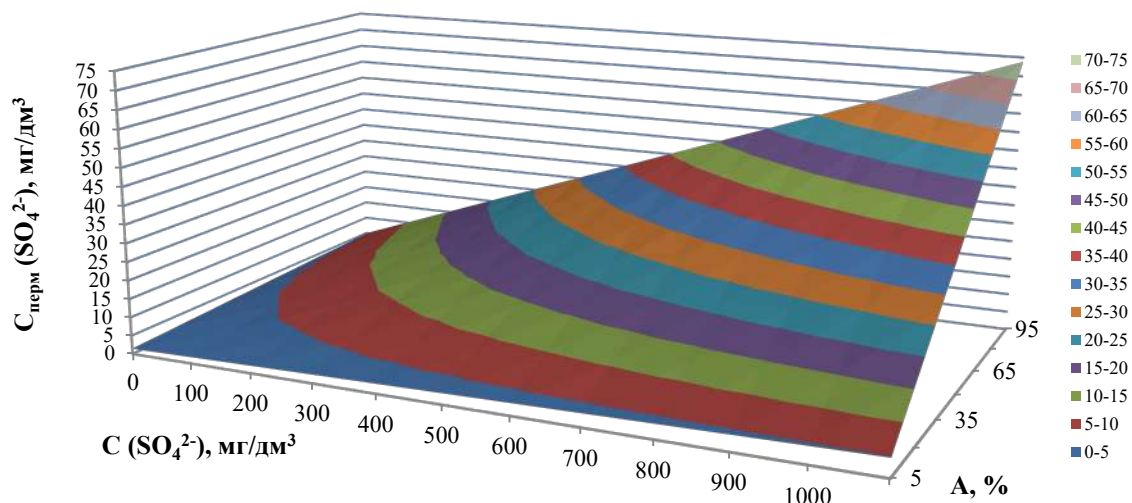


Рис. 3. Залежність концентрації сульфатів у перміаті від вихідної концентрації Na_2SO_4 та ступеня відбору перміату при робочому тиску 4,0 атм.

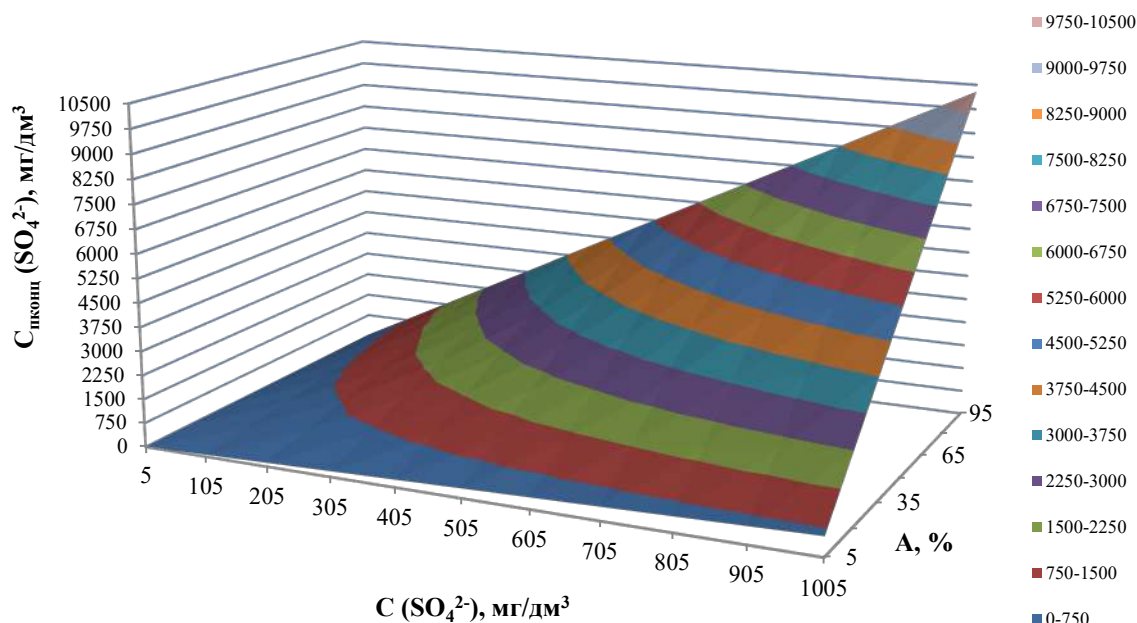


Рис. 4. Залежність концентрації сульфатів у концентраті від вихідної концентрації Na_2SO_4 та ступеня відбору перміату при робочому тиску 4,0 атм.

Селективність мембрани по сульфатах становить 94,9–99,3 %. Слід відмітити, що більші значення селективності відповідають більш високим вихідним концентраціям розчинів. Кардинальна зміна селективності мембрани по сульфат-аніонам при збільшенні ступеню відбору перміату відзначена для малих (до 40,0 мг/дм³) початкових концентрацій сульфатів у розчині.

Представлені дані на рис. 5, свідчать про те, що вилучення сульфатів із води на мембрані Filmtec TW30-1812-50 відбувається досить ефективно – селективність мембрани перевищувала 80 %, а із зростанням концентрацій у вихідних розчинах вона збільшувалась до 95–99 %. При цьому підвищення ступеню відбору перміату призводило до зростання селективності для розчинів з низькими вихідними концентраціями сульфатів.

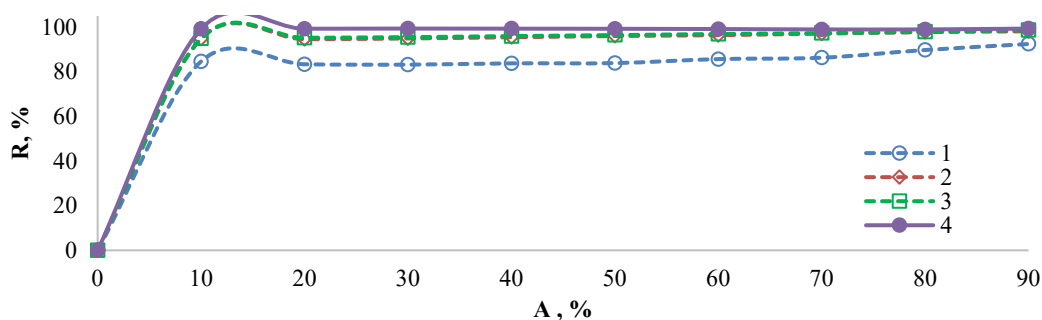


Рис. 5. Залежність селективності при робочому тиску 4,0 атм. від ступеню відбору перміату при фільтруванні через зворотноосмотичну мембрану низького тиску Filmtec TW30-1812-50 розчинів Na_2SO_4 при вихідних концентраціях розчинів по сульфатах (мг/дм^3): 10,0 (1), 40,0 (2), 70,0 (3), 650,0 (4)

Слід зазначити, що концентрація сульфатів у перміаті не лише не знижувалась, а до певної міри зростала. При вихідній концентрації сульфатів 650 мг/дм^3 зі збільшенням ступеню відбору перміату з 10 % до 90 % концентрація сульфатів у перміаті зростала із $5,8 \text{ мг/дм}^3$ до $43,1 \text{ мг/дм}^3$ при зниженні селективності з 99,34 до 98,90 %. Це при тому, що в концентраті вміст сульфатів зріс приблизно до 6500 мг/дм^3 .

Особливістю мембранного знесолення води при використанні зворотноосмотичних мембран є те, що при селективності 80–99 % при збільшенні ступеню відбору перміату до 80–90 % істотно зростає вміст солей у концентратах. Це призводить до збільшення осмотичного тиску розчинів та зниження робочого тиску (рис. 6).

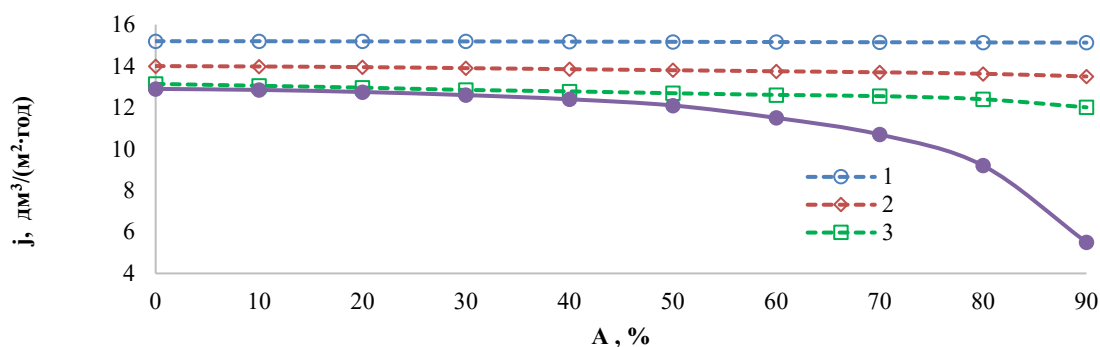


Рис. 6. Залежність продуктивності при робочому тиску 4,0 атм. від ступеню відбору перміату при фільтруванні через зворотноосмотичну мембрану низького тиску Filmtec TW30-1812-50 розчинів Na_2SO_4 при вихідних концентраціях розчинів по сульфатах (мг/дм^3): 10,0 (1), 40,0 (2), 70,0 (3), 650,0 (4)

Контроль за стабільністю розчинів концентратів проводили порівнянням вмісту солей, експериментально визначеним у кожній відібраній пробі перміату, та розрахованим теоретично. Невідповідність експериментальних та розрахованих значень свідчить про проходження процесів утворення осадів у концентратах. Крім того, виходячи з рівня мінералізації концентрату, можна визначити його осмотичний та робочий тиск при заданому тиску в системі. Слід зазначити, що зазвичай у роботах зі зворотноосмотичному очищенню води такий підхід не використовують.

Як видно з рис. 1, розчини концентратів є стабільними в усьому діапазоні використаних концентрацій при підвищенні ступеню відбору перміату від 10 до 90 %, оскільки в усіх розчинах вміст сульфатів, визначений експериментально та розрахований теоретично, дуже близький.

Отже, на основі результатів досліджень запропоновано спосіб визначення продуктивності установки, виходячи із концентрації солі.

Подальші дослідження будуть направлені на визначення коефіцієнтів фільтрування та дослідження впливу наявних у воді катіонів та аніонів на процес зворотн осмотичного знесолення води. Це дозволить визначити продуктивність мембрани та робочі тиски в системі для отримання води задовільної якості та уточнити певні аспекти технології мембранного очищення води.

Висновки. Досліджено вплив вихідних концентрацій сульфату натрію та ступеню відбору перміату на селективність та продуктивність зворотньоосмотичної низьконапірної мембрани марки Filmtec TW30-1812-50. Визначено, що при підвищенні початкових концентрацій і ступеню відбору перміату селективність мембрани по сульфат-аніонам зростає, а продуктивності мембрани падає. Показано, що в процесі фільтрування концентрації сульфатів постійно зростають у концентратах і в меншій мірі зростають у перміаті при вихідних концентраціях нижчих 650 мг/дм^3 . Підвищення концентрації сульфатів у воді вище 650 мг/дм^3 призводить до збільшення їх концентрації у перміаті до $5,8\text{-}43,1 \text{ мг/дм}^3$. Збільшення солевмісту вихідної води призводить до зростання осмотичного тиску вихідного розчину і в значно меншій мірі – осмотичного тиску перміату, що в свою чергу обумовлює зниження питомої продуктивності мембрани.

Список використаних джерел

1. Purification of Mine Waters Using Lime and Aluminum Hydroxochloride / I. Trus, M. Gomelya, M. Tverdokhlib, V. Halysh, I. Radovenchyk, D. Benatov // *Ecol. Eng. Environ. Technol.* – 2022. – № 5. – Pp. 169-176.
2. Innovative Approach in Creation of Integrated Technology of Desalination of Mineralized Water / I. Trus, I. Radovenchyk, V. Halysh, M. Skiba, I. Vasylenko, V. Vorobyova, O. Hlushko, L. Sirenko // *Journal of Ecological Engineering.* – 2019. – № 20 (8). – Pp. 107-113.
3. Кравченко, М. Дослідження основних властивостей зворотньоосмотичних мембран та їх вплив на зміну фізико-хімічного складу водних розчинів / М. Кравченко, Л. Василенко // *Екологічна безпека та природокористування.* – 2022. – № 43(3). – Pp. 43-55.
4. Kravchenko M. V. Application of reverse osmosis method for post-treatment of drinking water / M. V. Kravchenko, L. O. Vasylenko, O. S. Voloshkina // *Ecological safety and nature management : collection of scientific works.* – 2021. – № 4(40). – Pp. 32-45.
5. Brick, M. T. Drinking water and membrane technologies (review) / M. T. Brick, R. R. Nihatullin, A. L. Alpatova // *Scientific notes of NaUKMA. Special issue.* – 1999. – № 9. – Pp. 409-411.
6. Аналіз об'єктів навколишнього середовища : навч. метод. посіб. для студ. ВНЗ / уклад. В. О. Мінаєва, Т. С. Нінова. – Черкаси : Вид. від. Чабаненко Ю. А., 2020. – 266 с.

References

1. Trus, I., Gomelya, M., Tverdokhlib, M., Halysh, V., Radovenchyk, I., & Benatov, D. (2022). Purification of Mine Waters Using Lime and Aluminum Hydroxochloride. *Ecol. Eng. Environ. Technol.*, 5, 169–176.
2. Trus, I., Radovenchyk, I., Halysh, V., Skiba, M., Vasylenko, I., Vorobyova, V., Hlushko, O., & Sirenko, L. (2019). Innovative Approach in Creation of Integrated Technology of Desalination of Mineralized Water. *Journal of Ecological Engineering*, 20(8), 107–113.
3. Kravchenko, M., & Vasylenko, L. (2022). Doslidzhennia osnovnykh vlastyvostei zvorotnoosmotychnykh membran ta yikh vplyv na zminu fizyko-khimichnoho skladu vodnykh rozchyniv [Research of the main properties of reverse osmosis membranes and their influence on changes in the physical and chemical composition of aqueous solutions]. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia – Ecological safety and nature management*, 43(3), 43–55.
4. Kravchenko, M.V., Vasylenko, L.O., & Voloshkina, O.S. (2021). Application of reverse osmosis method for post-treatment of drinking water. *Ecological safety and nature management: collection of scientific works*, 4(40), 32-45
5. Brick, M.T., Nihatullin, R.R., & Alpatova, A.L. (1999). Drinking water and membrane technologies (review). *Scientific notes of NaUKMA. Special issue*, 9, 409-411.
6. Minaieva, V.O., Ninova, T.S. (2020). *Analiz ob'ektiv navkolyshnoho seredovyshcha [Analysis of environmental objects]*. Vyd. vid. Chabanenko Yu. A.

Отримано 21.06.23

Mukola Gomelya¹, Inna Trus², Olena Hlushko³, Iryna Makarenko⁴

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of ecology and technology of plant polymers
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: m.gomelya@kpi.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-1165-7545>

ResearcherID: [J-4345-2017](https://orcid.org/0000-0003-1165-7545). **Scopus Author ID:** [6507653734](https://orcid.org/0000-0003-1165-7545)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of ecology and technology of plant polymers
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: inna.trus.m@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-6368-6933>

ResearcherID: [I-3204-2017](https://orcid.org/0000-0001-6368-6933). **Scopus Author ID:** [56152219600](https://orcid.org/0000-0001-6368-6933)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of ecology and technology of plant polymers
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: alyona_glushko@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8243-5707>

ResearcherID: [J-5495-2017](https://orcid.org/0000-0002-8243-5707). **Scopus Author ID:** [57200946561](https://orcid.org/0000-0002-8243-5707)

⁴PhD in Technical Sciences, Senior Research of Department of ecology and technology of plant polymers
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: irina.makarenko@chemicals.org.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7895-2664>

Scopus Author ID: [41761940300](https://orcid.org/0000-0002-7895-2664)

**DETERMINATION OF THE EFFICIENCY OF SULFATE REMOVAL
ON A LOW-PRESSURE REVERSE OSMOSIS MEMBRANE**

The dependence of the efficiency of the low-pressure reverse osmosis membrane Filmtec TW30-1812-50 on the initial concentrations of sodium sulfate in the range of 10-650 mg/dm³ at permeate recovery rates of 1-90 % using a pressure of 4 atm was determined. The effect of increasing the permeate recovery rate on selectivity, membrane performance, and the increase in the sulfate content of concentrates was determined. It is shown that the concentration of sulfates in permeate depends on their initial concentration in solutions and increases both with an increase in the initial concentration and with an increase in the degree of permeate extraction. The latter factor is quite significant at initial sulfate concentrations of 650 mg/dm³. The membrane performance increases with decreasing salt content in water and decreases with increasing permeate removal rate, which leads to an increase in salt concentration in the pre-membrane space. The selectivity of the membrane for sulfates is 94.9-99.3 % and increases with increasing concentration of sodium sulfate solutions in solutions, despite a certain increase in salt concentrations in permeates. It is shown that as the degree of permeate selection increases, the selectivity for solutions with low initial sulfate concentrations increases. A FFP-based process modeling was performed to determine the sulfate concentration in the permeate and concentrate at any initial sulfate concentration in a certain range. It was found that the concentrate solutions are stable in the entire range of concentrations used with an increase in the degree of permeate recovery from 10 to 90 %. Based on the research results, a method for determining the capacity of the plant and the osmotic and operating pressures based on the salt concentration and the set pressure in the system was proposed. From the data obtained, it can be concluded that the permissible level of mineralization at which the use of low-pressure reverse osmosis membranes is advisable.

Keywords: reverse osmosis; low pressure membranes; sulfates; permeate; concentrate.

Fig.: 6. References: 5.

Сергій Зайцев¹, Володимир Кравченко², Валентин Тіхенко³

¹кандидат технічних наук, інженер кафедри атомних електростанцій
Національний університет «Одеська політехніка» (Одеса, Україна)

E-mail: sdjavdet@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1166-3243>

²доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри атомних електростанцій
Національний університет «Одеська політехніка» (Одеса, Україна)

E-mail: kravchenko@op.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7557-3327>

³доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри цифрових технологій в інжинірингу
Національний університет «Одеська політехніка» (Одеса, Україна)

E-mail: vntikhenko@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2804-2838>

**МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ПРИСАДОК В ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОЛИВАХ
ОБЛАДНАННЯ ЕНЕРГОПІДПРИЄМСТВ**

Стаття є оглядовою та присвячена аналізу наявних сучасних, а також перспективних методів визначення вмісту присадок у мінеральних енергетичних оливах, у тому числі в трансформаторних та турбінних, що знаходяться в експлуатації в обладнанні енергетичних підприємств. Це дозволить виділити найбільш оптимальні сучасні методи виконання вимірювань і визначити їхні переваги та недоліки при застосуванні у вимірювальних лабораторіях. Визначено напрям подальших досліджень для виявлення оптимальних методів ідентифікації та визначення вмісту в мінеральних трансформаторних або турбінних оливах нових присадок, кількісно-якісний склад яких часто не розкривають їхні виробники. Це дозволить виконувати технічне діагностування оливонаповненого обладнання із застосуванням відповідних діагностичних моделей.

Ключові слова: енергетичне підприємство; оливонаповнене обладнання; фізико-хімічні методи аналізу; присадки, трансформаторні і турбінні оливи.

Табл.: 1. Рис.: 8. Бібл.: 26.

Актуальність теми дослідження. Україна має розвинену енергетичну галузь, основу якої складають електричні станції та мережі. На сьогодні атомна енергетика України є найбільш стабільним, надійним і прогнозованим виробником електроенергії. Надійність та техніко-економічна ефективність експлуатації енергоблоків атомних електростанцій (АЕС) зумовлює безперервність і стабільність забезпечення електроенергією споживачів, як промислових, так і побутових [1]. Надійність та ефективність експлуатації енергоблоків АЕС загалом визначається показниками надійності кожного елемента технологічного ланцюга перетворення енергії «ядерний реактор – парогенератор – парова турбіна – турбогенератор – блоковий електричний трансформатор». Вихід із ладу будь-якої одиниці такого обладнання для ядерного реактора є раптовою втратою навантаження, що вимагає його негайного розвантаження до нижнього критичного рівня [1]. В обладнанні такого технологічного ланцюга перетворення енергії «парогенератор – турбіна – турбогенератор – блоковий трансформатор» застосовано у якості технологічних середовищ відповідні мінеральні або синтетичні трансформаторні (МТрО) або турбінні (МТуО) оливи [1; 2], які вміщують в собі різні присадки, такі як: інгібітор окиснення [3]; інгібітор корозії; деемульгуюча присадка; деактивууюча присадка; протизношувальна присадка; протипінна присадка; комбіновані присадки [4]. При експлуатації теплоелектростанцій, гідроелектростанцій, гідроакумуючих електростанцій та електричних мереж також застосовують оливонаповнене обладнання, в якому МТрО та МТуО вміщують в собі різні присадки [4]. Контроль вмісту цих присадок в процесі експлуатації МТрО та МТуО в оливонаповненому обладнанні є важливим та необхідним завданням [2, 4]. На даний час процес удосконалення експлуатаційних властивостей МТрО та МТуО, в тому числі за рахунок застосування нових більш ефективних присадок, є постійним та необхідним. Це потребує виконання контролю вмісту присадок у процесі експлуатації МТрО та МТуО (або синтетичних трансформаторних олив, отриманих за методом багатоступінчатого каталітичного процесу перетворення вуглеводневого газу, наприклад природного, в рідкі вуглеводні (наприклад, трансформаторна олива марки «Shell Diala S4 ZX-1»

[5]) в обладнанні енергопідприємств, та визначення швидкості змінення концентрацій присадок в мінеральних енергетичних оливах (МЕО), що дає інформацію про небезпечність процесів деградації цих оливах та дозволяє виконати діагностування технічного стану оливонаповненого обладнання [6].

Постановка проблеми. МТрО та МТуО и у відповідному оливонаповненому обладнанні енергопідприємств забезпечують надійну експлуатацію цього обладнання і виконують функції електроізоляційного, дугогасного, охолоджуючого, змащуючого та інформаційного середовища. Для надійної експлуатації МТрО та МТуО, ці оливи повинні мати в своєму складі необхідну кількість різних функціональних присадок. Одним із способів контролю стану МТрО та МТуО є дослідження вмісту функціональних присадок в цих оливах. Оскільки концентрації присадок в МЕО у процесі експлуатації безперервно змінюються, то є необхідність у визначенні вмісту цих присадок як у процесі експлуатації МЕО, так і у процесах їх регенерації та додання необхідної кількості присадок. Водночас, безперервно змінюються та розробляються нові присадки до МЕО. У багатьох випадках розробники нових присадок та МТрО і МТуО не завжди розкривають кількісно-якісний склад таких присадок та нових МТрО і МТуО, посилаючись комерційною таємницею. Крім цього, деякі МТрО та МТуО вже не виготовляють, але ще застосовують у великій кількості в оливонаповненому обладнанні енергопідприємств України. При цьому є необхідність у введенні в такі оливи присадок, які за своїми функціями можуть бути подібними до тих присадок, що застосовувались раніше. Таким чином, є необхідність в постійному удосконаленні методів ідентифікації та визначення вмісту присадок в МТрО та МТуО в обладнанні енергопідприємств.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час для визначення вмісту антиокислювальної присадки «Іонол» в МЕО широко застосовують методи ІЧ-спектрометрії [5; 7] та газової хроматографії (ГХ) [8; 9].

Застосування методів ГХ для визначення вмісту присадки «Іонол» в МЕО виконують із урахуванням значень показника «кислотне число (КЧ)» [5]. При цьому використання методу добавки твердої присадки «Іонол» в МЕО не дозволяє візуально встановити факт досягнення повного розчинення твердої присадки «Іонол» в сильно забарвленому МЕО, а також аналізувати МЕО при значенні «КЧ», що дорівнює або більше 0,1 мг КОН на 1 г МЕО, так як продукти окислення в МЕО вступають у хімічну взаємодію з присадкою «Іонол», що додається до МЕО [10], і це знижує точність результату ГХ вимірювання. Відома залежність коефіцієнтів розподілу K_i для присадки «Іонол» в системі «МЕО – розчинена присадка «Іонол» – рідкий екстрагент» від абсолютної температури T [11; 12]. У зв'язку з цим експериментальне визначення значень коефіцієнтів розподілу K_i для присадки «Іонол» у широкому діапазоні температур його екстракції з МЕО рідкими екстрагентами, а також розробка відповідної методики ГХ визначення K_i , мають практичне значення [11; 12]. Часто при одночасному визначенні вмісту присадок «Іонол» та В15/41 в МЕО застосовують методи ІЧ-спектрометрії [13], рідинної хроматографії (ВЕРХ) [10], газової хромато-мас-спектрометрії (ГХ-МС) [7; 14]. Відомі роботи, в яких виявлення присадок в МТуО здійснювалося за допомогою методів ВЕРХ, ГХ [16], ГХ-МС [15-17], ІЧ-спектрометрії [18], ІЧ-Фур'є-спектрометрії [19; 20].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри наявності великої кількості досліджень методів визначення вмісту присадок в МТрО та МТуО в енергетичному обладнанні, недостатня увага приділена темі вибору конкретних методик визначення вмісту присадок в таких оливах в залежності від: стану та значень фізико-хімічних показників якості цих оливах; вже існуючого в хімічних лабораторіях вимірювального обладнання для їх використання при визначенні нових марок присадок в МТрО та МТуО.

Мета статті. Головною метою статті є аналіз методів визначення вмісту присадок в мінеральних енергетичних оливах, у тому числі в трансформаторних і турбінних оливах, в процесах їх експлуатації в обладнанні енергопідприємств, що дозволить виділити найбільш оптимальні методи виконання вимірювань і визначити їхні переваги та недоліки при застосуванні у вимірювальних лабораторіях.

Завдання дослідження: 1. Виконати аналітичний аналіз літературних джерел, що присвячені методам визначення вмісту присадок в МЕО, у тому числі в МТрО та МТуО, в процесах їх експлуатації в оливонаповненому обладнанні енергопідприємств. 2. Надати рекомендації щодо застосування методів ідентифікації та визначення вмісту присадок в МТрО та МТуО в процесах їх експлуатації в оливонаповненому обладнанні енергопідприємств України.

Виклад основного матеріалу. У роботі застосовано методи аналітичного аналізу літературних джерел, що присвячені методам визначення вмісту присадок у МЕО, у тому числі в МТрО та МТуО в процесах їх експлуатації в оливонаповненому обладнанні енергопідприємств.

У роботі [3] наведено кінетичний метод (КМ) визначення тривалості індукційного періоду окиснення МТрО (що містить присадку «Іонол») в потоці газоподібного O_2 . По закінченні індукційного періоду буде витрачено всю присадку «Іонол» в об'ємі МТрО. В цій роботі не наведено методики розрахунку концентрацій присадки «Іонол» в МТрО у процесі її окиснення [3].

В Україні визначення вмісту присадок в МТуО виконують за рішенням технічного керівництва енергопідприємства або при регенерації МТуО, або при невідповідності показника «стабільність проти окиснення», або при невідповідності показника «час деемульсації» та/або невідповідності показника «корозія на сталевих стрижнях» [4]. Ці визначення можуть бути виконані за методами ІЧ-спектрометрії, ВЕРХ або ТШХ при визначенні вмісту таких присадок як: інгібітор окиснення («Іонол»); або «ДФ-11»; або «Антранілова кислота»), інгібітор корозії («Бетол-1»; «В15/41»; «IrgacorL12»), деемульгуюча присадка («D-157»), деактивуюча присадка («Бетол-1»; «Irgamet-30»; «Irgamet-39»), протизношувальна присадка («ДФ-11»). В роботі [4] наведено методики виконання вимірювань за методами: ВЕРХ (кількісний аналіз) – для визначення присадок: «Іонол»; «Антранілова кислота»; «В15/41» або «IrgacorL12», або «D-157», або «Бетол-1», або «Irgamet-39»; та ТШХ (кількісний або якісний аналіз) – для визначення присадки «Іонол». Визначення вмісту протитипних присадок (наприклад «ПМС-200А» при концентрації до 0,003 % мас.) не передбачено: цю присадку додають до МТуО тільки за вимогами споживача цієї оливи. В цій роботі наведено методику обробки результатів досліджень при визначенні вмісту присадок в МЕО, методики розрахунку метрологічних характеристик та розрахункову формулу для визначення вмісту присадок C_i в цих оливах за методом ВЕРХ:

$$C_i = (W_i \cdot t_i) \cdot P^{-1}, \quad (1)$$

де C_i – концентрація присадки «Іонол» в МТрОі, моль/кг; $W_i = 6,8 \cdot 10^{-8}$ моль/(л·с) – швидкість ініціювання; t_i – період індукції для присадки «Іонол», с; P – навішування МТрО, кг/л.

У роботі [4]: наведено методику визначення вмісту присадки «Іонол» в МТрО за методом ВЕРХ, але типову хроматограму не наведено; діапазон вимірювань від 10 до 200 мг/кг, показник точності $\pm \delta = 7\%$ при $P = 0,95$, показник повторюваності $\sigma_r = 2\%$, показник відтворюваності $\sigma_R = 3\%$, межа повторюваності $r = 5,5\%$ за $P = 0,95$ і $n = 2$; показано, що якщо масова частка присадки «Іонол» у пробі перевищує 200 мг/кг, то пробу МЕО розбавляють, але не більше ніж у 50 разів; не наведено типові хроматограми при визначенні в МЕО присадок «Бетол-1», «В15/41», «IrgacorL12», «D-157», «ДФ-11», «Антранілова кислота».

У роботі [4] наведено також методику визначення вмісту присадки «Іонол» в мінеральних оливах за методом тонкошарової хроматографії (ТШХ). На рисунку 1 показана типова хроматограма, що отримана під час визначення вмісту присадки «Іонол» в МЕО за методом ТШХ.

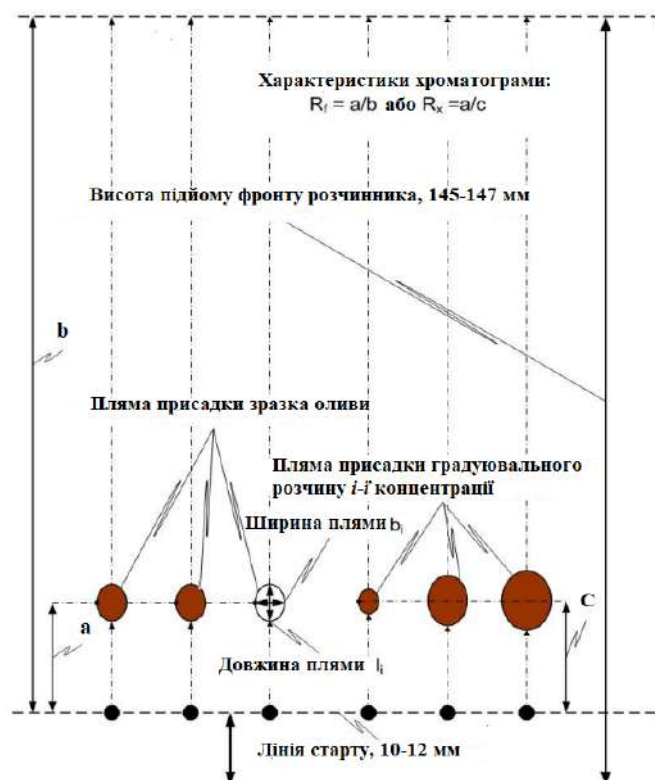


Рис. 1. Типова хроматограма, що отримана під час визначення вмісту присадки «Іонол» в МЕО за методом ТШХ

Основні метрологічні характеристики цього методу ТШХ: діапазон вимірювань від 0,08 до 0,8 % масової частки, показник точності $\pm \delta = 0,05$ % при $P = 0,95$, показник повторюваності $\sigma_r = 0,02$, показник відтворюваності $\sigma_R = 0,03$ %, межа повторюваності $r = 0,055$ % за $P = 0,95$ і $n = 2$. Розрахункова формула для визначення вмісту C_x присадки «Іонол» в МЕО:

$$C_x = C_l + K \cdot (S_x - S_l), \quad (2)$$

де C_x – концентрація присадки «Іонол» в МТрО, % мас.; C_l – масова доля присадки «Іонол» у градуувальному розчині в МТрО, % мас.; K – градуувальна характеристика; S_x – площа плями для присадки «Іонол», що відповідає концентрації присадки «Іонол» в аналізованій МТрО; S_l – площа плями для присадки «Іонол», що відповідає концентрації присадки «Іонол» в градуувальній МТрО.

У роботі [5] наведено методики визначення вмісту присадки «Іонол» в МТрО за методами ГХ та ТШХ. Вимірювання вмісту присадки «Іонол» в МТрО виконують за методом ГХ у діапазоні концентрацій цієї присадки від 0,05 до 0,8 % мас. Розрахункова формула:

$$C_x = 100 \cdot K \cdot S \cdot (V)^{-1}, \quad (3)$$

де C_x – концентрація присадки «Іонол» в МТрО, % мас.; S – площа хроматографічного піку для присадки «Іонол»; K – градуувальний коефіцієнт; V – об'єм введеного екстракту у випарник газового хроматографу.

У роботі [5] не наведено: типові хроматограми; методики обробки результатів досліджень при визначенні вмісту присадок в МЕО; методики розрахунку метрологічних характеристик; розрахункову формулу для визначення вмісту присадки «Іонол» в МТрО за методом ТШХ.

У роботі [21] розроблено метод спектрального визначення вмісту присадки «Іонол» в МТрО за спектрами пропускання при довжині хвилі $\lambda = 959$ нм, відповідній групі ОН молекули присадки «Іонол» з використанням градуувального графіка в діапазоні концентрацій присадки «Іонол» від 3 до 16 % мас. Концентрація C_i , % мас., присадки «Іонол» може бути визначена по спектрам пропускання за формулою:

$$C_i = 0,6838 \cdot dT, \quad (4)$$

де dT – різниця спектрів пропускання МТрО з різною концентрацією присадки «Іонол» (T_i) та базової МТрО (T_0) з відомою в ньому концентрацією присадки «Іонол», наприклад, 0,2 % мас., на довжині хвилі $\lambda = 959$ нм.

На рисунку 2 показано різницю спектрів пропускання (dT) для МТрО з різною концентрацією присадки «Іонол» (T_i) та базової МТрО (T_0) при довжині хвилі $\lambda = 959$ нм..

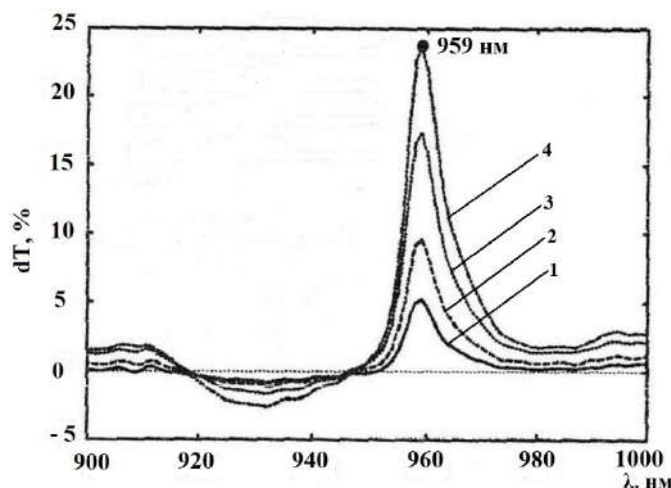


Рис. 2. Різниця спектрів пропускання (dT) для МТрО з різною концентрацією присадки «Іонол» (T_i) та базової МТрО (T_0) при довжині хвилі $\lambda = 959$ нм та концентраціях присадки «Іонол»: 1 – 3,5 % мас.; 2 – 6,2 % мас.; 3 – 11,6 % мас.; 4 – 16,4 % мас.

У роботі [21] не наведено методики обробки результатів досліджень при визначенні вмісту присадки «Іонол» в МЕО та розрахунку метрологічних характеристик.

У роботі [9] викладено метод ГХ визначення вмісту присадки «Іонол» в МТрО при концентраціях до 0,5 % мас. із використанням газового хроматографа з насадковим випарником та ПД або з детектором теплопровідності. Метод полягає в екстракції присадки «Іонол» із МТрО рідким метанолом з подальшим аналізом отриманого екстракту за методом ГХ. При виконанні вимірювань здійснюють програмування температури хроматографічної колонки від вихідної температури 150 0С до кінцевої температури 250 0С зі швидкістю до 20 0С/хв. Для виконання розрахунків концентрації присадки «Іонол» у досліджуваній МТрО використовують результати, отримані після виконання ГХ аналізу градуювального розчину присадки «Іонол» у градуювальній МТрО. Розрахункова формула аналогічна наведеній раніше (3).

У роботах [8; 22] запропоновано при визначенні концентрації C_i присадки «Іонол» в пробі МЕО застосовувати метод додатку присадки «Іонол», який полягає в тому, що в об'єм V_2 порівняльної проби аналізованої МЕО додають відому кількість присадки «Іонол», що міститься в рідкому екстрагенті об'єму V_1 , а в об'єм V_2 робочої проби аналізованої МЕО додають рідкий екстрагент об'ємом V_1 , що не містить присадки «Іонол». Концентрацію C_i присадки «Іонол» в пробі МЕО обчислюють за формулою:

$$C_i = \frac{C_3 \cdot V_1 \cdot C_1}{V_2 \cdot (C_2 - C_1)}, \quad (5)$$

де C_i – концентрація присадки «Іонол» у пробі аналізованої МЕО; C_1 – концентрація присадки «Іонол» у рідкому екстракті після виконання рідинної екстракції; C_3 – концентрація присадки «Іонол» у рідкому екстрагенті, що додається до аналізованої МЕО; C_2 – концентрація присадки «Іонол» у рідкому екстракті після виконання рідинної екстракції з проби аналізованої МЕО з додатком до неї присадки «Іонол» у вигляді його розчину в екстрагенті.

На рисунку 3 показана типова хроматограма результату ГХ визначення вмісту присадки «Іонол» в МТрО.

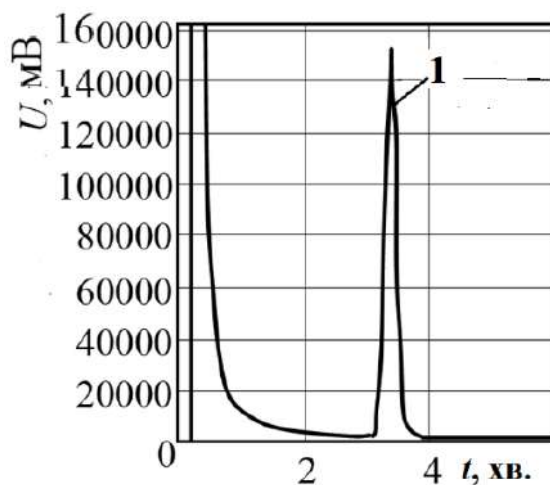


Рис. 3. Типова хроматограма результату ГХ визначення вмісту присадки «Іонол» МТрО:

1 – присадка «Іонол»; U – відгук детектору, мВ; t – час, хвилин

У роботі [23] розроблено методику екстраційно-хроматографічного визначення присадки «Іонол» в МТрО з використанням методу ВЕРХ. Як екстракційну систему використані ізопропіловий спирт, водний розчин аміаку і висолювач – сульфат амонію. Методика дозволяє контролювати вміст присадки «Іонол» в МТрО в інтервалі 1000–5000 мг/кг. Визначено умови виконання процедур ВЕРХ із УФ-детектором рідинного хроматографа. Вимірювання виконані у три-хвильовому режимі роботи рідинного хроматографа. На рисунку 4 показана хроматограма екстракту присадки «Іонол» з МТрО марки АМТ-300, зареєстрована в трьох-хвильовому режимі при довжинах хвиль: $\lambda = 254$ нм, $\lambda = 274$ нм, $\lambda = 290$ нм.

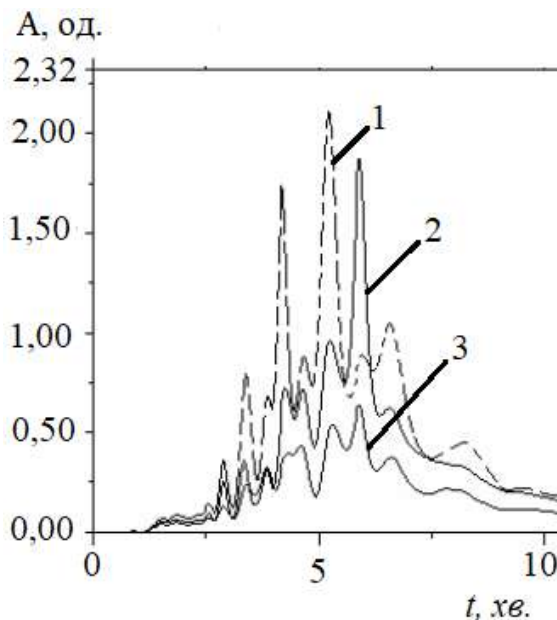


Рис. 4. Хроматограма екстракту з МТрО марки АМТ-300, що зареєстрована в 3-хвильовому режимі: A – оптична щільність, одиниць; t – час, хвилин; 1 – $\lambda = 254$ нм; 2 – $\lambda = 274$ нм; 3 – $\lambda = 290$ нм

Залежність площі хроматографічного піку від вмісту присадки «Іонол» в МТрО в діапазоні її концентрації $C_i = 0-5000$ мг/кг має лінійний характер, що описується рівнянням $S_i = 0,0093 \cdot C_i$. Коефіцієнт парної кореляції становить $R = 0,9993$. З рисунку 4 випливає, що чутливість УФ-детектора рідинного хроматографа при довжині хвилі $\lambda = 274$ нм до присадки «Іонол» вище, ніж до інших компонентів МТрО.

У роботі [24] зазначено, що ланцюгові хімічні реакції радикалів гідропероксидів і пероксидів зрештою призводять до деградації МЕО з утворенням вуглеводнів, таких як спирти, кетони, похідні карбонової кислоти та вуглецю діоксиду. При цьому в процесах автоокисації МЕО відбувається деградація інгібіторів окиснення, наприклад, присадки «Іонол (DBPC)». У цій роботі розроблено метод INPOX визначення пероксидів в МЕО, що дозволяє реєструвати незначні ознаки окислювального старіння і є простим у використанні. Цей метод дозволяє визначати в МЕО вміст інгібітора окиснення «Іонол» з використанням методу ГХ-МС, навіть у дуже сильно окиснених МТрО та МТуО. У цій роботі не наведено метрологічних характеристик розробленого методу аналізу.

Відомо застосування методу прямого аналізу в режимі реального часу у поєднанні з мас-спектрометрією (DART-MS) для якісного аналізу мастильних матеріалів та присадок до МЕО, а також для кількісного визначення інгібіторів окиснення, наприклад типу «Іонол», у мастильних матеріалах [17]. Кількісні можливості методики оцінювалися для інгібітору окиснення в матриці МЕО в діапазоні концентрацій 0,1–8 мг/мл в МЕО, використовуючи як внутрішній стандарт структурний аналог інгібітору окиснення. При цьому: лінійність методу ($R^2 = 0,997$), точність (% RSD = 2,6%) та LOD (0,04 мг/мл в МЕО); показано, що метод DART-MS може бути застосований для експрес-визначення присадок в МЕО без попередньої екстракції присадки [17].

У роботах [7, 25] викладено методи визначення вмісту присадки «Іонол («DBPC»)» у мінеральних ізоляційних оливах. Метод ІЧ-спектрофотометрії встановлює визначення вмісту присадки «DBPC» у невикористаних та робочих МЕО шляхом вимірювання ІЧ-поглинання на частоті валентних коливань зв'язку О-Н просторово-утруднених фенолів. Цей метод також можна використовувати для визначення вмісту 2,6-ди-трет-бутилфенолу (присадка «DBP»), але не дозволяє розрізнити присадки «DBPC» та «DBP». Цей метод встановлює процедуру отримання еталонних МЕО, що не містять присадок, із використанням твердо-фазної екстракції з використанням силікагелю. При виконанні вимірювань використовують ІЧ-Фур'є-спектрометр або двопроменевий ІЧ-спектрофотометр в діапазоні від 3000 до 3800 cm^{-1}). При цьому: а) збіжність може перевищувати значення, наведені нижче, тільки в одному випадку з 20: для невикористаних і робочих олив: 15% або $0,15 \cdot (x_1 + x_2) \cdot 0,5$, де x_1 і x_2 – результати двох послідовних визначень; б) відтворюваність може перевищувати значення, наведені нижче тільки в одному випадку з 20: 1) невикористані МЕО: для вмісту присадки «DBPC» < 0,1% мас, відтворюваність становить 0,02% абсолютного значення; 2) невикористані МЕО: для вмісту присадки «DBPC» > 0,1% мас, відтворюваність становить 45% або $0,45 \cdot (x_1 + x_2) \cdot 0,5$; 3) робочі МЕО: 45% або $0,45 \cdot (x_1 + x_2) \cdot 0,5$. На рисунку 5 показана типова хроматограма (у вигляді типового ІЧ-спектра) визначення вмісту присадки «DBPC» в МТрО, що отримана за методом ІЧ-спектрофотометрії з використанням двопроменевого ІЧ-спектрофотометра.

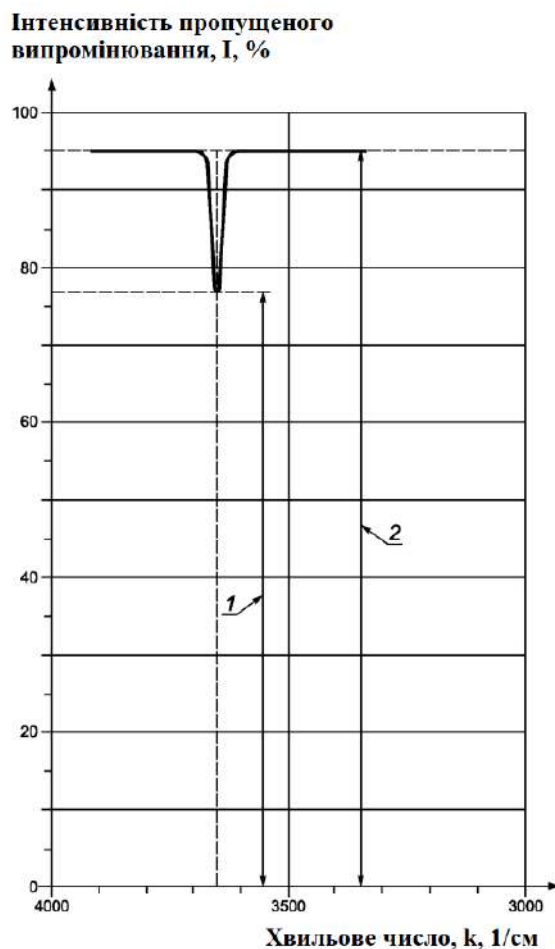


Рис. 5. Типовий ІЧ-спектр двопробного ІЧ-спектрофотометра при визначенні вмісту присадки ДВРС в МТрО: I – інтенсивність пропущеного випромінювання, %; k – хвильове число, cm^{-1} ($1/\text{cm}$); 1 – інтенсивність пропущеного випромінювання; 2 – інтенсивність вхідного випромінювання

У роботах [7, 25] зазначено, що при визначенні вмісту присадки «ДВРС» в МЕО за методом ВЕРХ з використанням рідинного хроматографа із УФ-детектором після підготовки проби МЕО: а) збіжність може перевищувати значення, наведені нижче, тільки в одному випадку з 20: для невикористаних та робочих МЕО – не більше 15 %;

б) відтворюваність може перевищувати значення, наведені нижче, тільки в одному випадку з 20: 1) невикористані МЕО: для вмісту присадки «ДВРС» < 0,1% мас, відтворюваність становить 0,02% абсолютного значення; 2) невикористані МЕО: для вмісту присадки «ДВРС» > 0,1% мас., відтворюваність становить 45%; 3) робочі МЕО: 45 %.

На рисунку 6 наведена типова хроматограма визначення вмісту присадки «ДВРС» в МЕО за методом ВЕРХ.

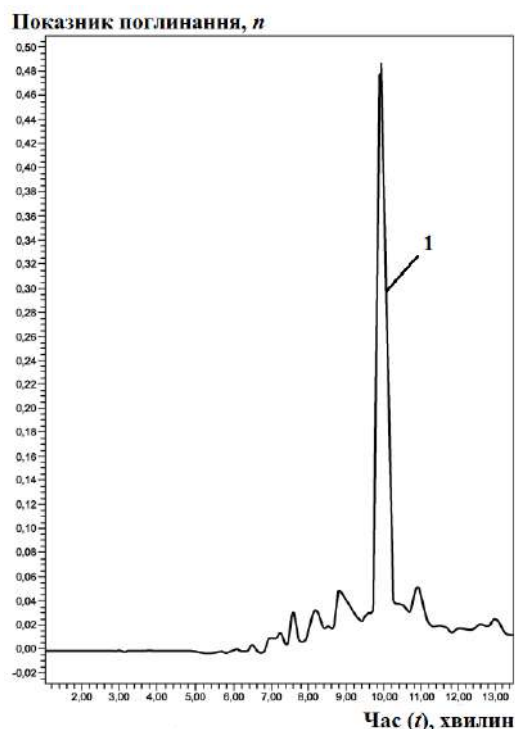


Рис. 6. Типова хроматограма для визначення вмісту присадки DBPC в МЕО за методом ВЕРХ:

n – показник поглинання, одиниць; t – час, хвилин; 1 – присадка DBPC

Метод GC-MS застосовується для МЕО, коли використання методів ІЧ-спектрофотометрії може бути утруднено через перешкоди. При цьому: досліджувані зразки МЕО і стандартні розчини вводять газовий хроматограф з дільником потоку; хроматограми іонів із співвідношенням маси молекули до заряду її іона (m/z) = 191, 205 та 163 призначені для кількісного визначення присадок DBP, DBPC та внутрішнього стандарту відповідно; діапазон вимірюваних концентрацій від 0,02 до 0,4% мас; числові показники для метрологічних характеристик «збіжність» і «відтворюваність», а також хроматограми, що отримуються, в цій роботі не представлені.

У таблиці наведено рекомендовані методи визначення вмісту присадок в МТрО та МТуО.

Таблиця – Рекомендовані методи визначення вмісту присадок у МТрО та МТуО

Метод визначення	Присадка	Об'єкт вимірювань
КТЕГХ; ХЛ; ТОВІ; ГХ	«Іонол»	Стандартні зразки складів присадки «Іонол» в МТрО
ІЧ; ТШХ; ГХ; ВЕРХ; ГХ-МС	«Іонол»	МТрО та МТуО; синтетичні МТрО
КМ	«Іонол»	МТрО
ВЕРХ	«Іонол»; В-15/41; Д-157	МТуО

Примітки: КТЕГХ – кулонометричне титрування з електричним генеруванням хлору; ХЛ – хемілюмінесценція; ТОВІ – титрування з окисно-відновними індикаторами; КМ – кінетичний метод; ТШХ – тонкошарова хроматографія; ВЕРХ – високоефективна рідинна хроматографія; ГХ – газова хроматографія; ІЧ – ІЧ-спектроскопія; ГХ-МС – газова хромато-мас-спектрометрія

Найбільш значущими сучасними методами кількісного визначення вмісту присадок в МТрО та МТуО є: ВЕРХ; ГХ; ГХ-МС; ІЧ-спектроскопія. При цьому методи ГХ-МС дозволяють визначати молекулярну масу, елементний склад, функціональні групи та структурні фрагменти молекул, а за їх сукупністю – структуру молекули речовин, що вивчається [26].

Висновки. 1. Виконано аналіз літературних джерел, що присвячені методам визначення вмісту присадок в МЕО, у тому числі в МТрО та МТуО, в процесах їх експлуатації в обладнанні енергопідприємств, для подальшого виділення найбільш оптимальних методів виконання вимірювань і визначення їхніх переваг та недоліків при застосуванні у вимірювальних лабораторіях. Визначено, що: найбільш значущими сучасними методами кількісного визначення вмісту присадок в МТрО та МТуО є: кулонометричне титрування з електричним генеруванням хлору; хемілюмінесценція; титрування з окисно-відновними індикаторами; кінетичний метод; ТШХ; ВЕРХ; ГХ та ГХ-МС; ІЧ-спектроскопія. 2. Надано рекомендації щодо застосування методів ідентифікації та визначення вмісту присадок в МТрО та МТуО в процесах їх експлуатації в обладнанні енергопідприємств України. Показано, що: а) при визначенні вмісту таких присадок, як: інгібітор окиснення (Іонол (Агідол-1); або ДФ-11; або «Антранілова кислота»), інгібітор корозії (Бетол-1; В15/41; IrgacorL12), деемульгуюча присадка (D-157), деактивуюча присадка (Бетол-1; Irgamet-30; Irgamet-39), протизношувальна присадка (ДФ-11), можуть бути застосовані відповідні методи, такі, як: ВЕРХ – для визначення присадок «Іонол (Агідол-1)», або «Антранілова кислота», або «В15/41», або «IrgacorL12», або «D-157», або «Бетол-1», або «Irgamet-39»; ТШХ, ГХ, ГХ-МС та ІЧ-спектроскопія – для визначення присадки «Іонол (Агідол-1)»; б) відносні похибки визначення концентрацій присадок в МТрО та МТуО не перевищують значення 25 % відносних при довірчій вірогідності $P=0,95$. 3. Подальші перспективи досліджень полягають у виявленні оптимальних методів ідентифікації та визначення вмісту в МТрО та МТуО нових присадок, кількісно-якісний состав яких не розкривають їхні виробники, посиляючись на комерційну таємницю. Це дозволить виконувати технічне діагностування оливонаповненого обладнання із застосуванням відповідних діагностичних моделей.

Список використаних джерел

1. Кенцицький О. Г. Експлуатаційна надійність генеруючого обладнання енергоблоків атомних електростанцій України / О. Г. Кенцицький // Праці ІЕД НАН України. – 2021. – № 58. – С. 100-106. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.100>.
2. IEC 60296:2020, IDT. Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear. – Geneva, Switzerland, International Standard. – 43p.
3. Липштейн Р. А. Трансформаторное масло / Р. А. Липштейн, М. И. Шахнович. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
4. СОУ ВЕА. 100.1/01:2015 Енергетичні оливи та оливні господарства підприємств енергетичної галузі України, та підприємств, де застосовується аналогічне обладнання. Організація експлуатації та технічного обслуговування. Норми та вимоги. – Київ : Стандарт «ВЕА», 2015. – 216 с.
5. СОУ-Н ЕЕ 43.101:2009. Приймання, застосування та експлуатація трансформаторних масел. Норми оцінювання якості. – Київ : КВІЦ; Міністерство палива та енергетики України, 2009. – 152 с.
6. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. Норми випробування електрообладнання. – Київ : ГРІФРЕ: Міністерство палива та енергетики України, 2007. – 266 с.
7. IEC 60666:2010. Detection and determination of specified additives in mineral insulating oils. International Standard. Geneva, Switzerland. 64 p.
8. Современные методы контроля энергетических масел и продуктов их деградации для обеспечения надежности эксплуатации маслонаполненного электрооборудования электрических станций и сетей / С. В. Зайцев, В. А. Кишневский, Г. А. Оборский, И. В. Прокопович. – Одесса : «Экология», 2019. – 304 с.
9. ASTM Standard D 4768-96. Standard Test Method for Analysis of 2,6-Ditertiary-Butyl Para-Cresol and 2,6-Ditertiary-Butyl Phenol in Insulating Liquids by Gas Chromatography. – ASTM International, 1996. – 3 p.
10. Походенко В. Д. Стабильные феноксильные радикалы / В. Д. Походенко, В. А. Хижный, В. А. Бидзиля // Успехи химии. – 1968. – № 37(6). – С. 998-1024.
11. Витенберг А. Г. Газовая экстракция в хроматографическом анализе. Парофазный анализ и родственные методы / А. Г. Витенберг, Б. В. Иоффе. – Ленинград : Химия, 1982. – 280 с.

12. Zaitsev S. V. Effect of ionol extraction temperature onto its gas chromatographic detection at transformer oil / S.V. Zaitsev // *Праці Одеського політехнічного університету : наук. та наук.-вироб. зб.* – Одеса : ОПУ, 2015. – № 1(45). – С. 96-100. DOI: 10.15276/опу.1.45.2015.16.
13. Spectroscopic analysis of synthetic lubricating oil / S. Zzeyani, M. Mikou, J. Naja, A. Elachhab // *Tribology International.* – 2017. – № 114. – P. 27-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.04.011>.
14. Characterisation and selection of demulsifiers for water-in-crude oil emulsions using low-field H NMR and ESI-FT-ICR MS / G. F. Carneiroa, R. C. Silva, L. L. Barbosa, J. C. C. Freitas., C. M. S. Sad L. V. Tose, G. B. Vaz, W. Romão, E. V. R. de Castro, A. C. Neto, V. Jr. Lacerda // *Fuel.* – 2015. – № 140. – P. 762-772. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.10.020.
15. Boczkaj G. Application of normal-phase high-performance liquid chromatography followed by gas chromatography for analytics of diesel fuel additives / G. Boczkaj // *Analytical and Bioanalytical Chemistry.* – 2013. – № 405. – Pp. 6095-6103. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00216-013-7038-3>.
16. Johnson D. W. Applications of Mass Spectrometric Techniques to the Analysis of Fuels and Lubricants // *Mass Spectrometry* / Edited by M. Aliofkhaezai. – Chapter 7, 2017. – Pp. 209-228. DOI: 10.5772/intechopen.68592.
17. Costaa C. D. The qualitative and quantitative analysis of lubricant oil additives by direct analysis in real time-mass spectrometry / C. D. Costaa, S. Whitmarshb, T. Lynchb, C. S. Creaser // *International Journal of Mass Spectrometry* – 2016. – № 405. – Pp. 24-31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2016.05.011>.
18. Development of infrared spectrometric technique for determining antioxidant additive agidol-1 in the solutions used to add it into diesel fuel / E. V. Kaz'mina, A. N. Smagunova, N. P. Butina, E. N. Korzhova // *Analytics and control.* – 2013. – № 3(17). – С. 345-350. DOI: 10.15826/analitika.2013.17.3.012.
19. ASTM E2412-10-2018. Standard Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry. – ASTM International. – 24 p.
20. Зайцев С. В. Разработка газохроматографического метода определения в энергетических маслах ионола и воды методом добавок / С. В. Зайцев, В. А. Кишнеvский, И. Д. Шуляк // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* – 2015. – № 2/6(74). – С. 21-28. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.40896.
21. Козлов В. К. Определение антиокислительной присадки ионол в трансформаторном масле спектральным методом / В. К. Козлов, Д. М. Валиуллина., Г. А. Муратаева // *Энергетика Татарстана.* – 2010. – № 2(18). – С. 55-58.
22. Зайцев С. В. Діагностування енергетичної оливи в системах охолодження насосних агрегатів обладнання електростанцій / С. В. Зайцев, В. М. Тихенко // *Вісник Хмельницького національного університету.* – 2023. – № 2(1/319). – С. 113-119. DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-113-119.
23. Применение микроколоночной ВЭЖХ для контроля ионола в трансформаторном масле / О. Б. Рудаков, Ф. В. Тхинь, Е. А. Подолина, Л. А. Харитоновна // *Сорбционные и хроматографические процессы.* – 2008. – №1(8). – С.141-146.
24. Карлсон Ш. Надежный, четкий и простой способ измерения содержания пероксидов в масле / Ш. Карлсон, Д. П. Вилкунд // *Naphthenics.* – 2008. – № 4. – С. 12-13.
25. ASTM D 2668-7-2021. Standard Test Method for 2,6-di-tert-Butyl-p-Cresol and 2,6-di-tert-Butyl Phenol in Electrical Insulating Oil by Infrared Absorption. – ASTM International. – 6 p.
26. MaHam A. Analytical Chemistry: A Chemist and Laboratory Technician's Toolkit 1st Edition, Kindle Edition / A. MaHam, B. M. Ham. – WILEY, 2015. – 654 p.

References

1. Kesytskyi, O.G. (2021). Eksploatatsiyna nadiynist' heneruyuchoho obladdannya enerhobloktiv atomnykh elektrostansiy Ukrayiny [Operational reliability of generating equipment of power units of nuclear power plants of Ukraine]. *Pratsi IED NAN Ukrayiny – Proceedings of the IED of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (58), 100–106. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.100>.
2. International Standard. (2020). *Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear* (IEC 60296:2020, IDT).
3. Lipstein, R.A., & Shakhnovich, M.I (1983). *Transformatornoye maslo [Transformer oil]*. Energoatomizdat.
4. 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).

5. KVITS. (2009). *Acceptance, application and operation of transformer oils. Norms of quality assessment* (SOU-N EE 43.101:2009).
6. GRIFRE. (2007). *Norms of electrical equipment testing* (SOU-N EE 20.302:2007).
7. International Standard. (2010). *Detection and determination of specified additives in mineral insulating oils*. (IEC 60666:2010).
8. 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*.
9. ASTM International. (1996). *Standard Test Method for Analysis of 2,6-Ditertiary-Butyl Para-Cresol and 2,6-Ditertiary-Butyl Phenol in Insulating Liquids by Gas Chromatography* (ASTM Standard D 4768-96).
10. Pokhodenko, V.D., Khizhny, V.A., & Bidzilya, V.A. (1968). Stabilnye fenoksilnye radikaly [Stable phenoxy radicals]. *Uspekhi khimii – Advances in Chemistry*, 37(6), 998–1024.
11. Witenberg A.G., & Ioffe, B.V. (1982). *Gazovaya ekstraktsiya v khromatograficheskoy analize. Parofaznyy analiz i rodstvennyye metody [Gas extraction in chromatographic analysis. Headspace analysis and related methods]*. Chemistry.
12. Zaitsev, S.V. (2015). Vliyaniye temperatury ekstraktsii ionola na yego gazokhromatograficheskoye obnaruzheniye v transformatornom masle [Effect of ionol extraction temperature onto its gas chromatographic detection at transformer oil]. *Naukovyy ta naukovo-vyrobnychyy zbirnyk “Pratsi Odeskoho politekhnichnoho universytetu” – Scientific and scientific-production collection “Proceedings of Odessa Polytechnic University”*, (1/45), 96–100. doi:10.15276/opu.1.45.2015.16.
13. Zzeyani, S., Mikou, M., Naja, J., & Elachhab, A. (2017). Spectroscopic analysis of synthetic lubricating oil. *Tribology Int.*, (114), 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.04.011>.
14. Carneiroa, G.F., Silva, R.C., Barbosa, L.L., Freitas, J.C.C., Sad, C.M.S., Tose, L.V., Vaz, G.B., Romão, W., de Castro, E.V.R., Neto, A.C., & Lacerda, V.Jr. (2015). Characterisation and selection of demulsifiers for water-in-crude oil emulsions using low-field H NMR and ESI-FT-ICR MS. *Fuel.*, (140), 762-772. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.10.020.
15. Boczkaj, G. (2013). Application of normal-phase high-performance liquid chromatography followed by gas chromatography for analytics of diesel fuel additives. *Anal. Bioanal. Chem.*, (405), 6095–6103. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00216-013-7038-3>.
16. Johnson D.W. (2017). Applications of Mass Spectrometric Techniques to the Analysis of Fuels and Lubricants. *Intech open: Mass Spectrometry*, 7, 209-228. DOI: 10.5772/intechopen.68592.
17. Caitlyn Da Costaa, Samuel Whitmarshb, Tom Lynchb, Colin S. Creaser. (2016). The qualitative and quantitative analysis of lubricant oil additives by direct analysis in real time-mass spectrometry. *International Journal of Mass Spectrometry*, 405(2016), 24–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2016.05.011>.
18. Kaz'mina, E.V., Smagunova, A.N., Butina, N.P., Korzhova, E.N. (2013). Rozrobka infrachervonoyi spektrometrychnoyi metodyky vyznachennya antyoksydantnoyi prysadky ahidol-1 u rozchynakh yiyi dodavannya do dyzelnoho palyva [Development of infrared spectrometric technique for determining antioxidant additive agidol-1 in the solutions used to add it into diesel fuel]. *Analitika i kontrol – Analytics and control*, (3/17), 345–350. DOI:10.15826/analitika.2013.17.3.012.
19. ASTM International. (2018). *Standard Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry*. (ASTM E2412-10(2018)).
20. Zaitsev, S.V., Kishnevsky, V.A., Shulyak, I.D. (2015). Razrabotka gazokhromatograficheskogo metoda opredeleniya v energeticheskikh maslakh ionola i vody metodom dobavok [Development of a gas chromatographic method for the determination of ionol and water in energy oils by the method of additives]. *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy – Eastern European Journal of Advanced Technologies*, (2/6-74), 21–28. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.40896.
21. Kozlov, V., Valiullina, D., & Murataeva, G. (2010). Opredeleniye antiokislitel'noy prysadki ionol v transformatornom masle spektralnym metodom [Definition of an antioxidizing additive ionol in transformer oil a spectral method]. *Energetika Tatarstana – Energy of Tatarstan*. (2/18), 55–58.
22. Zaitsev, S.V., & Tychenko V.M. (2023). Diahnostuvannya enerhetychnoyi olyvy v systemakh okholodzhennya nasosnykh ahrehativ obladnannya elektrostantsiy [Diagnostics of energy oil in cooling systems of pumping units of power plant equipment]. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsionalnoho*

universytetu – Bulletin of the Khmelnytskyi National University, (2/1-319), 113–119. DOI 10.31891/2307-5732-2023-319-1-113-119.

23. Rudakov, O.B., Fan Vinh Thinh, Podolina, E.A., Kharitonova, L.A. (2008). *Primeneniye mikrokolonnochnoy VEZHKH dlya kontrolya ionola v transformatornom masle [Application of micro-column HPLC to control ionol in transformer oil]. Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy – Sorption and chromatographic processes*, (1/8), 141–146.

24. Carlson S., Wiklund, D.P. (2008). *Nadezhnyy, chetkiy i prostoy sposob izmereniya sodержaniya peroksidov v masle [Reliable, clear and easy way to measure oil peroxides]. Naphthenics*, (4), 12-13.

25. ASTM International. (2021). *Standard Test Method for 2,6-di-tert-Butyl-p-Cresol and 2,6-di-tert-Butyl Phenol in Electrical Insulating Oil by Infrared Absorption*. (ASTM D 2668-7-2021).

26. Aihui MaHam, Bryan M. Ham. *Analytical Chemistry: A Chemist and Laboratory Technician's Toolkit 1st Edition, Kindle Edition*. 2015. WILEY.

Отримано 17.06.23

UDC 662.753:621.89:621.311:621.039

Serhii Zaitsev¹, Volodymyr Kravchenko², Valentin Tikhenko³

¹PhD in Technical Sciences, engineer of the Department of Nuclear Power Plants
Odesa Polytechnic National University, (Odesa, Ukraine)

E-mail: sdjavdet@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1166-3243>

²Doctor of Technical Sciences, Professor, head of the Department of Nuclear Power Plants
Odesa Polytechnic National University, (Odesa, Ukraine)

E-mail: kravchenko@op.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7557-3327>

³Doctor of Technical Sciences, Professor, head of the Department of digital technologies in engineering
Odesa Polytechnic National University, (Odesa, Ukraine)

E-mail: vtikhenko@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2804-2838>

METHODS OF DETERMINING THE CONTENT OF ADDITIVES IN ENERGY OILS OF EQUIPMENT OF POWER ENTERPRISES

This article is a review. Mineral transformer or turbine oils ensure reliable operation of the corresponding equipment of energy enterprises. One of the ways to control the condition of transformer and turbine oils is to study the content of functional additives in them.

Developers of new additives and transformer and turbine oils do not always reveal their quantitative and qualitative composition. Some outdated energy oils are still used in their circulation systems in energy equipment. At the same time, there is a need for additives introduced into such oils, which in their functions may be similar to those additives that were used earlier; constant improvement of methods of identification and determination of the content of additives in energy oils.

The analysis of research and publications on the determination of the content of additives in mineral transformer and turbine oils of the equipment of energy enterprises showed that the issue of choosing the optimal methods of performing such measurements is currently not given enough attention in the scientific literature, depending on the state and values of physico-chemical quality indicators these oils; measuring equipment already existing in laboratories for their use in determining new brands of additives in mineral transformer and turbine oils.

The purpose of the article is to analyze the methods of determining the content of additives in mineral energy oils, including transformer and turbine oils, in the processes of their operation in the equipment of energy enterprises, which will allow to highlight the most optimal methods of performing measurements and determine their advantages and disadvantages when used in measuring laboratories.

Based on the analysis of literary sources, modern methods of determining the content of additives in mineral energy oils are considered. Recommendations are given on the application of methods of identification and determination of the content of additives in mineral transformer and turbine oils.

Analysis of modern methods for determining the content of additives in mineral energy oils showed that the most significant such methods are: liquid and gas chromatography or chromatography-mass spectrometry; IR-spectroscopy. The presented results can be used for the justified choice or development of new methods for the identification and determination of the content of new additives in mineral energy oils for diagnosing oil-filled equipment using appropriate diagnostic models.

Keywords *energy enterprise; oil-filled equipment; physical and chemical methods of analysis; transformer and turbine oils.*

Fig.: 8. Table: 1. References: 26.

Тетяна Філінська¹, Антоніна Філінська², Сергій Павлюк³

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)
E-mail: f111nskaya@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7921-1989>

²старший викладач кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)
E-mail: antoniyafilin@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6975-6186>

³магістрант кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)
E-mail: serpik07@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7615-963X>

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ДОБАВОК РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ ДЛЯ МАЙОНЕЗНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Майонези й майонезні соуси посідають вагоме місце в раціоні сучасної людини. Обсяги їх виробництва у світі мають сталу тенденцію до зростання. Розширюється асортимент продукції з урахуванням сучасної орієнтації на здорове харчування. Запит споживачів на майонезну продукцію з низьким вмістом жиру, без рецептурних складових тваринного походження, збагачену вітамінами, мікроелементами й харчовими волокнами, потребує пошуку нових функціональних добавок і дослідження їх технологічних показників. У статті наведено результати дослідження властивостей рослинної клітковини (макухи), різних фракцій подрібненого насіння і борошна льону, кунжуту та гарбуза. Для досліджуваних зразків визначений показник вологоутримуючої здатності методом центрифугування. Найбільшу здатність утримувати вологу має макуха харчова з насіння льону (806,2 %), а найменшу – подрібнене насіння гарбуза (104,7 %), що пояснюється високим вмістом в останньому жиру. Досліджена можливість коригування показника вологоутримуючої здатності сумішею макухи, борошна і подрібненого насіння шляхом зміни кількості окремих компонентів у комплексних добавках до низькожирних майонезів. Запропонована рецептура безяєчного майонезу з використанням комплексу на основі продуктів льону зі співвідношенням льняної макухи, борошна і подрібненого насіння (фракція з розміром частинок до 0,5 мм) відповідно 1:1:0,5. Для виготовленого майонезу 25%-вої жирності з комплексною функціональною добавкою визначено показник стійкості емульсії, який відповідає вимогам ДСТУ 4487:2015 Майонези та майонезні соуси. Загальні технічні умови.

Ключові слова: майонезна продукція; насіння; макуха; льон; кунжут; гарбуз; вологоутримуюча здатність.
Табл.: 4. Бібл.: 17.

Актуальність теми дослідження. Світовий ринок майонезу демонструє сталі темпи зростання і на найближчі п'ять років маємо прогнозоване збільшення виробництва на рівні близько 4 % [1]. Майонезна продукція використовується як для прямого вживання, так і у процесі виготовлення різноманітних продуктів, що подаються в закладах харчування. Сучасні напрями розвитку харчової індустрії орієнтовані на збільшення виробництва органічної і веганської продукції, на розроблення рецептур безяєчних майонезів, збагачених нутрієнтами рослинного походження. В Україні попит на майонези й майонезні соуси має сезонні коливання. При цьому вітчизняні аналітики пов'язують розширення асортименту продукції з впровадженням продуктивних (рецептурних) інновацій і з використанням компонентів натурального походження [2]. Для виробників майонезної продукції, особливо з низькою жирністю, актуальним завданням є пошук згущувачів, які мають забезпечувати виготовлення продукції потрібної консистенції.

Постановка проблеми. Майонез – це багатокомпонентна водно-жирова емульсія прямого типу, у якій у воді (дисперсне середовище) у дрібнокрапельному стані розподілений жир (дисперсна фаза). Обов'язковими рецептурними компонентами таких продуктів є емульгатори (сполуки з дифільною будовою молекул), які запобігають процесу коалесценції і розшаруванню системи на дві незмішувані фази – водну і жирову. Щоб виготовити низькожирний майонез зі значною часткою води, потрібні особливі рецептурні компоненти – згущувачі, які, впливаючи на реологічні властивості водної фази, забезпечують виготовлення продукту потрібної в'язкості. Використання в рецептурах низькожирних майонезів і майонезних соусів нових функціональних добавок потребує дослідження їхніх властивостей, серед яких важливою є вологоутримуюча здатність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Емульсійні жировмісні продукти відіграють важливе значення в харчуванні, оскільки при вживанні жирів організм людини за своєю їх лише після переведення у стан емульсії. Надлишкове споживання жирів має для здоров'я негативні наслідки, тому прихильники здорового харчування віддають перевагу низькожирній продукції. Це спонукає виробників розширювати асортимент майонезів і майонезних соусів, а науковців - до пошуку нових рецептурних компонентів, дослідження їх властивостей і можливого впливу на якість кінцевого продукту в процесі формування багатокомпонентної системи емульсійного типу.

Традиційними компонентами низькожирних майонезів слугують пектини, крохмалі і такі харчові Е-добавки, як альгінат натрію (E401), натрій карбоксиметилцелюлоза (E466), гуар (E412), ксантан (E415), їх суміші та ін. [3]. Як функціональні добавки в майонезні соуси використовують білкові ізоляти [4]. До складу низькожирних майонезів додають порошки, отримувані зі шкірки банана і кавуна [5; 6]. Ефективним згущувачем є борошно з різної сировини – гарбузове [7], вівсяне і перлове [8; 9], а також горохове [10]. Причому останнє додатково збагачує продукт рослинним білком. Серед компонентів низькожирних дієтичних емульсійних продуктів є рисове борошно [11] і борошно поранг (Porang) [12]. При виготовленні майонезних продуктів використовують арахісове, кунжутне й соєве борошно [4]. Розробники технології виготовлення соусів зі зниженою калорійністю пропонують до використання борошно амаранту, зародків пшениці і аглютенного борошна з черемхи [13].

На сьогодні в раціоні спостерігається дефіцит харчових волокон. Він може бути частково поповнений за рахунок використання багатих на клітковину компонентів майонезних соусів [14; 15].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх публікацій показав, що питанням розширення асортименту майонезної продукції функціонального призначення (дієтичної, веганської і збагаченої корисними нутрієнтами) приділяється значна увага. Нагальною є потреба дослідження технологічних властивостей функціональних добавок у майонезі пониженої жирності з високою часткою водної фази. Важливою характеристикою є показник воготримуючої здатності, який дозволяє зробити висновок щодо можливості використання добавки як ефективного згущувача.

Метою статті є дослідження властивостей як окремих видів функціональних добавок для майонезних продуктів з низькою жирністю (макухи, борошна, подрібненого насіння) так і їх сумішей.

Виклад основного матеріалу. Для досліджень використовували клітковину (макуху), борошно і насіння з кунжуту, льону і гарбуза. Показники їхньої якості наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Показники якості досліджуваних зразків з льону, кунжуту і гарбуза

Назва	Енергетична цінність на 100 г продукту, ккал	Поживна цінність на 100 г продукту, г		
		білки	жири	вуглеводи
Насіння льону	534	18,3	42,2	28,9
Льняне борошно	390	23,6	9,4	50,5
Макуха харчова з насіння льону	298	34,0	14,0	9,0
Насіння кунжуту	505	19,4	48,7	17,8
Кунжутне борошно	390	28,1	9,2	46,2
Макуха харчова з насіння кунжуту	425	50,7	19,8	11,0
Гарбузове насіння	390	12,6	49,5	35,4
Гарбузове борошно	479	26,2	25,7	32,4
Пектин гарбуза в клітковині*	348	9,8	2,1	79,6

Примітка. Пектин гарбуза в клітковині являє собою суміш клітковини з оболонкою насіння пшениці (60 %) і порошку гарбуза (40 %).

Льняне, кунжутне й сухе гарбузове насіння перед дослідженням подрібнили і відокремили фракцію з розміром частинок до 0,5 мм. Вибір найменшої за розміром фракції пояснюється попередньо виконуваними дослідженнями щодо впливу розміру частинок

на їхню вологоутримуючу здатність. До того ж використання як функціональної добавки до майонезів і майонезних соусів великих за розміром фракцій насіння мало б небажаний вплив на консистенцію одержуваного продукту. Зразки макухи з насіння кунжуту і льону, а також пектину гарбуза в клітковині попередньо подрібнили, їхній фракційний склад наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Фракційний склад досліджуваних зразків макухи з насіння кунжуту, льону і пектину гарбуза в клітковині

Назва	Вміст фракції понад 1,25 мм, %	Вміст фракцій, % з розмірами, мм		
		1,00-1,25	0,50-1,00	0 - 0,50
Макуха харчовий із насіння льону	0,04	14,48	17,40	68,08
Макуха харчовий із насіння кунжуту	0,06	11,51	23,29	65,14
Пектин гарбуза в клітковині	0,08	13,63	22,48	63,81

Вологоутримуючу здатність досліджуваних об'єктів визначали методом центрифугування [16], отримані результати наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Вологоутримуюча здатність (W, %) насіння, макухи й борошна льону, кунжуту та гарбуза

Назва	W, %	Назва	W, %	Назва	W, %
Макуха харчова з насіння льону	806,2	Макуха харчова з насіння кунжуту	511,6	Пектин гарбуза в клітковині	389,1
Льняне борошно	479,0	Кунжутне борошно	430,0	Гарбузове борошно	273,5
Фракція насіння льону до 0,5 мм	255,5	Фракція насіння кунжуту до 0,5 мм	147,2	Фракція насіння гарбуза до 0,5 мм	104,7

Як видно з табл. 3, для групи продуктів з однієї сировини показник вологоутримуючої здатності найменший для подрібненого насіння. Пояснити це можна присутністю в його складі значної кількості жирів, тоді як борошно і макуха містять більшу кількість білків і вуглеводів.

Присутність у насінні корисних нутрієнтів робить їх бажаними компонентами у складі комплексних функціональних добавок. Тому були досліджені трикомпонентні суміші з різним вмістом макухи, борошна і насіння (табл. 4).

Таблиця 4 – Вологоутримуюча здатність комплексних функціональних добавок на основі продуктів переробки насіння льону, кунжуту й гарбуза

Назва комплексної функціональної добавки	Вологоутримуюча здатність, %	Вміст компонентів, %		
		макуха*	борошно	насіння**
Льон 1	340,0	10	10	80
Льон 2	446,3	20	20	60
Льон 3	520,0	30	30	40
Льон 4	614,9	40	40	20
Кунжут 1	229,5	10	10	80
Кунжут 2	276,2	20	20	60
Кунжут 3	357,5	30	30	40
Кунжут 4	378,3	40	40	20
Гарбуз 1	182,8	10	10	80
Гарбуз 2	255,0	20	20	60
Гарбуз 3	308,5	30	30	40
Гарбуз 4	413,2	40	40	20

* – пектин гарбуза в клітковині для комплексних добавок на основі гарбуза.

** – фракція подрібненого насіння з розмірами частинок менше ніж 0,5 мм.

З отриманих результатів, наведених у табл. 4, можемо зробити висновок, що збільшення у складі комплексної функціональної добавки компонентів з високим показником вологоутримуючої здатності прогнозовано сприяє збільшенню цього показника і для суміші.

Для виготовлення дослідного зразка майонезу як комплексної функціональної добавки обрано суміш на основі продуктів льону (Льон 4) з найвищим показником вологоутримуючої здатності (614,9 %). До рецептурного складу низькожирного емульсійного продукту ввійшли (%): соняшникова рафінована дезодорована олія – 25,0; сода харчова – 0,05; цукор пісок – 2,0; сіль поварена – 1,27; крохмаль 4,15; ксантан – 0,03; комплексна добавка Льон 4 – 8,0; вода – 59,5. Процес виготовлення майонезу включав наступні стадії: приготування комплексної функціональної добавки Льон 4 шляхом змішування льняної макухи, борошна і подрібненого насіння (фракція з розміром частинок до 0,5 мм) у співвідношенні 1:1:0,5 відповідно; змішування функціональної добавки з невеликою кількістю води й набрякання; приготування жирової фази і її нагрівання до 60-65 °С; приготування водної фази і її нагрівання до 60-65 °С; змішування водної і жирової фаз; емульгування і гомогенізація. Отриманий продукт за показником стійкості емульсії (97,2 %), яку визначали за стандартною методикою [17], відповідає вимогам ДСТУ 4487:2015 Майонези та майонезні соуси. Загальні технічні умови.

Висновки. На підставі проведених досліджень визначені показники вологоутримуючої здатності макухи, борошна і подрібненого насіння (фракція з розміром частинок до 0,5 мм) льону, кунжуту і гарбуза. Для вказаних груп продуктів з різної сировини встановлено, що найменшим показником вологоутримуючої здатності характеризується подрібнене насіння. Для насіння гарбуза цей показник дорівнює 104,7 %, для кунжутного – 147,2 % і для льняного – 255,5 %. Такі результати можна пояснити високим вмістом у складі насіння жирів 49,5, 48,7 і 42,2 % відповідно, тоді як борошно й макуха містять більшу кількість білків і вуглеводів. Найвищі показники вологоутримуючої здатності характерні для макухи, яку отримують після вилучення з насіння олії методом пресування і відповідно вміст жиру в ньому порівняно з насінням набагато менший. Серед різних за складом комплексів з однотипної сировини, найвища здатність утримувати вологу характерна для льняної суміші зі співвідношенням макухи, борошна і дрібної фракції насіння 1:1:0,5 відповідно. Показник стійкості емульсії 97,2 % підтверджує ефективність дії обраного згущувача.

Список використаних джерел

1. Mayonnaise Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2023-2028: [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.imarcgroup.com/prefeasibility-report-mayonnaise-manufacturing-plant>.
2. Божко Т. Ринок соусної продукції: детермінанти розвитку в Україні [Електронний ресурс] / Т. Божко, Р. Дончевська, Н. Шаповалова // Товари і ринки. – 2019. – № 4 (32) – С. 26-39. – Режим доступу: [https://doi.org/10.31617/tr.knute.2019\(32\)03](https://doi.org/10.31617/tr.knute.2019(32)03).
3. Харчові полісахариди. Виробництво, властивості, використання : навч. посіб. / Т. Г. Філінська, О. В. Черваков, А. О. Філінська. – Донецьк : ДВНЗ УДХТУ, 2017. – 253 с.
4. Plant-based mayonnaise: Trending ingredients for innovative products / R. C. F.deMenezes, Q. C. de C. Gomes, B. S. deAlmeida, M. F. R. deMatos, L. CedrazPinto // International Journal of Gastronomy and Food Science. – 2022. – Vol. 30, December. – Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100599>.
5. Evanuarini H. The use of watermelon rind flour as stabilizer for reduced fat mayonnaise [Electronic resource] / H. Evanuarini, D. Amertaningtyas, D. Utama, A. Safitri // Jurnal Ilmu dan Teknologi Hasil Ternak. – 2020. – Vol. 15, № 3. – P. 172-182. – Access mode: <https://doi.org/10.21776/ub.jitek.2020.015.03.5>.
6. Evanuarini H. The Quality of Low Fat Mayonnaise Using Banana Peel Flour as Stabilizer [Electronic resource] / H. Evanuarini, A Susilo // IOP Conference Series Earth and Environmental Science (June 2020). – Vol. 478(1). – 012091. – Access mode: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/478/1/012091>.
7. Nidhal H. A. Characteristics of reduced fat mayonnaise using pumpkin flour (Cucurbita moschata) as fat replacer [Electronic resource] / H. A. Nidhal, H. Evanuarini, I. Thohari // Environmentally Sustainable Animal Industry : International conference. 2nd 2021. (the 2nd icesai 2021, Malang, Indonesia). – Pp. 335-338. – Access mode : <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202233500017>.

8. Чоні І. В. Використання природних стабілізаторів у технології емульсійної продукції [Електронний ресурс] / І. В. Чоні, Т. Ю. Суткович // Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. – 2015. – № 1 (73). – С. 54-59. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvruetn_2015_1_8.

9. Чоні І. В. Розробка нової емульсійної продукції на основі рослинної сировини [Електронний ресурс] / І. В. Чоні, Н. П. Коваленко // Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. – 2008. – № 1. – С. 108–111. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvruetn_2008_1_24.

10. Романовська Т. Властивості майонезу, збагаченого білком [Електронний ресурс] / Т. Романовська, Н. Романовський // Науковий вісник Міжнародної асоціації науковців. Серія: Економіка, управління, безпека, технології. – 2022. – № 1 (3). – Режим доступу: <https://doi.org/10.56197/2786-5827/2022-1-3-8>.

11. Дзюба Н. А. Сенсорний аналіз як основа для створення нових дієтичних соусів [Електронний ресурс] / Н. А. Дзюба, В. С. Степанова // Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. – 2022. – № 5. – С. 45-55. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.5.6>.

12. Evanuarini N. Characteristic of Low Fat Mayonnaise Containing Porang Flour as Stabilizer [Electronic resource] / N. Evanuarini, N. Indratiningsih, P. Hastuti // Pakistan Journal of Nutrition. – 2015. – № 14. – Pp. 392-395. – Access mode: <https://scialert.net/abstract/?doi=pjn.2015.392.395>.

13. Theoretical preconditions of development technology souss with reduced calority [Electronic resource] / O. Nemirich, G. Lyavinets, V. Vinnikov, V. Mikhailenko // Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies. – 2018. – № 20(85). – Pp. 90-94. – Access mode : <https://doi.org/10.15421/nvlvet8517>.

14. Дослідження технологічних властивостей порошку шкірки винограду як функціонального інгредієнту майонезного соусу [Електронний ресурс] / В. В. Анан'єва, А. П. Белінська, Л. В. Кричковська, С. О. Петров, І. А. Петрова // Технологии пищевой, легкой и химической промышленности. – 2016. – № 6/3(32). – С. 36–41. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.86540>.

15. Галух Б. І. Дослідження стійкості майонезних емульсій виготовлених із використанням харчових волокон [Електронний ресурс] / Б. І. Галух, М. З. Паска, У. Р. Драчук // Науковий вісник ЛНУВМБТ ім. С. З. Ґжицького. – 2014. – Т. 16. – № 3(60), Ч. 4. – С. 21-30. – Режим доступу: <http://repository.ldufk.edu.ua/handle/34606048/27610>.

16. «Сучасні напрями розвитку технологій виробництва харчових продуктів» та «Сучасні фізико-хімічні методи у виробництві харчових продуктів»: метод. вказівки до лаб. робіт для студ. спеціальності 102 «Хімія» ден. форми навчання / уклад. Ю. В. Менафова. – Краматорськ : ДДМА, 2020. – 24 с.

17. ДСТУ 4560:2006 Майонези. Правила приймання та методи випробування. – Вид. офіц. – Чинний від 2008-01-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 2008. – III, 16 с. – (Національний стандарт України).

References

1. Mayonnaise Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2023-2028. <https://www.imarcgroup.com/prefeasibility-report-mayonnaise-manufacturing-plant>.

2. Bozhko, T., Donchevska, R., & Shapovalova, N. (2019). Rynok sousnoi produktsii: determinanty rozvytku v Ukraini [Market of sauce products: determinants of development in Ukraine] *Tovary i rynky – Goods and markets*, 4(32), 26-39. [https://doi.org/10.31617/tr.knute.2019\(32\)03](https://doi.org/10.31617/tr.knute.2019(32)03).

3. Filinska, T.H., Chervakov, O.V., & Filinska, A.O. (2017). *Kharchovi polisakharydy. Vyrobnytstvo, vlastyvyosti, vykorystannia: Navchalnyi posibnyk [Food polysaccharides. Production, properties, use: Study guide]*. DVNZ UDKhTU.

4. Rose Carla Ferreira deMenezes, Queliane Cristina de Carvalho Gomes, Beatriz Santos de Almeida, Márcia Felgueiras Rebelo deMatos, Laise CedrazPinto. (December 2022). Plant-based mayonnaise: Trending ingredients for innovative products. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100599>.

5. Evanuarini, H., Amertaningtyas, D., Utama, D., & Safitri, A. (2020). The use of watermelon rind flour as stabilizer for reduced fat mayonnaise. *Journal Ilmu dan Teknologi Hasil Ternak*, 15(3), 172-182. <https://doi.org/10.21776/ub.jitek.2020.015.03.5>.
6. Evanuarini, H., & Susilo, A. (June 2020). The Quality of Low Fat Mayonnaise Using Banana Peel Flour as Stabilizer. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 478(1), 012091. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/478/1/012091>.
7. Nidhal, H.A., Evanuarini, H., & Thohari, I. (2021). Characteristics of reduced fat mayonnaise using pumpkin flour (*Cucurbita moschata*) as fat replacer. *Environmentally Sustainable Animal Industry. International conference* (2nd icesai 2021, pp. 335-338). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202233500017>.
8. Choni, I.V., & Sutkovych, T.Yu. (2015) Vykorystannia pryrodnykh stabilizatoriv u tekhnolohii emulsiinoy produktii [Use of natural stabilizers in technology emulsion products]. *Naukovyi visnyk Poltavskoho universytetu ekonomiky i torhivli – Scientific Bulletin of Poltava University of Economics and Trade*, 1(73), 54–59. http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvpuetn_2015_1_8.
9. Choni, I.V., & Kovalenko, N.P. (2008) Rozrobka novoi emulsiinoy produktii na osnovi roslynnoi syrovyny [Development of new emulsion products based on vegetable raw materials]. *Naukovyi visnyk Poltavskoho universytetu ekonomiky i torhivli – Scientific Bulletin of Poltava University of Economics and Trade*, 1, 108–111. http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvpuetn_2008_1_24.
10. Romanovska, T., & Romanovskiy, N. (2022) Vlastyivosti maionezu, zbahachenoho bilkom [Properties of protein-enriched mayonnaise]. *Naukovyi visnyk Mizhnarodnoi asotsiatsii naukovtsiv. Serii: ekonomika, upravlinnia, bezpeka, tekhnolohii – Scientific Bulletin of the International Association of Scientists. Series: Economy, management, security, technologies*, 1(3). <https://doi.org/10.56197/2786-5827/2022-1-3-8>.
11. Dziuba, N. A., & Stepanova, V.S. (2022). Sensornyi analiz yak osnova dlia stvorennia novykh diietnykh sousiv [Sensory analysis as a basis for creating new dietary sauces]. *Tavriyskyi naukovyi visnyk. Serii: Tekhnichni nauky – Tavriyskyi scientific bulletin. Series: Technical sciences*, (5), 45-55. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.5.6>.
12. Herly Evanuarini, Nurliyani, Indratiningsih and Pudji Hastuti, 2015. Characteristic of Low Fat Mayonnaise Containing Porang Flour as Stabilizer. *Pakistan Journal of Nutrition*, 14, 392-395. <https://scialert.net/abstract/?doi=pjn.2015.392.395>.
13. Nemirich, O., Lyavinets, G., Vinnikov, V., & Mikhailenko, V. (2018). Theoretical preconditions of development technology sous with reduced calority. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies*, 20(85), 90-94. <https://doi.org/10.15421/nvlvet8517>.
14. Ananieva, V.V., Bielinska, A.P., Krychkovska, L.V., Petrov, S.O., & Petrova, I. A. (2016). Research of technological properties of grape skin powder as an functional ingredient of mayonnaise sauce. *Technology Audit and Production Reserves*, 6/3(32), 36–41. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.86540>.
15. Halukh, B.I., Paska, M.Z., Drachuk, U.R. (2014). Doslidzhennia stiikosti maioneznykh emulsii vyhotovlenykh iz vykorystanniam kharchovykh volokon [Study of the stability of mayonnaise emulsions made with the use of food fibers]. *Naukovyi visnyk LNUVMBT im. S. Z. Gzhitskoho – Scientific bulletin of LNUVMBT named after S. Z. Gzhitskyi*, 16(3(60)), P. 4, 21-30. <http://repository.ldufk.edu.ua/handle/34606048/27610>.
16. Mienafova, Yu.V. (2020). “Suchasni napriamy rozvytku tekhnolohii vyrobnytstva kharchovykh produktiv” ta “Suchasni fizyko-khimichni metody u vyrobnytstvi kharchovykh produktiv”: metodychni vkazivky do laboratornykh robit dlia studentiv spetsialnosti 102 «Khimii» dennoi formy navchannia [“Modern trends in the development of food production technologies” and “Modern physico chemical methods in food production”: methodological instructions for laboratory work for students of the specialty 102 “Chemistry” full-time study (2020). DDMA
17. DSTU 4560:2006 Maionezy. Pravyla prymannia ta metody vyprobuvannia [DSTU 4560:2006 Mayonnaises. Acceptance rules and test methods]. (2008). Derzhspozhivstandard of Ukraine.

Отримано 19.05.23

Tetiana Filinska¹, Antonina Filinska², Sergii Pavliuk³¹PhD in Technical Sciences, Associate Professorof the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products
Ukrainian State Chemical and Technological University (Dnipro, Ukraine)E-mail: filinskaya@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7921-1989>²senior lecturer of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products
Ukrainian State Chemical and Technological University (Dnipro, Ukraine)E-mail: antoniyafilin@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6975-6186>³master student of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products
Ukrainian State Chemical and Technological University (Dnipro, Ukraine)E-mail: serpik07@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7615-963X>**RESEARCH OF THE PROPERTIES OF FUNCTIONAL ADDITIVES
OF PLANT ORIGIN FOR MAYONNAISE PRODUCTS**

Mayonnaise and mayonnaise sauces hold a significant place in the diet of a modern person. Their production volume worldwide has a constant tendency to increase. The product range is expanding, considering the modern trends in healthy nutrition. Consumer demand for mayonnaise products with low fat content, free from animal-derived ingredients, enriched with vitamins, trace elements, and dietary fibers, necessitates the search for new functional additives and the study of their technological properties. The article presents the results of a study on the properties of vegetable fiber (cake), different fractions of crushed seeds and flour of flax, sesame, pumpkin, and their mixtures. A comprehensive thickener based on flax products is proposed.

The use of plant-based functional additives in the production of low-fat mayonnaise and mayonnaise sauces allows for the enrichment of these products with a complex of beneficial nutrients and dietary fibers while contributing to the formation of a stable emulsion product.

When developing recipes for water-fat emulsion products with a significant proportion of the water phase, it is necessary to consider the properties of the components, their influence on the quality of mayonnaise, and possible changes in properties during the production process. An important technological characteristic of special functional additives in low-fat mayonnaise products is their ability to retain water, thereby regulating the viscosity and consistency of the final product.

Analysis of research and publications has shown that considerable attention is given to expanding the range of functional mayonnaise products (including dietary, vegan, and enriched with beneficial nutrients). Starches, pectins, microbial polysaccharides, a wide range of E-additives obtained from algae and tree resin are suggested as rheological additives in low-fat mayonnaise and mayonnaise sauces. Flour, cake, meal, and protein isolates obtained from them serve as effective thickeners.

The aim of the article is to study the properties of both individual types of plant-based functional additives and their mixtures, as well as to establish the possibility of regulating a parameter such as moisture-retaining capacity for mixtures containing the same type of raw materials, including cake, flour, and crushed seeds in different ratios.

The moisture-retaining capacity of the studied samples was determined using the centrifugation method. The highest moisture-retaining capacity is observed in flax seed cake (806.2%), while crushed pumpkin seeds show the lowest capacity (104.7%) due to their high fat content. The possibility of adjusting the moisture-retaining capacity parameter of mixtures of cake, flour, and crushed seeds by varying the amount of individual components in complex additives for low-fat mayonnaise was studied. A proposed recipe for eggless mayonnaise utilizes a complex based on flax products with a ratio of flax cake, flour, and crushed seeds (fraction with particle size up to 0.5 mm) of 1:1:0.5, respectively. For the produced mayonnaise with 25 % fat content and the complex functional additive, the emulsion stability indicator was determined, meeting the requirements of the relevant Ukrainian standards for mayonnaises and mayonnaise sauces.

Keywords: mayonnaise products; seed; cellulose; cake; properties; moisture retention capacity.

Table: 4. References: 17.

Альона Очеретна¹, Наталія Фролова²¹аспірант кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції

Національний університет харчових технологій (Київ, Україна)

E-mail: aol1981@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9698-091X>²доктор технічних наук, професорка кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції

Національний університет харчових технологій (Київ, Україна)

E-mail: frolovan809@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9661-1540>**ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ОЛІЄ-ПРЯНИХ СУМІШЕЙ**

Одним із ключових напрямів роботи є створення продукту, збалансованого за жирнокислотним складом та збагаченого біологічно активними речовинами, які проявляють одночасно антиоксидантну та антибіотичну властивість, приємним за смако-ароматичними властивостями та з подовженим терміном зберігання.

Експериментально підтверджено показники якості дослідних зразків олій, досліджено жирно-кислотний склад хроматографічним методом. Розроблено купаж олій за співвідношенням ПНЖК та МНЖК та сенсорним аналізом із складом. Досліджено хімічний склад прянощів, а саме вміст каротиноїдів, ефірних олій та поліфенольних сполук. Обрано композицію прянощів. Розроблено спосіб одержання оліє-пряної суміші методом вакуумного екстрагування.

Ключові слова: олії; прянощі, купаж; композиція; хроматографія; екстрагування; біологічна цінність.

Рис.: 4. Табл.: 14. Бібл.: 17.

Актуальність теми дослідження. Оліє-пряні суміші мають потенціал для створення нових функціональних харчових продуктів із покращеними властивостями, такими як антиоксидантна активність, антибактеріальна дія, підвищена стійкість до окиснення, збалансованість за жирнокислотним складом і т. ін. Це особливо важливо в контексті здорового харчування та популяризації природних інгредієнтів. Такі суміші можуть використовуватися як добавки до різних страв, соусів, десертів та інших продуктів. Розробка нових технологій отримання таких сумішей дозволяє розширити асортимент готових продуктів на ринку.

Постановка проблеми. Одним із сучасних напрямків для підвищення якості олійно-жирової продукції є створення композицій олій, які оптимізовані за жирнокислотним складом. Такі композиції олій розробляються з метою відповідати вимогам та рекомендаціям дієтологів щодо складу ідеального жиру [1, с. 210-212].

За останні десятиліття стала актуальною проблема безпеки харчової продукції, пов'язана з утворенням токсичних речовин під час окисних процесів в олійно-жировій продукції. Для запобігання або сповільнення цих процесів використовують антиоксиданти, переважно природного походження. Рослинні екстракти прянощів є потужним джерелом захисту, оскільки містять в собі природні антиоксиданти [2, с. 213].

Протягом останніх 20 років значна увага світової науки зосереджена на дослідженнях олійної екстракції природних джерел антиоксидантів [3, с. 9]. Потенціал пряних олійних екстрактів досить високий, оскільки рослинні олії здатні вибірково екстрагувати БАР ліпофільної природи, які проявляють не тільки антиоксидантний захист, а й потужну оздоровчу дію. Таким чином, розробка композицій олій з оптимізованим складом, а також використання природних пряних олійних екстрактів як антиоксидантів, має велике значення для покращення якості олійно-жирової продукції та забезпечення безпеки харчових продуктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наявної науково-технічної та патентної інформації показав, що розробка фізико-хімічних і технологічних основ отримання змішаних рафінованих і нерафінованих рослинних олій з оптимальним або поліпшеним складом жирних кислот є актуальною [4, с. 64-67; 5, с. 93-97; 6, с.1-3; 7, с. 106; 8, с. 123-124; 9, с. 224-226].

Для приготування олійно-пряних сумішей використовують гарячу екстракцію мілко подрібненого матеріалу з частковим його підігріванням за температур 80-90 °С з подальшим перемішуванням і настоюванням [9, с. 226-231].

Проводяться дослідження холодної екстракції за якою холодною олійною сумішшю обробляється підігрітий матеріал. Це дозволить подовжити термін зберігання продукту [10, с. 96-101]. Поряд зі згаданими вище традиційними методами на сьогодні з метою скорочення тривалості процесу, зменшення витрати екстрагента та підвищення якості кінцевого продукту в нашій країні та за кордоном набувають поширення інноваційні методи екстрагування, включаючи ультразвукову та мікрохвильову екстракцію [11, с. 813–835], екстрагування в перегрітій рідині під високим тиском [12, с. 211–219], та інші, які наведені у великій кількості наукових публікацій. Ґрунтовний огляд сучасних інноваційних методів екстрагування міститься в роботі [13, с. 58-196, 231-275].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що спосіб виробництва пряної салатної олії включає попереднє підігрівання купажу олії з прянощами, при цьому відбувається тривалий контакт олії з повітрям, що може призвести до її швидкого окиснення.

Метою статті є створення купажованої салатної олії з прянощами способом вакуумного екстрагування, яка б була збалансована за жирнокислотним складом, мала високі антиоксидантні властивості, приємна за смако-ароматичними властивостями та з подовженим терміном зберігання.

Виклад основного матеріалу. Для створення купажу було обрано такі олії: високоолеїнова соняшникова олія першого холодного віджиму торгової марки «АВІС» (СоняшВО), олія кунжутна рафінована ТОВ «Ароза» (КунжО), олії рижю першого холодного віджиму компанії ООО «Біо Еспрі, Україна» (РижО).

У табл. 1 і 2 надано органолептичні, фізико-хімічні показники дослідних зразків олій.

Таблиця 1 – Органолептичні показники дослідних зразків олій

Найменування показника	(СоняшВО)	(КунжО)	(РижО)
Прозорість	Прозора, без сторонніх домішок	висока ступінь прозорості без будь-яких видимих домішок або осаду	Прозора, без осаду
Смак, запах	притаманний олії соняшниковій без стороннього присмаку та гіркоти	Смак та запах нейтральний із легкою горіховою ноткою	Смак нейтральний з легкими нотками солодкості. Запах приємний і легкий з ніжними трав'яними нотками
Колір	Світло-жовтий	Світло-жовтий	Янтарно-жовтий

Таблиця 2 – Фізико-хімічні показники дослідних зразків олій

Найменування олій	Кислотне число, мг КОН / г	Пероксидне число, 1/2 О ммоль/кг	Йодне число, % I ₂	Відносна густина, г/см ³
(СоняшВО)	0,3±0,01	1,1±0,05	125±6,25	0,920±0,02
(КунжО)	0,1±0,01	1,6±0,08	112±5,60	0,925 ±0,02
(РижО)	0,7±0,03	1,6±0,08	141±7,05	0,915±0,02

Вивчення жирнокислотного складу (ЖКС) дослідних олій здійснювали газохроматографічним методом на газовому хроматографі Хроматек-Кристал 5000 з використанням колонки НР-88 100m*0.25mm*0.20mm. У табл. 3 наведено результати досліджень ЖКС обраних зразків олій.

Таблиця 3 – Результати аналізу ЖКС дослідних зразків олій

Жирні кислоти	Вміст, %		
	(СоняшВО)	(КунжО)	(РижО)
1	2	3	4
C16:0 Пальмітинова	5,09	9,95	5,83
C18:0 Стеаринова	3,01	4,94	2,69
C18:1 Оліїнова	77,91	39,94	19,83
C18:2 Лінолева	12,04	41,37	22,82
C18:3 Ліноленова	0,27	0,36	31,47
C20:0 Арахінова	0,22	0,58	1,09

Закінчення табл. 3

1	2	3	4
C20:1 Ейкозанова	-	0,26	9,92
C20:2Ейкозадієнова	-	-	1,15
C20:5Ейкозопентанова	-	-	0,64
C22:0 Бегенова	1,04	0,16	0,43
C22:1 Ерукова	-	-	2,61
C22:2 Докозадієнова	-	0,13	0,20

Склад олій за вмістом суми жирних кислот, зокрема поліненасичених жирних (ПНЖК), мононенасичених (МНЖ), насичених НЖК наведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Склад олій за вмістом суми жирних кислот

Назва олії	ΣНЖК	ΣМНЖК	ΣПНЖК
Високоолеїнова соняшникова олія першого холодного віджиму	9,36	77,91	12,31
Олія рижію першого холодного віджиму	8,95	22,54	67,29
Олія кунжутна рафінована	15,05	39,94	42,70

За даними жирнокислотного складу дослідних олій та формули матеріального балансу автоматично опрацьовано 64 варіанти модельних сумішей(МС)- купаж олій за встановленим складом жирних кислот(ЖК). За рекомендованими співвідношеннями есенціальних ЖК обрано 4 варіанта модельної суміші (МС), найбільш наближених до формули ідеального жиру:

МС № 1 – 50 % СоняшВО, 30 % РижО, 20 % КунжО;

МС № 2 – 25 % СоняшВО, 50 % РижО, 25 % КунжО;

МС № 3 – 40 % СоняшВО, 40 % РижО та 20 % КунжО;

МС № 4 – 60 % СоняшВО, 30 % РижО та 10 % КунжО.

Для обраних комбінацій проводились розрахунки жирокислотного складу з урахуванням обраних співвідношень олій в їх складі. Розрахунки проведено за допомогою розробленої методики на основі лінійного програмування в пакеті програм MatCad [15]. Розрахунок вмісту жирних компонентів в обраних МС наведено в табл. 5.

Таблиця 5 – Розрахунок вмісту жирних компонентів в обраних МС

	МС № 1- 50 % СоняшВО, 30 % РижО, 20% КунжО 2,5:1,5:1	МС № 2 – 25 % СоняшВО, 50 % РижО, 25 % КунжО 1:2:1	МС № 3 – 40 % СоняшВО, 40 % РижО та 20 % КунжО 2:2:1	МС № 4 – 60 % СоняшВО, 30 % РижО та 10 % КунжО 1:1,5:2,5
ΣНЖК	10,37	10,57	10,33	10,85
ΣМНЖК	53,70	40,73	48,15	38,83
ΣПНЖК	34,88	47,39	40,37	48,91

Співвідношення жирних кислот за рекомендованими показниками біологічної ефективності наведено в табл. 6-9.

За рекомендаціями дієтологів відповідно формулі ідеального жиру, зокрема: ΣПНЖК:ΣНЖК – 1:3; ΣПНЖК:ΣМНЖК – 1:6; ΣНЖК:ΣМНЖК – 1:2 [16; 17].

МС № 1 – 50 % СоняшВО, 30 % РижО, 20 % КунжО (табл. 6).

Таблиця 6 – Співвідношення жирних кислот за рекомендованими показниками біологічної ефективності МС № 1

Контроль(за формулою ідеального жиру)	Результат
	ΣПНЖК:ΣНЖК
1:3	34,88 : 10,37 = 3,3:1
	ΣПНЖК:ΣМНЖК
1:6	34,88: 53,70 = 1:1,5
	ΣНЖК:ΣМНЖК
1:2	10,32: 53,70 = 1:5

МС № 2 – 25 % СоняшВО, 50 % РижО, 25 % КунжО (табл. 7).

Таблиця 7 – Співвідношення жирних кислот за рекомендованими показниками біологічної ефективності МС № 2

Контроль(за формулою ідеального жиру)	Обраний варіант суміші
	$\Sigma\text{ПНЖК}:\Sigma\text{НЖК}$
1:3	47,39:10,57 = 4,4:1
	$\Sigma\text{ПНЖК}:\Sigma\text{МНЖК}$
1:6	47,39:40,73 = 1,2 :1
	$\Sigma\text{НЖК}:\Sigma\text{МНЖК}$
1:2	10,57:40,73= 1:3,8

МС № 3 – 40 % СоняшВО, 40 % РижО та 20 % КунжО (табл. 8).

Таблиця 8 – Співвідношення жирних кислот за рекомендованими показниками біологічної ефективності МС № 1

Контроль(за формулою ідеального жиру)	Обраний варіант суміші
	$\Sigma\text{ПНЖК}:\Sigma\text{НЖК}$
1:3	40,37: 10,33 = 3,9:1
	$\Sigma\text{ПНЖК}:\Sigma\text{МНЖК}$
1:6	40,37: 48,15= 1:1,2
	$\Sigma\text{НЖК}:\Sigma\text{МНЖК}$
1:2	10,33: 48,15= 1:4,7

МС № 4 – 60 % СоняшВО, 30% РижО та 10%- кунжутної олії табл.9

Таблиця 9 – Співвідношення жирних кислот за рекомендованими показниками біологічної ефективності МС № 1

Контроль(за формулою ідеального жиру)	Обраний варіант суміші
	$\Sigma\text{ПНЖК}:\Sigma\text{НЖК}$
1:3	48,91 : 10,85 = 4,5:1
	$\Sigma\text{ПНЖК}:\Sigma\text{МНЖК}$
1:6	48,91: 38,83= 1,2:1
	$\Sigma\text{НЖК}:\Sigma\text{МНЖК}$
1:2	10,85: 38,83= 1:3,6

Проведений розрахунок зразків МС та порівняння результатів за формулою ідеального жиру показав, що зразки МС № 2, 3 та 4 найближчі до формули ідеального жиру. Для подальших досліджень було обрано два найкращих зразки МС, це МС № 2 і МС № 4.

Остаточний варіант купажів дослідних олій здійснювали за вмістом вітаміну Е. Результати наведені в табл. 10.

Таблиця 10 – Вміст вітаміну Е в модельних зразках купажу

МС	Вміст віт. Е
№ 2	51,63 ± 5,61
№ 4	50,45 ± 3,12

Отже, найкращий за вмістом вітаміну Е є зразок МС № 2.

Результати сенсорного оцінювання зразків купажу олій № 2 та № 4 проведений за 5-бальним оцінюванням засвідчили, що МС № 2 з композицією купажу олій (25±2) % соняшникової олії, (50±2) % олії рижю та (25±2) % кунжутної олії (1:2:1); має найбільшу загальну кількість дегустаційних балів, приємний смак та запах.

Базовим компонентом купажованої олії обрано олію рижю першого холодного віджиму, оскільки вона має в своєму складі значну кількість ліноленової кислоти ω -3. Це дало можливість отримати збалансований за складом ПНЖК ω -3 та ω -6 груп купаж.

Обраний купаж олій (зразок МС №2) досліджували за жирнокислотним складом рис. 1

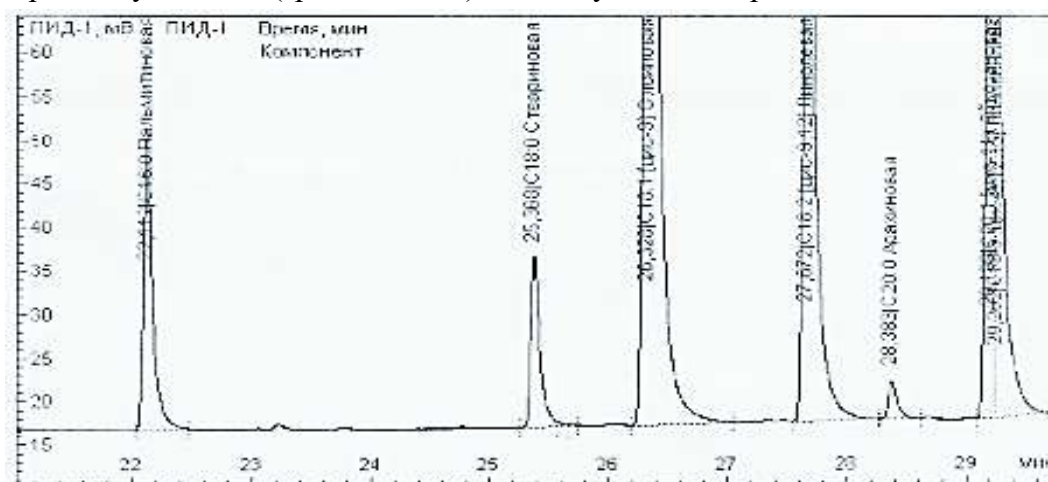


Рис. 1. Хроматограма ЖКС купажованої олії (зразок МС № 2)

Компонентний склад купажу олії наведено в табл. 11.

Таблиця 11 – Компонентний склад купажованої олії

№ п/п	Час, хв	Жирна кислота	Вміст, %
1	22.112	C16:0 Пальмітинова	6.494
2	25.368	C18:0 Стеаринова	3.806
3	26.328	C18:1 [цис-9] Олеїнова	43.935
4	27.672	C18:2 [цис-9,12] Лінолева	22.315
5	28.383	C20:0 Арахінова	0.856
6	29.199	C20:1 (цис-11) Ейкозанова	9.675
7	29.262	C18:3 [цис-9,12,15] Ліноленова	10.541

За результатами досліджень, жирнокислотний склад створеної купажованої олії містить в своєму складі 7 жирних кислот. З них ненасичених жирних кислот: олеїнової – 43,9 %; лінолевої – 22,3 %; ліноленової кислот – 10,5 %, тобто сумарний вміст ненасичених жирних кислот у купажованій олії – $(76,7 \pm 2,0)$ %, з них поліненасичених – $(32,8 \pm 1,5)$ % при співвідношенні ω -6: ω -3 = 2:1, що відповідає формулі ідеального жиру.

Купажована олія використовується для вакуумної екстракції комбінації прянощів.

Зразки обраних прянощів, а саме, насіння гвоздики, насіння коріандру, суцвіття укропу, листя шавлії лікарської, досліджували на вміст каротиноїдів, ефірних олій та поліфенольних сполук.

Результати визначення вмісту поліфенольних сполук, каротиноїдів, ефірної олії у зразках прянощів наведено в табл. 12.

Таблиця 12 – Вміст БАР, % зразків прянощів

Прянощі	Поліфенольні сполуки	Каротиноїди	Ефірна олія
Насіння гвоздики	$6,32 \pm 0,16$	$1,5 \pm 0,018$	$18,1 \pm 0,038$
Насіння коріандру	$1,8 \pm 0,13$	$0,8 \pm 0,023$	$1,6 \pm 0,035$
Суцвіття укропу	$18 \pm 0,08$	$12 \pm 0,002$	$4,0 \pm 0,003$
Шавлія	$5,2 \pm 0,07$	$0,6 \pm 0,002$	$2,3 \pm 0,003$

Зі зразків обраних прянощів найбільша кількість ефірної олій міститься у насінні гвоздиці, що становить 18,1 %, вміст каротиноїдів та поліфенольних сполук найвищий у суцвіттях укропу, що становить 12 та 18 % відповідно.

Науковий пошук проводили за участі модельних композицій (МК), які створювалися відповідно до поставлених завдань. До складу МК входило чотири прянощі – листя шавлії лікарської, насіння гвоздики, насіння коріандру та сухе суцвіття укропу у зразках різних комбінаціях.

Для обрання остаточного варіанту композиції прянощів для оліє-пряної суміші використовували визначений експериментально вміст БАР у складі пряності. Відповідно завданню проводили математичні розрахунки за матеріального балансу за кількістю поліфенолів, каротиноїдів та ефірних олій у запропонованих модельних композиціях (МК). Зокрема:

МК № 1 – 25 % шавлії, 25 % насіння гвоздики, 25 % насіння коріандру та 25% суцвіття укропу (1:1:1:1);

МК № 2 – 17 % шавлії, 17 % насіння гвоздики, 33 % насіння коріандру та 33% суцвіття укропу (1:1:2:2);

МК № 3 – 33 % шавлії, 33 % насіння гвоздики, 17 % насіння коріандру та 17% суцвіття укропу (2:2:1:1);

МК № 4 – 8,5 % шавлії, 36 % насіння гвоздики, 36 % насіння коріандру та 9,5 % суцвіття укропу (1:2:2:0,5).

Розрахунок вмісту БАР в МК № 1

Σ поліфенолів = $((5,2 \cdot 25\%) + (6,32 \cdot 25\%) + (1,8 \cdot 25\%) + (18 \cdot 25\%)) / 100\% = 7,83\%$;

Σ ефірних олій = $((2,3 \cdot 25\%) + (18,1 \cdot 25\%) + (1,6 \cdot 25\%) + (4,0 \cdot 25\%)) / 100\% = 6,5\%$;

Σ каротиноїдів = $((0,6 \cdot 25\%) + (1,5 \cdot 25\%) + (0,8 \cdot 25\%) + (12 \cdot 25\%)) / 100\% = 4,35\%$.

Розрахунки вмісту БАР в МК № 2,3,4 здійснювали за складеною схемою комп'ютерних розрахунків. Зразки купажу прянощів наведено у відсоткових співвідношеннях у табл. 13.

Таблиця 13 – Зразки купажу прянощів

Назва прянощів	Номера зразків купажу			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Шавлія	25	17	33	18
Насіння гвоздики	25	17	33	36
Насіння коріандру	25	33	17	36
Суцвіття укропу	25	33	17	9,5

Отримані дані вмісту БАР систематизувалися, опрацьовувалися та оформлювалися у вигляді порівняльних діаграм –

- поліфенольних сполук (рис. 2);
- ефірних олій (рис. 3);
- каротиноїдів (рис. 4).

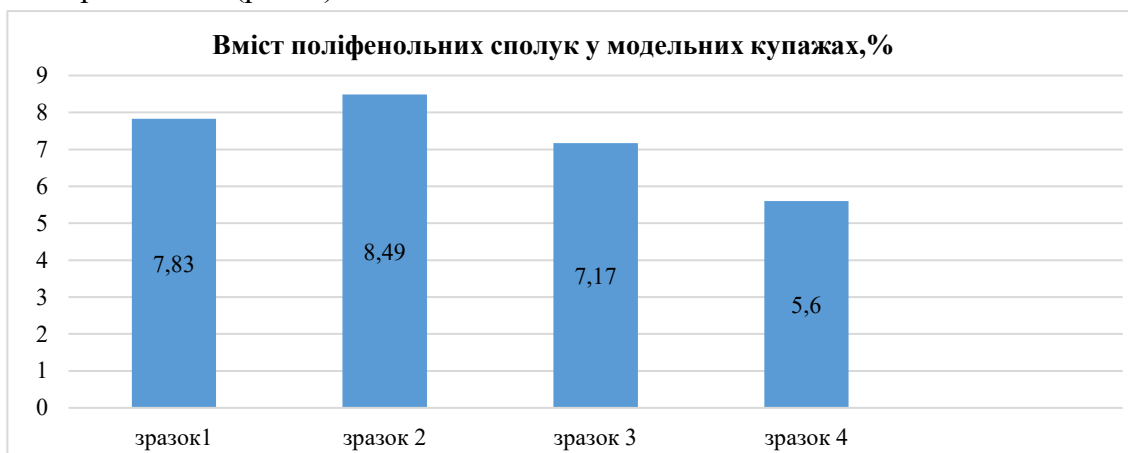


Рис. 2. Порівняльний аналіз вмісту поліфенольних сполук у модельних композиціях прянощів

За даними рис. 2. можна спостерігати, що МК № 1 і 2 містять найбільшу кількість поліфенольних сполук це 7,83 і 8,49 % відповідно. МК № 4 містить найменшу кількість це 5,60 %.

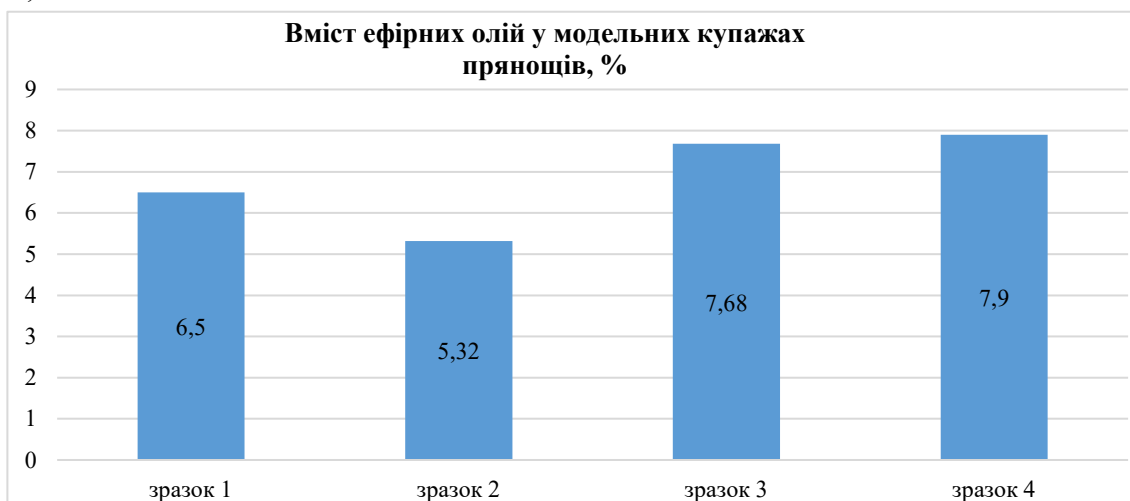


Рис. 3. Порівняльний аналіз вмісту ефірних олій у модельних композиціях прянощів

У результаті досліджень найбільший вміст ефірних олій знаходиться у МК № 4 (7,20 %) і МК №3(6,52 %), і найменший вміст відповідно у МК № 2 (5,32 %).

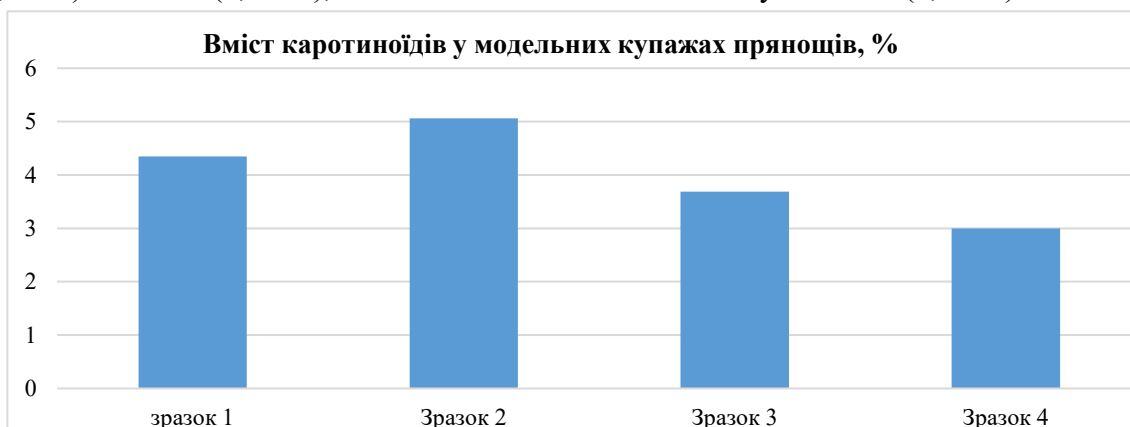


Рис. 4. Порівняльний аналіз вмісту каротиноїдів у модельних композиціях прянощів

За даними рис. 4 можна спостерігати, що найбільший вміст каротиноїдів знайдено у МК № 2 (5,06 %), а найменший відповідно у МК № 4 (3,0 %).

Згідно з проведеними розрахунками з чотирьох зразків найкращими виявилися МК № 2, 3, 4. У МК № 2 визначено найбільший вміст поліфенолів та каротиноїдів, у МК № 3 – високий вміст поліфенолів і ефірних масел, у МК № 4 – високий вміст ефірних масел, але низький вміст каротиноїдів.

Обрані за вмістом БАР МК оцінювалися дискрипторно-профільним аналізом. За результатами органолептичної оцінки, найкращим виявився зразок № 3.

Загалом, композиція прянощів №3 з шавлією, насінням гвоздики, насінням коріандрю та суцвіттям укропу має багатий аромат з пряними, трав'яними, цитрусовими та легкими солодкими нотками. У складі цієї композиції міститься: (33±0,5) % шавлії, (33±0,5) % насіння гвоздики, (17±0,5) % насіння коріандрю, (17±0,5) % суцвіття укропу. Саме цю композицію обрано для використання в технології оліє-пряної суміші.

Ця композиція прянощів містить ефірну олію, поліфенольні сполуки та жиророзчинні вітаміни, які одночасно проявляють антиоксидантну та антибіотичну активність.

Оліє-пряну суміш одержують у такий спосіб:

Рослинні олії – рафіновану кунжутну олію, олію рижю першого холодного віджиму та олію високоолеїнову соняшникову першого віджиму у вивільняють від тари, відміряють відповідну пропорцію кожного виду олії у співвідношенні 1:2:1, заливають у накопичувальну ємність і ретельно перемішують. Одночасно готують купаж прянощів з шавлії, гвоздики, коріандру і насіння кропу. Зважують певну кількість насіння коріандру, гвоздики, кропу та листя шавлії у співвідношенні 1:1:0,5:0,5, подрібнюють до одержання розміру часток 1-2 мм. Потім вводять рецептурну суміш у таких співвідношеннях - купаж рослинних олій 92,0-95,0 мас.%, купаж прянощів 5,0...8,0 мас.% у накопичувальну ємність до олії з перемішуванням лопатевим змішувачем. Далі олію з накопичувальної ємності направляють на вакуумне екстрагування композиції прянощів купажем олій при кімнатній температурі, вакуумне екстрагування проводять у два етапи, тривалість кожного етапу 30-45 с. Потім проводять фільтрування, фасування та подальше зберігання в холодильній камері за постійної температури без потрапляння світла, а частина йде одразу на використання та реалізацію.

Отриманий продукт має органолептичні показники, що наведені у табл. 14. Крім цього проводили фізико-хімічні, мікробіологічні показники продукту, та жирнокислотний склад продукту.

Таблиця 14 – Органолептичні показники оліє-пряної суміші

Показник	Характеристика
Смак	Ніжний, пряний, відповідає виду сировини, що використовується
Запах	Насичений пряний і багатогранний з невеличкою терпкуватістю, свіжістю та легкими трав'яними ароматними нотками
Колір	Янтарно-жовтий
Консистенція	Однорідна, рідка
Зовнішній вигляд	Однорідна маса з вкрапленням прянощів

Оліє-пряна суміш являє собою харчовий продукт підвищеної біологічної цінності, має збалансований склад ПНЖК, стабільна до окиснення за рахунок природних антиоксидантів.

Розроблений продукт можна рекомендувати для людей з підвищеним рівнем холестерину в крові, для запобігання серцево-судинним захворюванням, розвитку атеросклерозу. Споживання розробленої оліє-пряної суміші рекомендовано використовувати для різних верст населення у профілактичних цілях.

Оліє-пряна суміш отримана шляхом вакуумного екстрагування має високий термін зберігання, оскільки не контактує з киснем повітря.

Оптимальний термін її зберігання у пляшках з темного скла у затемненому приміщенні за температури (22±2) °С та відносній вологості повітря 65-75 % становить 11,7 місяців.

Висновки. Розроблено купаж олій, який збалансований за жирнокислотним складом та відповідає формулі ідеального жиру. Сумарний вміст ненасичених жирних кислот у купажованій олії – (76,7±2,0) %, з них поліненасичених – (32,8±1,5) % при співвідношенні ω -6: ω -3 = 2:1.

Обрано композицію прянощів, яка має багатогранний, пряний з елементами гірчинки та свіжості смак та аромат.

Одержано оліє-пряну суміш способом вакуумного екстрагування. Спосіб вакуумної екстракції новий та цікавий, оскільки він не базується на стандартних методах довготривалої витримки або піддаванню продуктів температурі, тим самим скорочуючи їх термін придатності. Даний спосіб значно пришвидшує одержання оліє-пряної суміші в масштабах ресторанного виробництва.

Список використаних джерел

1. Матвеева Т. В. Купажі олій – джерело поліненасичених жирних кислот / Т. В. Матвеева, З. П. Федякіна // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій Міністерства освіти і науки України. – Одеса, 2014. – Вип. 46, Т. 1. – С. 210-213.
2. Madhavi D. I. Food antioxidants: technological, toxicological and health perspectives food science and technology / D. I. Madhavi. – New York : CRC Press, 1996. – 664 p.
3. Бальбін, С. Характеристика ліпідної фракції прянощів сімейства Аріаса: вплив видів та методу вилучення / С. Бальбіно // Журнал прикладних досліджень лікарських і ароматичних рослин. – 2021. – № 25. – С. 256.
4. Матвеева Т. В. Купажовані олії – продукти здорового харчування / Т.В. Матвеева // Conduct of modern science : Materials of the X International scientific and practical conference. – Sheffield: Science and education LTD, 2014. – Vol. 22. – С. 64-68.
5. Топчій О. А. Характеристика вітамінізованих купажів рослинних олій / О. А. Топчій, Є. О. Котляр, І. І. Кишенько // Харчова наука та технологія. – 2014. – № 8(6). – С. 93-97.
6. Патент 103412 Україна, МПК (2013.01) А23 D 9/02 С11 В 5/00. Спосіб виробництва фіто-олійного напівфабрикату / Л. Ю. Арсеньєва; В. Ф. Доценко, А. В. Гавриш; Г. М. Лявинець; заявник і власник Нац. ун-т харч. технологій. № а201203487; заявл. 23.03.2012; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 19. – С. 3.
7. Семенюк К. М. Особливості впливу жирнокислотного складу олій на фізико-хімічні показники якості купажів рослинних олій / К. М. Семенюк, О. А. Штонда // Вісник ЛТЕУ. Технічні науки. – 2021. – № 25. – С. 106-110.
8. Покотило О. Купаж олій з підвищеним вмістом омега-3 ПНЖК / Р. Жебрацький, О. Покотило // Стан і перспективи харчової науки та промисловості : тези доп. IV Міжнар. наук.-тех. конф (Тернопіль, 11-12 жовтня 2017 р.). – Тернопіль : ТНТУ, 2017. – С. 123-125.
9. Дослідження стабільності рослинних олій та їх купажів під час обсмажування картопляних чіпсів / О. А. Коваленко, В. М. Ковбаса, І. Г. Радзівська, Б. В. Гребень, В. Ю. Нагорний // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. – 2016. – № 1. – С. 223-231.
10. Санчес-Камарго А. П. Нові методи добування біоактивних сполук із трав і спецій / А. П. Санчес-Камарго // Трави, прянощі та лікарські рослини: переробка, користь для здоров'я та безпека. – 2020. – С. 95-128.
11. Chemat F. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction / F. Chemat, M. K. Khan // Ultrason Sonochem. – 2011. – № 18. – P. 813-835.
12. Benthin B. Pressurized liquid extraction of medicinal plants / B. Benthin, H. Danz, M. Hamburger // J Chromatogr A. – 1999. – № 837(1/2). – P. 211-219.
13. Roctagno M. Natural product extraction: Principles and applications / M. Roctagno, J. Prado // Royal Society of Chemistry. – Cambridge, UK. 2013. – P. 500.
14. Дец Н. О. Технологічні основи виробництва салатної олії для м'ясних страв / Н. О. Дец, Л. О. Ланженко, А. О. Попик // Збірник наукових праць молодих вчених, аспірантів та студентів. – Одеса : Одеська національна академія харчових технологій, 2018. – С. 45-46.
15. Матвеева Т. В. Математичне обґрунтування складання сумішей олій / Т. В. Матвеева, П. Ф. Петік, З. П. Федякіна // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – № 3/6 (63). – С. 26-28.
16. Смоляр В. І. Концепція ідеального жирового харчування / В. І. Смоляр // Проблеми харчування. – 2006. – № 4. – С. 14-24
17. Іванов С. В. Технологія купажованих жирів збалансованого жирнокислотного складу : монографія / С. В. Іванов, Л. В. Пешук, І. Г. Радзівська. – Київ, 2013. – 210 с.

References

1. Matvieieva, T.V., & Fediakina, Z.P. (2014). Kupazhi olii – dzherelo polinenasychenykh zhyrnykh kyslot [Blends of oils - a source of polyunsaturated fatty acids]. *Naukovi pratsi Odeskoi natsionalnoi akademii kharchovykh tekhnolohii Ministerstva osvity i nauky Ukrainy – Scientific works of the Odessa National Academy of Food Technologies of the Ministry of Education and Science of Ukraine*, 46, 210–213.

2. Madhavi, D.I. (1996). *Food antioxidants: technological, toxicological and health perspectives food science and technology*. CRC Press.
3. Balbino, Sandra et al. (2021). Kharakterystyka lipidnoi fraktsii prianozhchiv simeistva Apiaceae: vplyv vydiv ta metodu vyluchennia [Characterization of the lipid fraction of spices of the Apiacea family: influence of species and extraction method]. *Zhurnal prykladnykh doslidzhen likarskykh i aromatychnykh roslyn – Journal of Applied Research of Medicinal and Aromatic Plants*, (25), 256.
4. Matvieieva, T.V. (2014). Kupazhovani olii – produkti zdorovoho kharchuvannia [Blended oils – healthy food products]. *Materials of the X International scientific and practical conference «Conduct of modern science – 2014»*, 22, 64–68. Sheffield: Science and education LTD.
5. Topchii, O.A., Kotliar, Y.O., & Kyshenko, I.I. (2014). Kharakterystyka vitaminizovanykh kupazhiv roslynnykh olii [Topchii Characteristics of vitaminized blends of vegetable oils]. *Kharchova nauka ta tekhnolohiia – Food science and technology*, 8(6), 93-97.
6. Arsenieva, L.Iu., Dotsenko, V.F., Havrysh, A.V., & Liavynets, H.M. (2012). *Sposib vyrobnytstva fitooliinoho napivfabrykatu [The method of production of phyto-oil semi-finished products]*. Pat. 103412 Ukraina, MPK (2013.01) A23 D 9/02 S11 V 5/00.
7. Semeniuk, K.M., & Shtonda, O.A. (2021). Osoblyvosti vplyvu zhyrnokyslotnoho skladu olii na fizyko-khimichni pokaznyky yakosti kupazhiv roslynnykh olii [Peculiarities of the influence of the fatty acid composition of oils on the physico-chemical quality indicators of blends of vegetable oils]. *Visnyk LTEU. Tekhnichni nauky – Visnyk LTEU. Technical sciences*, (25), 106-110.
8. Zhebratskyi, R., & Pokotylo, O. (2017). Kupazh olii z pidvyshchenym vmistom omega-3 PNZhK [Mixture of oils with an increased content of omega-3 PUFA]. *Tezy dopovidei IV Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii „Stan i perspektyvy kharchovoi nauky ta promyslovosti” – State and prospects of food science and industry: theses add. IV International science and technology conference* (pp. 123-125).
9. Kovalenko, O.A., Kovbasa, V.M., Radzievska, I.G., Greben, B.V., & Nagorny, V.Yu. (2016). Doslidzhenia stabilnosti roslynnykh olii ta yikh kupazhiv pid chas obsmazhuvannia kartoplianykh chipsiv [Research on the stability of vegetable oils and their blends during frying of potato chips]. *Prohresyvnii tekhnika ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv restorannoho hospodarstva i torhivli – Progressive equipment and technologies of food production, restaurant industry and trade*, (1), 223-231.
10. Sanchez-Camargo, Andrea P. et al. (2020). Novi metody dobuyannia bioaktyvnykh spoluk iz trav i spetsii [New methods for obtaining bioactive herbs from herbs and spices]. *Travy, prianozhchi ta likarski roslyny: pererobka, koryst dlia zdorovia ta bezpeka – Herbs, spices and medicinal herbs: processing, measles for health and safety* (pp. 95-128).
11. Chemat, F., & Khan, M.K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrason Sonochem*, (18), 813–835.
12. Benthin, V., Danz, H., & Hamburger, M. (1999). Pressurized liquid extraction of medicinal plants. *J Chromatogr. A.*, 837(1/2), 211–219.
13. Roctagno, M., & Prado, J. (2013). Natural product extraction: Principles and applications. *Royal Society of Chemistry*, Cambridge, UK.
14. Dets, N.O., Lanzhenko, L.O., & Popyk, A.O. (2018). Tekhnolohichni osnovy vyrobnytstva salatnoi olii dlia miasnykh strav [Technological basis of production of salad oil for meat dishes]. *Zbirnyk naukovykh prats molodykh vchenykh, aspirantiv ta studentiv – Collection of scientific works of young scientists, postgraduates and students* (pp. 45-46).
15. Matvieieva, T.V., Petik, P.F., & Fediakina, Z.P. (2013). Matematyчне obgruntuvannia skladannia sumishei olii [Mathematical justification of compounding oil mixtures]. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii – East European Journal of Advanced Technologies*, 3/6(63), 26–28.
16. Smolyar, V.I. (2006). Kontsepsiia idealnoho zhyrovoho kharchuvannia [The concept of ideal fat nutrition]. *Problemy kharchuvannia – Problems of nutrition*, (4), 14-24.
17. Ivanov, S.V., Peshuk, L.V., & Radzievska, I.G. (2013). *Tekhnolohiia kupazhovanykh zhyriv zbalansovanoho zhyrnokyslotnoho skladu [Technology of blended fats of balanced fatty acid composition]*.

Отримано 30.06.23

Alyona Ocheretna¹, Natalia Frolova²

¹PhD Student of the Department of Technology of Restaurant and Ayurvedic Products
National University of Food Technologies (Kyiv, Ukraine)

E-mail: aol1981@ukr.net, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9698-091X>

²Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology of Restaurant and Ayurvedic Products
National University of Food Technologies (Kyiv, Ukraine)

E-mail: frolovan809@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9661-1540>

TECHNOLOGY OF OBTAINING OIL-SPICE MIXTURES

One of the key areas of work is the creation of a product with a balanced fatty acid composition and enriched with biologically active substances that exhibit antioxidant and antibiotic properties at the same time, with a pleasant taste and aromatic properties and with an extended shelf life.

The quality indicators of experimental oil samples were experimentally confirmed, and their fatty acid composition was investigated by the chromatographic method.

A blend of oils was developed according to the ratio of PUFA and MUFA: first cold-pressed high-oleic sunflower oil 25%, first cold-pressed rye oil 50%, refined sesame oil 25%. It was established that the mixture of oils contains fatty acids, in particular oleic - 43.9%; linoleic – 22.3%; linolenic - 10.5%. The total content of unsaturated fatty acids is 76.7%, of which 32.8% are polyunsaturated, which made it possible to bring the fatty acid composition of the blend as close as possible to the ideal fat formula and achieve the ratio ω -6: ω -3 = 2:1.

The chemical composition of spices was studied, namely the content of carotenoids, essential oils and polyphenolic compounds. It was found that among the samples of the selected spices, the largest amount of essential oil is contained in clove seeds, which is 18.1%, the content of carotenoids and polyphenolic compounds is the highest in dill inflorescences, which is 12% and 18%, respectively.

A composition of spices was chosen, which includes clove seeds 33%, clary sage 33%, coriander seeds 17% and dill inflorescences 17%. A method of obtaining an oil-spice mixture by the method of vacuum extraction has been developed. It was established that the oil-spice mixture was obtained by vacuum extraction has a long shelf life, as it does not come into contact with air oxygen.

The consumption of the developed oil-spice mixture is recommended to be used for various segments of the population for preventive purposes.

Key words: oils; spices; blending; composition; chromatography; extraction; biological value.

Fig.: 4. Table: 17. References: 17.

РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: 10.25140/2411-5363-2023-2(32)-300-312

UDC 681.5:004.51

Volodymyr Voytenko¹, Björn Olofsson², Maksym Solodchuk³, Yuriy Denisov⁴

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

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

ResearcherID: [F-8698-2014](https://orcid.org/0000-0003-1490-0600). Scopus Author ID: [36167678700](https://orcid.org/0000-0003-1490-0600)

²PhD in Automatic Control, Docent, Senior Lecturer of the Department of Automatic Control Lund University, (Lund, Sweden)

E-mail: bjorn.olofsson@control.lth.se. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6793-7207>. Scopus Author ID: [54793307900](https://orcid.org/0000-0002-6793-7207)

³Head of the Scientific-Research Department

State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification (Cherkasy, Ukraine)

E-mail: rocket15733@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1162-6784>

⁴Doctor of Technical Sciences, Professor, head of the Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics Department Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: den71ltd@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2293-7964>. ResearcherID: [G-1144-2016](https://orcid.org/0000-0003-2293-7964)

COMPONENTS OF A SYSTEM FOR AUTOMATIC DETECTION OF A ZONE OF INTEREST IN IMAGES OBTAINED FROM A UAV

To reduce the load on the UAV operator during long-term search and rescue missions, an on-board automatic system that generates control signals for positioning an additional video camera with a narrow field of view is considered. The requirements for the system of automatic detection of the area of interest are defined. Various methods for detecting objects in images are considered, analyzed and compared. Software and hardware tools are discussed, which are advisable to use in the preparation and conduct of experimental studies.

Keywords: *unmanned aerial vehicle (UAV); image analysis; man-machine system; electric drive; on-board object detector; spot camera control.*

Fig.: 5. Table: 1. References: 22.

Relevance of the research. When performing search and rescue missions, UAVs are a source of important information, most of which is generated by video cameras installed on board. The number of cameras and their spectral ranges of sensitivity are selected depending on the specific task to be solved. The processing of video information itself is a cyclic procedure [1], which consists in searching for objects of interest, their detection, recognition, determination of their characteristics, and preparation of a report.

The processing speed of video information received from a UAV is critically important, since its volume is large in the case of using high-resolution cameras and long flights. Acceleration of the process of analyzing this information is possible either by parallel operation of several operators or by using appropriate automation tools.

Problem statement. Despite significant advances in computerized pattern recognition systems, in some applications, the final decision about the category of the object to be detected, as well as the subsequent actions in the search and rescue mission will remain with an operator. To improve the reliability of the classification of objects, the operator must receive all necessary and sufficient information promptly. To do this, a video camera with a varifocal lens can be placed on the UAV, which allows zooming in on the image part in the area of interest. In this case, the operator must be distracted from the direct control of the UAV and use the control of the video camera, spending precious time on this, as well as on a possible return to the original image.

Analysis of recent research and publications. Another solution [2] relies on an additional camera with a fixed narrow viewing angle (spot camera), which allows a quick overview of the object of interest at a larger scale. However, if this object turned out to be out of the direction of the optical axis of the spot camera, a positioning procedure of that camera will still be required. To reduce the time spent by the operator to perform auxiliary actions, as well as to reduce fatigue, it

has been proposed to install the spot camera on a platform (or on a gimbal [3]) that can provide rotation about two coordinate axes relative to the main (navigation) video camera [2]. The image frame from the main camera can be divided into rectangular sections (zones), while the size of each of them is determined by the area of observation of the spot camera [2, Fig. 3].

An automatic detection system, in case of detecting an object of interest based on the results of the frame analysis, determines the most probable area of the location of the object, and generates control signals for appropriate positioning of the spot camera. This ultimately allows an operator to concentrate on the classification of an object of interest, as well as on making a decision based on the results from the automated system.

Isolation of previously unexplored parts of the general problem. One important specification for image processing systems using UAVs (and the direction of their development) is to have a high degree of autonomy, i.e., a concentration of functions performed directly on-board the vehicle [4]. This reduces the information load on the operator, and also reduces the required communication load between the UAV and the central control system, which expands the flight range, increases noise immunity, and reduces the power consumption of on-board radio-transmitting equipment.

Research objectives. The purpose of this article is to select components for further experimental research. The main tasks to be solved are the specification of the requirements, development of a structure, clarification of the principles and algorithms of the on-board system for automatic detection of an area of interest and positioning of the spot camera based on the results of the analysis of the image from the main video camera of the UAV.

Requirements for the system of automatic detection of the area of interest. To estimate the requirements on the computational time of the system for automatic detection of the area of interest, we use a simplified geometric construction (Fig. 1). The main difference from [2] (Fig. 1) and the corresponding mathematical relations there is that the angle α between the normal to the ground and the direction of the camera is taken into account here.

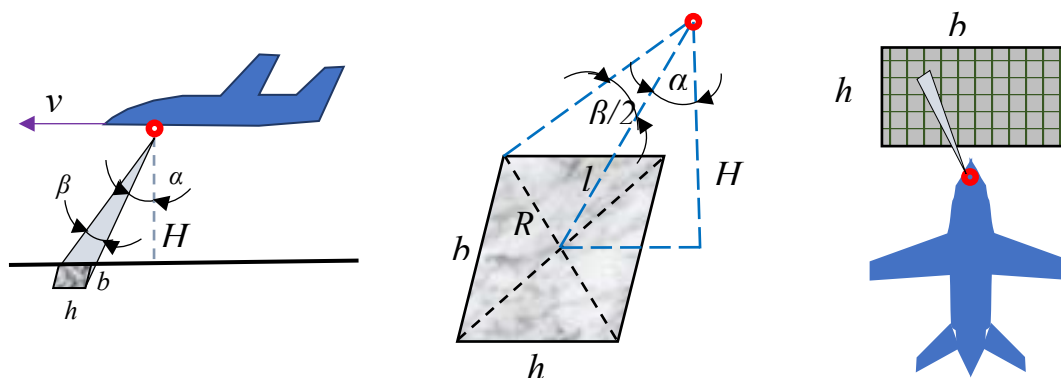


Fig. 1. Geometric parameters of the system

The UAV flies at an altitude H . In this case, the optical axis of the navigation camera lens is tilted at an angle $\alpha = 20...80^\circ$, which gives a visual three-dimensional representation of the object and the terrain [1]. Based on the definitions presented in Fig. 1, it is possible to find the size of the investigated surface in a simplified way (without considering projective distortions) depending on the camera view angle β and the UAV flight height H as follows:

$$R = l \tan \frac{\beta}{2} = H \frac{\tan \frac{\beta}{2}}{\cos \alpha}; \quad R^2 = \frac{b^2 + h^2}{4}; \quad b = K_f h$$

$$h = \frac{2R}{\sqrt{K_f^2 + 1}} = \frac{2H \tan \frac{\beta}{2}}{\cos \alpha \sqrt{K_f^2 + 1}}; \quad b = \frac{2HK_f \tan \frac{\beta}{2}}{\cos \alpha \sqrt{K_f^2 + 1}}$$

In the third expression, $K_f = b/h$ is the image format. On the other hand, the distance s that is covered by the vehicle which is flying at speed v during the time T_r is

$$s = v T_r.$$

Under the condition that $s = h$,

$$T_r = h / v = \frac{2H \tan \frac{\beta}{2}}{v \cos \alpha \sqrt{K_f^2 + 1}}. \tag{1}$$

Let us assume that the viewing angle of the camera is $\beta = 30^\circ$. Moreover, if the UAV is at a height of $H = 100 \text{ m}$ with $\alpha = 58.3^\circ$, the height of the image on the surface is $h = 50 \text{ m}$ (Fig. 1). Under the speed of $v = 72 \text{ km/h}$, the UAV covers a distance of $s = 50 \text{ m}$, i.e., the image is fully updated in $T_r = 2.5 \text{ s}$.

A popular image format provided by video cameras installed on UAVs is HD $n_x \times n_y = 1920 \times 1080$ ($K_f = 16/9$). This implies that the size of one pixel for $H = 100 \text{ m}$ and $\beta = 30^\circ$ is

$$\Delta = h/n_y = 5000/1080 \approx 4.63 \text{ cm}.$$

In this relation, n_x, n_y are the number of pixels along the horizontal and vertical direction, respectively.

Divide the entire image frame into rectangular areas (zones) with an aspect ratio corresponding to the frame format of the video camera. Considering the viewing angles of common video cameras for UAVs [5; 6], it is advisable to use the image scaling factor

$$M = 10 \dots 32.$$

In normal navigation mode, the UAV operator uses video images with a standard frame rate of F_f . The recognition (detection) system has a time interval of T_r as margin, during which the UAV will cover a path equal to the height of the frame on the ground (h , Fig. 1). During this time, the system for automatic detection of the zone of interest must determine the numbers N_x and N_y along both coordinate axes on the captured frame and generate commands for positioning the spot camera. N_x and N_y belong to the range from 1 to M .

Table 1 shows the quantitative parameters of image zoning of the main UAV video camera operating in HD format. The flight altitude is $H = 100 \text{ m}$, the angle of view is $\beta = 30^\circ$, and the tilt angle of the main camera is $\alpha = 58.3^\circ$.

Table – The number and format of split zones of the input image (the angle α is considered)

M	1	2	3	4	5	6	8	10	12	15	30
N_z	1	4	9	16	25	36	64	100	144	225	900
n_h	1920	960	640	480	384	320	240	192	160	128	64
n_v	1080	540	360	270	216	180	135	108	90	72	36
$b, \text{ m}$	88.89	44.44	29.63	22.22	17.78	14.81	11.11	8.89	7.41	5.93	2.96
$h, \text{ m}$	50	25	16.67	12.5	10	8.33	6.25	5	4.17	3.33	1.67
$\Delta, \text{ cm}$	4.63	2.31	1.54	1.16	0.93	0.77	0.58	0.46	0.39	0.31	0.15

The following designations are used in Table:

M – number of image zones along one of the axes (and simultaneously the scaling factor);

N_z – total number of image zones;

n_h – number of pixels in one zone of the image horizontally;

n_v – number of pixels in one zone of the image vertically;

h, b – size of the zone on the ground;

Δ – size of the pixel on the ground (or ground sample distance, GSD).

Fig. 2 makes it possible to estimate the time requirements for the system of automatic determination of the area of interest depending on the tilt angle of the main camera α .

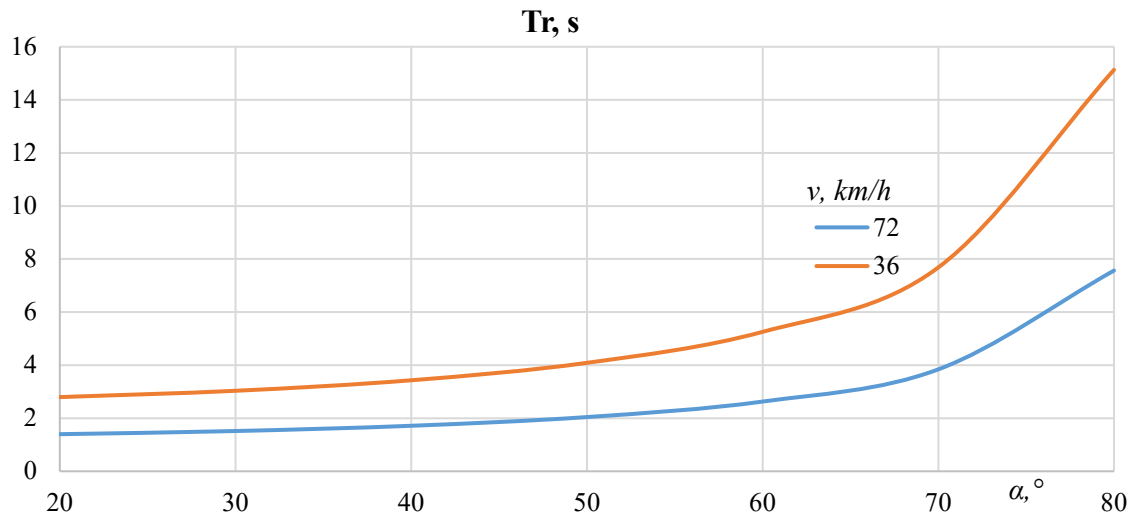


Fig. 2. Dependence of the allowable image processing time on the tilt angle of the UAV main camera ($H = 100$ m and $\beta = 30^\circ$)

In Fig. 3, a three-dimensional plot of the dependence of the image update time with respect to altitude and angle at a fixed UAV flight speed is plotted.

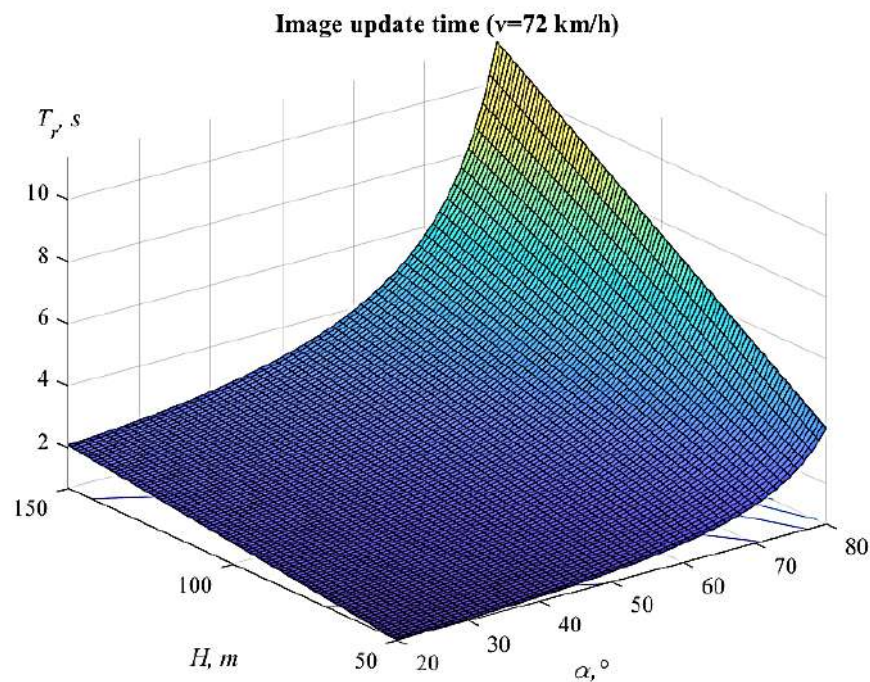


Fig. 3. The dependence of the allowable image processing time on the angle of inclination of the main camera and the flight altitude of the UAV ($v = 72$ km/h and $\beta = 30^\circ$)

From Fig. 2 and Fig. 3, it follows that for realistic ranges of the geometric parameters, the allowable response time of the detection system is in the range of a few seconds. If it is possible to solve the problem of real-time detection of the zone of interest offline (on-board the UAV), this will also help to speed up the analysis of the entire accumulated array of video information by studying it after the mission is completed, which often takes many times more time than it took to complete it [1].

It could be noted that during the flight mission, the UAV commonly maintains the speed, the flight altitude, and the tilt angle of the main navigation camera at a constant level. In addition, changes in these parameters within a certain range can be considered as a result of the information acquired from the on-board sensors. As for the other requirements of the system for automatically determining the area of interest (e.g., energy consumption, dimensions, weight), despite their importance, it makes sense to clarify them in the process of solving the problem of timely detection of the area of interest. In addition, the video recording conditions (light, parallax, etc.) must also be considered at this stage.

Selection of algorithm for the system for automatic detection of the zone of interest. In fact, at this stage, the task is to determine an architecture and algorithm of the system operation that will ensure its deployment and determination of the positioning zone of a narrow-angle video camera in real-time during the UAV mission, while still causing as small computational load as possible. We are consequently faced with the task of detecting patterns in the image.

Selected parts of an image can be described using so-called descriptors. For regions, some of the simplest are [7]: the area which is defined as the number of pixels it contains; the perimeter; the compactness (the ratio of the square of the perimeter to the area); the roundness factor, which is defined as the ratio of the area of a region to the area of a circle (the most compact figure) with the same perimeter. For a global description of regions on an image plane, such topological properties as the number of holes inside the region, the number of connected components of the region, and the Euler number can be useful [7]. One important approach to describing regions is the quantitative representation of their textural features. This descriptor is a measure of local properties such as smoothness, coarseness, and regularity [7].

For UAVs, and small robots in general, it is important to reduce the amount of image information without losing key features. These features are usually scalars (e.g., area or aspect ratio) or low-dimensional vectors (e.g., object coordinates or line parameters). Image feature extraction is the stage of the information concentration, where the data transfer rate can be reduced from 10^6 – 10^8 bytes/s at the camera output to the order of dozens of features per frame [8].

Machine learning technologies have been developing for a long time and today they demonstrate the best results in solving pattern recognition problems [8-12]. The greatest advances in this area have been made with deep neural networks (DNN). Nevertheless, the very fact of the emergence of more and more new varieties of neural networks (NNs) and learning algorithms indicates their potential for further development and the presence of many unsolved problems. The most obvious problem is the computational requirements of both the DNN training process and the process of generating output from the network when the model it is deployed on an embedded device. This resource intensity can be quantified in terms of processor performance, memory usage, cost, etc.

On the other hand, the UAV has significant limitations in terms of dimensions, weight, and power consumption of devices and components that can be used on-board. These restrictions are not always compatible with the needs of real-time detection/recognition algorithms. Significant progress in reducing resource intensity can be achieved if the network learning process is implemented on another computational unit than the target processor, where the latter is placed and used on-board the UAV, i.e., on a powerful computer with a sufficiently long operation time, which is accompanied by a comparably high-power consumption. The option of generating output on a cloud device is not always feasible, and therefore the solution to the problem (smoothing the contradiction between the required and available resources) is to simplify the NN structure as much as possible while maintaining the accuracy of the output.

Given the integrated approach to solving the problem and the limited resources of the UAV, we consider only implementation of the object detection in the image from a wide-angle camera, entrusting the most important tasks of verification and recognition to a trained operator. It is shown in [9] that at present, issues related to the development of a detection and tracking system based on a neural network operating in real-time on embedded devices can be solved.

The choice of an on-board object detector. Returning to the main problem to be solved, namely, reducing the fatigue of the UAV operator, we recall that the image received from the main (navigation) video camera is divided into uniform rectangular areas (zones), and the software system for preprocessing and image analysis tries to find the zone number in which the probability of the presence of the object of interest is the highest. This makes it possible to generate electrical signals for positioning an additional (spot) camera with a narrow viewing angle to obtain an enlarged image fragment for its classification by a human operator.

To solve the problem of automatically finding the area of interest in the image from the navigation camera, it is necessary to use an object detector, the key requirement for which is the ability to work online on-board the UAV.

Object detectors which are known today can be divided into two categories [9, 10]: directly based on purely data-driven machine learning algorithms, as well as based on dedicated features computed based on the input data. The first group of object detectors basically uses both traditional neural networks and machine learning algorithms, as well as Convolutional Neural Networks (CNNs) and deep learning algorithms.

To get started with object detection using deep learning, one of the well-known approaches can be applied [10]:

1. Creating a new object detector. It allows very high-performing models in the end, but it requires significant time, computational resources, and a large amount of data to configure layers and determine the weight coefficients of a deep neural network.
2. Using a pre-trained object detector. This allows quick results, but there is a potential problem with the adequacy of the training set of images that was used when training the neural network for a specific task.

In addition, when choosing an on-board object detector, the type of convolutional neural network used should also be taken into account. In a two-stage detector, the first stage based on a Region Based Convolutional Neural Network (R-CNN) or its variants [11], is designed to determine image areas that may contain an object. The second stage classifies objects within this area. Such a detector allows for very accurate detection of an object but is usually slower than a single-stage detector [10].

An example of a single-cascade detector is YOLO [11]. Here, a single convolutional neural network analyzes the entire image and predicts the probabilities of objects of given categories within bounding boxes. Such a detector could perform faster than a two-stage detector, but at the expense of increased number of misclassifications, especially in scenes with small objects.

Some algorithms do not rely on convolutional neural networks, but still are considered machine learning algorithms. Some of these machine learning techniques are also used to detect objects in images. These are, for example:

- Aggregate Channel Features (ACF [10]). The ACF method extracts properties directly as pixel values in extended image channels without calculating rectangular sums at different locations and scales;
- classification by the method of support vector machine (SVM) using features of histograms of oriented gradient (Histograms of Oriented Gradient) [10];
- the Viola-Jones algorithm [10] for detecting the human face and upper body.

The presence of such a variety of the above and many other object detection methods is a clear indication of their non-universality. That is, each developer tries to use the method that will give the best result under the specific requirements on the specific task. Here, some general considerations can be made for applying such methods. Methods that use convolutional neural networks and deep learning allow building a high-quality object detector when a powerful GPU and a sufficient number of labeled training images are used during training. Under such conditions and if sufficient training time is available, this approach can generate the desired results. Otherwise, it can be preferable to rely on other types of machine learning algorithms. In some specific

cases, when certain objects are known in advance and qualitatively displayed, it may be sufficient to completely abandon the use of resource-intensive machine learning algorithms, and instead use [10]: image segmentation and analysis of large binary fragments (blob analysis), which rely on such properties of objects as size, shape, or color; feature-based object detection, where feature extraction, pattern matching, and RANSAC are used to estimate the location of an object.

Examining the field of application of the object detector, the following can be noted.

1. The UAV has significant limitations regarding the mass, dimensions, and power consumption of any electronic devices placed on-board.
2. Intensive radio communication during the mission could be challenging. This makes cloud computing difficult to apply in this context.

The contradiction between the existing limitations and the need to perform most of the video signal processing operations on-board the UAV (which is the development trend of these devices) can be solved by combining the appropriate electronic components (multifunctional built-in productive processors) and fast object detection algorithms. From this point of view, the use of combined methods can be considered promising, e.g., that described in [12], which uses both the properties of possible objects, which are determined by textural characteristics inside the image, and a classifier configured using a machine learning algorithm.

Datasets for airborne detection of objects in UAV images. Given that universal and most successful modern object detectors are based on deep neural networks, the issue of having a suitable database for use in machine learning algorithms is very relevant. Although there are many open image data sets, we must consider the specific requirements because we need a database of images obtained from UAVs flying at known ranges of altitudes, speeds, pitch angles, and other parameters. Let us try to analyze what is most suitable for the considered case.

Popular datasets (DOTA [13], AID [14], iSAID [15], xView [16]), some of which are called "aerial", are actually created using satellites. The data set UAVVaste [17] is intended for a very specific area of use. The data set DroneDeploy [18] includes some of aerial photographs taken from a UAV. Some authors use this data set to test their methods for image processing, object detection, and tracking. Each scene in [19] has a ground sample distance (GSD) of 0.1 m. There is a corresponding "height" and "label" for each image. However, the database is not available for free in its entirety.

In [20], an overview of some datasets for object detection and tracking tasks in a convenient tabular form to display information is provided for comparison. Some well-known datasets are classified by the authors as a special drone-based class, and they note that these data sets have limitations in terms of scenarios. The work with the VisDrone-Dataset, which contains more than 10,000 images of the urban and rural environment of China, as well as objects from a wide range of angles, is also described in [20].

Consider the conditions when a UAV performs a search and rescue mission. Let the flight altitude $H = 100$ m; viewing angle $\beta = 30^\circ$; tilt angle of the main video camera $\alpha = 58.3^\circ$. Taking into account [2, Fig. 1] it is possible to obtain the main geometric parameters of the image zoning of the main UAV video camera operating in HD format:

- 1) the scale factor $M = 1$;
- 2) the number of pixels in one zone of the image $N_h = 1920$; $N_v = 1080$;
- 3) the size of the zone on the ground $b = 88,89$ m; $h = 50$ m;
- 4) the size of the pixel on the ground or ground sample distance (GSD) $\Delta = 4,63$ cm.

A comparative analysis of [13-20] shows that none of the data sets is created with all the input parameters in the range of those above, and none of these data sets has a sufficient number of images for the specific task. The solution can be found in two ways:

1) Using a real UAV to create new data sets. This obvious path is long and expensive, but clearly has the potential to provide good results.

2) Modeling images using computer synthesis and a monitor or projector placed at an appropriate distance.

For evaluation, we will use a regular Logitech C920 HD Pro Webcam and place it in front of the simulated image screen. The dependence of the calculated distance from the camera to the screen is shown in Fig. 4. The angle $\alpha = 0$ corresponds to the straight direction to the screen.

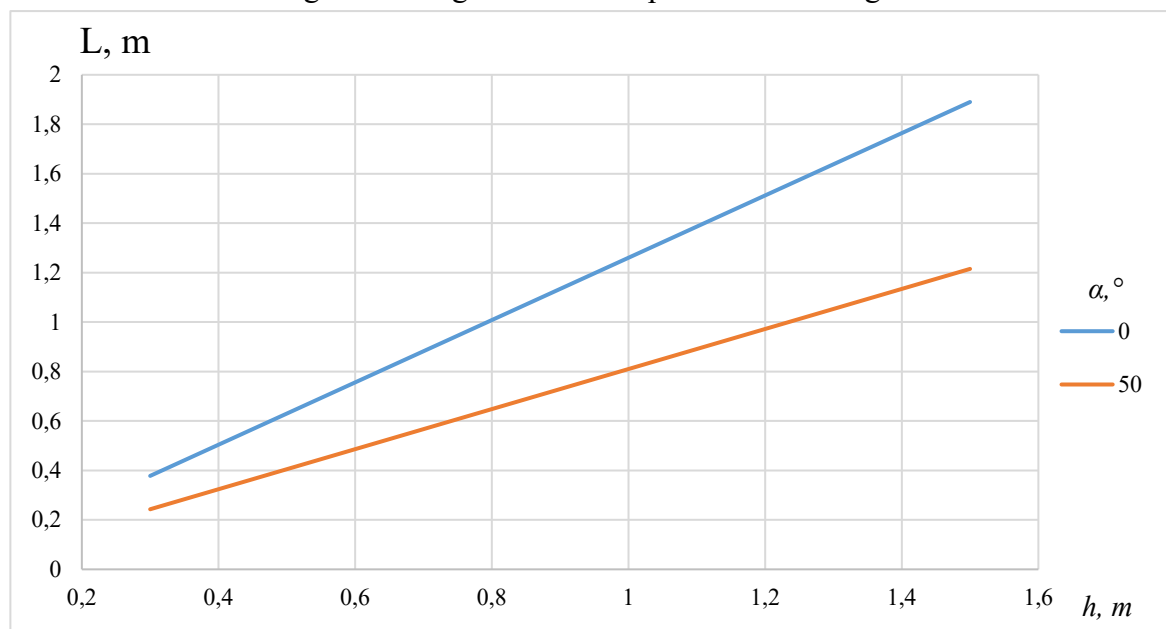


Fig. 4. Distance between camera and screen

Hardware support of the on-board system for increasing the speed of processing images received from UAVs. As discussed in [2], to solve problems associated with fatigue of the UAV operator during long missions, either the main (navigation) video camera with a vari-focal lens can be used, or a spot camera with a narrow angle of view can be added. The image from the navigation video camera should be analyzed in real-time to the presence of objects of interest and, if such are detected, the required image part is automatically zoomed in on.

Using a single camera for both navigation purposes and final classification of potential candidates for the object of interest has several drawbacks.

1. The problem of documenting the mission. The availability of information from only one image (either nominal or enlarged) does not allow to conclude that no object of interest was missed, after the completion of the mission and reading the built-in storage device of the UAV. This might lead to the need to perform a repeated mission, which increases operator fatigue.

2. Purely technical problems associated with the use of a zoom lens. After all, such a lens, in addition to a complex mechatronic system of interconnected movement of several lenses, must have additional focusing subsystems implemented using separate electric drives. This leads to a deterioration in image quality (e.g., accuracy, brightness, and stability of characteristics), as well as to an increase in object classification time because of limited autofocus dynamics.

Hence, there is an advantage of using a separate spot camera located on a gimbal, which can be positioned independently of the navigation video camera for yaw and pitch angles. The structure of the electromechanical part of the overall system for increasing the speed of processing images obtained from UAVs (one of the two channels) is shown in Fig. 5. This is an extended and more detailed block diagram compared to the one in [2].

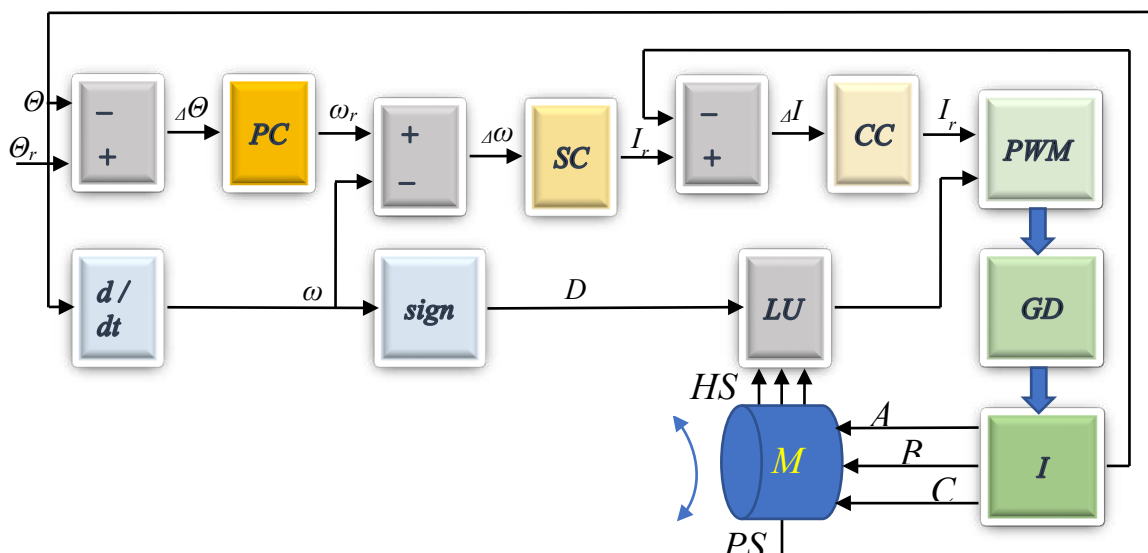


Fig. 5. Spot camera control structure (one channel)

The brushless direct-current motor M is the final actuating device, which, together with another similar one, can be designed for the interrelated positioning of the spot camera in one of two perpendicular directions within the image from the navigation video camera. The motors are equipped with Hall sensors (HS) and a position sensor (PS), the signals of which are used in a three-loop automatic control system that acts on the control error between reference values and actual measured values.

The index "r" in Fig. 5 is used for reference values. The zone number determined by the on-board object detector is recalculated into the specified angle of orientation of the spot camera Θ_r in a certain direction. Position (PC), speed (SC), and current (CC) controllers provide the required quality of the transition process of the motor rotation angle. The rotation speed is calculated by differentiating the signal from the PS . The $sign$ block uses speed to determine the direction of rotation of the motor, which, with the help of a logic unit (LU), provides the appropriate alternation of HD signals for the pulse width modulator (PWM). Pulses with width modulation are supplied to the gate drivers (GD) of the power switches of the inverter (I), which ensures the required form of motor winding currents A, B, C .

As mentioned, a feature of UAVs is the presence of significant design and energy constraints, which fundamentally affect the choice and implementation of all components of the structure in Fig. 5. Provided that the specifications in terms of minimum dimensions, mass, and power consumption are ensured, high-performance computers must be on-board to perform both image pre-processing procedures (correction of visibility conditions, angle of view, removal of obstacles, noise, etc.) and object detection [12]. In addition to solving these resource-intensive tasks related to the implementation of the area of interest detector, the on-board computer must also control two interconnected electric drives in real-time (Fig. 5). Therefore, the selection of components for an electronic system that will provide hardware and software support for the implementation of the specified resource-intensive algorithms is a non-trivial task.

The development of electronics is accompanied by the spread of machine learning algorithms to front-end devices. An effective solution is the use of a multi-functional system on a crystal with built-in support for digital image processing procedures and the implementation of neural networks. The i.MX 8M Plus processor family [21] is designed to reliably solve tasks in machine learning and vision, multimedia, and industrial automation. Key features of this processor include: four Arm® Cortex®-A53 cores and neural processor up to 2.3 TFLOPS; dual video signal processor and two camera inputs for the video system; video codec, 3D/2D graphics accelerator, numerous audio and voice functions; real-time control using Cortex-M7.

Thus, this very large integrated circuit (VLSIC) at the hardware and the corresponding software levels support both the complex tasks related to intelligent image processing and many of the blocks in Fig. 5. It is advisable to use ready-made hardware and software solutions for conducting experimental studies at the stage of creating a prototype to evaluate the conceptual foundations. Consider the PhyBOARD Pollux AI Kit platform [22]. This kit contains a single-board computer based on the i.MX 8M Plus processor and a MIPI camera. The pre-installed software significantly speeds up the development: the OpenCV library; the GStreamer framework (video editors, streaming servers, media players and file converters, VoIP solutions). The Yocto Linux Board Support Package includes [22] NXP's eIQ machine learning software development environment. Support for pytorch, TensorFlow Lite, and the ONNX format allows implementation of machine learning algorithms.

Conclusions. To solve the problem of increasing the speed and reducing the fatigue of the UAV operator when performing long-term search and rescue missions, the choice of components of the software and hardware is discussed, which automatically on-board ensures the orientation of the spot camera in the desired direction.

The allowable computational time spent by the system for automatically determining the area of interest is estimated depending on the tilt angle of the main camera and the flight altitude of the UAV. It is shown that to solve the formulated problem, it is required to create an on-board object detector with a time of detecting the area of interest in the order of a few seconds. For this purpose, combined methods can be used that employ both the features of objects defined by textural characteristics of the image and a classifier, which is tuned using a machine learning algorithm.

Data sets for airborne object detection on UAV images are characterized and it is shown that there are limitations in terms of meeting the required input parameters and the required number of relevant images. Possible ways of solving this problem are discussed.

For experimental studies, software and hardware solutions are discussed that can be used to solve the whole range of tasks, including image processing and control of electric motors for positioning the spot camera, directly on-board the UAV under the specific operating conditions.

Acknowledgements. The authors are highly grateful to the Knut and Alice Wallenberg Foundation for providing a grant.

References

1. Sun, J., Li, B., Jiang, Y., Wen, C. (2016). Camera-based target detection and positioning UAV system for search and rescue (SAR) purposes. *Sensors*, 16(11), 1778-1802. <https://doi.org/10.3390/s16111778>.
2. Voytenko, V., & Solodchuk, M. (2021). Pidvyshchennia shvydkosti analizu zobrazhen, otrymanykh iz bezpilotnoho litalnoho aparatu Pidvyshchennia [Increasing the speed of analysis of images obtained from unmanned aerial vehicle]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, ((2(28)), 127-137. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-2\(28\)-127-137](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-2(28)-127-137).
3. Beard, R., McLain, T. (2012). *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton University Press.
4. Bashynskiy, V.G., Ragulin, V.V., Solodchuk, M.O., Fomin, A.V., & Isachenko, O.O. (2022). Obgruntuvannia neobkhidnosti obrobky videoinformatsii na bortu rozviduvalnoho BPLA [Justification of the need to process video information on board the reconnaissance UAV]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnogo naukovo-doslidnoho instytutu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki – Scientific works of the State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification*, 11(1), 105-115. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.11.2022.12>.
5. WESCAM MX-10 EO/IR. (n.d.). L3Harris. <https://www.l3harris.com/all-capabilities/wescam-mx-10-air-surveillance-and-reconnaissance>.
6. FCB-9500 Series – New Colour Camera Block. Sony. <https://www.image-sensing-solutions.eu/FCB-New-generation.html>.
7. Gonzalez, R.C., Woods, R.E. (2007). *Digital Image Processing*. 3rd ed. Pearson.
8. Corke, P. (2017). *Robotics, Vision and Control. Fundamental Algorithms in MATLAB*. Springer International Publishing AG.

9. Nousi, P., Mademlis, I., Karakostas, I., Tefas, A., & Pitas, I. (2019). Embedded UAV Real-Time Visual Object Detection and Tracking. *2019 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)* (pp. 708-713). <https://ieeexplore.ieee.org/document/9043931>.
10. What Is Object Detection? 3 things you need to know. (n.d.). MathWorks. <https://www.mathworks.com/discovery/object-detection.html>.
11. Gandhi, R. (2018, July 9). R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN, YOLO – Object Detection Algorithms. *Towards – Data Science*. <https://towardsdatascience.com/r-cnn-fast-r-cnn-faster-r-cnn-yolo-object-detection-algorithms-36d53571365e>.
12. Avola, D., Cinque, L., Mambro, Di, A., Diko, A., Fagioli, A., Foresti, G.L., Marini, M.R., Mecca, A., & Pannone, D. (2022). Low-Altitude Aerial Video Surveillance via One-Class SVM Anomaly Detection from Textural Features in UAV Images. *Information*, 13(1(2)). <https://www.mdpi.com/2078-2489/13/1/2>.
13. Ding, J., Xue, N., Xia, G.-S., Bai, X., Yang, W., Yang, M.Y., Belongie, S., Luo, J., Datcu, M., Pelillo, M., Zhang, L. (2021, December 4). Object Detection in Aerial Images: A Large-Scale Benchmark and Challenges. <https://arxiv.org/abs/2102.12219v2>.
14. Xia, G.-S., Hu, J., Hu, F., Shi, B., Bai, X., Zhong, Y., Zhang, L. (2016, August 18). AID: A Benchmark Dataset for Performance Evaluation of Aerial Scene Classification. <https://arxiv.org/abs/1608.05167>.
15. Zamir, S.W., Arora, A., Gupta, A., Khan, S., Sun, G., Khan, F.S., Zhu, F., Shao, L., Xia, G.-S., Bai, X. (2019, August 28). iSAID: A Large-scale Dataset for Instance Segmentation in Aerial Images. <https://arxiv.org/abs/1905.12886v2>.
16. Lam, D., Kuzma, R., McGee, K., Dooley, S., Laielli, M., Klaric, M., Bulatov, Y., & McCord, B. (2018, February 22). xView: Objects in Context in Overhead Imagery. <https://arxiv.org/abs/1802.07856v1>.
17. Kraft, M., Piechocki, M., Ptak, B., & Walas, K. (2021, March 4). Autonomous, Onboard Vision-Based Trash and Litter Detection in Low Altitude Aerial Images Collected by an Unmanned Aerial Vehicle. *Remote Sensing*, 13(5(965)). <https://doi.org/10.3390/rs13050965>.
18. Full Reality Capture. Interior and exterior visual data – any altitude, any angle, all in one platform. (n.d.). *Drone Deploy*. <https://www.dronedeploy.com>.
19. Heffels, M. R., Vanschoren, J. (2020, December 3). *Aerial Imagery Pixel-level Segmentation*. <https://arxiv.org/abs/2012.02024>.
20. Zhu, P., Wen, L., Du, D., Bian, X., Fan, H., Hu, Q., & Ling, H. (2021). Detection and Tracking Meet Drones Challenge. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (44(11)), 7380-7399. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9573394>.
21. i.MX 8M Plus – Arm® Cortex®-A53, Machine Learning, Vision, Multimedia and Industrial IoT. (n.d.). *NXP*. <https://www.nxp.com/products/processors-and-microcontrollers/arm-processors/i-mx-applications-processors/i-mx-8-applications-processors/i-mx-8m-plus-arm-cortex-a53-machine-learning-vision-multimedia-and-industrial-iot:IMX8MPLUS?tid=vanIMX8MPLUS>.
22. phyBOARD®-Pollux AI kit. (n.d.). *NXP*. <https://www.phytec.eu/en/produkte/development-kits/phyboard-pollux-ki-kit/?lang=en/>.

Список використаних джерел

1. Sun J. Camera-based target detection and positioning UAV system for search and rescue (SAR) purposes / J. Sun, B. Li, Y. Jiang, C. Wen // *Sensors*. – 2016. – Vol. 16(11). – Pp. 1778-1802. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16111778>.
2. Войтенко В. Підвищення швидкості аналізу зображень, отриманих із безпілотного літального апарату / В. Войтенко, М. Солодчук // *Технічні науки та технології*. – 2021. – № (2(28)). – Pp. 127-137. – Access mode : [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-2\(28\)-127-137](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-2(28)-127-137).
3. Beard R. *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice* / R. Beard, T. McLain. – Princeton University Press, 2012.
4. Обґрунтування необхідності обробки відеоінформації на борту розвідувального БПЛА / В. Башинський, В. Рагулін, М. Солодчук, А. Фомін, О. Ісаченко // *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. – 2022. – № 11(1). С. 105-115. doi:10.37701/dndivsovt.11.2022.12.
5. WESCAM MX-10 EO/IR. (n.d.). L3Harris. <https://www.l3harris.com/all-capabilities/wescam-mx-10-air-surveillance-and-reconnaissance>.

6. FCB-9500 Series – New Colour Camera Block. Sony. <https://www.image-sensing-solutions.eu/FCB-New-generation.html>.
7. Gonzalez R. C. Digital Image Processing / R. C. Gonzalez, R. E. Woods. – 3rd ed. – Pearson. 2007.
8. Corke P. Robotics, Vision and Control. Fundamental Algorithms in MATLAB / P. Corke // Springer International Publishing AG. – 2017.
9. Embedded UAV Real-Time Visual Object Detection and Tracking [Electronic resource] / P. Nousi, I. Mademlis, I. Karakostas, A. Tefas, I. Pitas // 2019 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR). – 2019. – Pp. 708-713. – Access mode: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9043931>.
10. What Is Object Detection? 3 things you need to know. (n.d.). MathWorks [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.mathworks.com/discovery/object-detection.html>.
11. Gandhi R. R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN, YOLO – Object Detection Algorithms [Electronic resource] / R. Gandhi // Towards – Data Science. (2018, July 9). – Access mode: <https://towardsdatascience.com/r-cnn-fast-r-cnn-faster-r-cnn-yolo-object-detection-algorithms-36d53571365e>.
12. Low-Altitude Aerial Video Surveillance via One-Class SVM Anomaly Detection from Textural Features in UAV Images [Electronic resource] / D. Avola, L. Cinque, A. Di Mambro, A. Diko, A. Fagioli, G. L. Foresti, M. R. Marini, A. Mecca, D. Pannone // Information. – 2022. – № 13(1(2)). – Access mode: <https://www.mdpi.com/2078-2489/13/1/2>.
13. Object Detection in Aerial Images: A Large-Scale Benchmark and Challenges [Electronic resource] / J. Ding, N. Xue, G.-S. Xia, X. Bai, W. Yang, M. Y. Yang, S. Belongie, J. Luo, M. Datcu, M. Pelillo, L. Zhang; Cornell university (2021, December 4). – Access mode: <https://arxiv.org/abs/2102.12219v2>.
14. AID: A Benchmark Dataset for Performance Evaluation of Aerial Scene Classification [Electronic resource] / G.-S. Xia, J. Hu, F. Hu, B. Shi, X. Bai, Y. Zhong, L. Zhang; Cornell university (2016, August 18). – Access mode: <https://arxiv.org/abs/1608.0516>.
15. iSAID: A Large-scale Dataset for Instance Segmentation in Aerial Images [Electronic resource] / S. W. Zamir, A. Arora, A. Gupta, S. Khan, G. Sun, F. S. Khan, F. Zhu, L. Shao, G.-S. Xia, X. Bai; Cornell university (2019, August 28). – Access mode: <https://arxiv.org/abs/1905.12886v2>.
16. xView: Objects in Context in Overhead Imagery [Electronic resource] / D. Lam, R. Kuzma, K. McGee, S. Dooley, M. Laielli, M. Klaric, Y. Bulatov, B. McCord; Cornell university (2018, February 22). – Access mode: <https://arxiv.org/abs/1802.07856v1>.
17. Autonomous, Onboard Vision-Based Trash and Litter Detection in Low Altitude Aerial Images Collected by an Unmanned Aerial Vehicle [Electronic resource] / M. Kraft, M. Piechocki, B. Ptak, K. Walas // Remote Sensing. (2021, March 4). 13(5(965)). – Access mode: <https://doi.org/10.3390/rs13050965>.
18. Full Reality Capture. Interior and exterior visual data – any altitude, any angle, all in one platform. (n.d.) [Electronic resource] // Drone Deploy. – Access mode: <https://www.dronedeploy.com>.
19. Heffels M. R. Aerial Imagery Pixel-level Segmentation [Electronic resource] / M. R. Heffels, J. Vanschoren; Cornell university (2020, December 3). – Access mode: <https://arxiv.org/abs/2012.02024>.
20. Detection and Tracking Meet Drones Challenge [Electronic resource] / P. Zhu, L. Wen, D. Du, X. Bian, H. Fan, Q. Hu, H. Ling // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2021. – № 44 (11). – P. 7380-7399. – Access mode: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9573394>.
21. i.MX 8M Plus – Arm® Cortex®-A53, Machine Learning, Vision, Multimedia and Industrial IoT. (n.d.) [Electronic resource] // NXP. – Access mode: <https://www.nxp.com/products/processors-and-microcontrollers/arm-processors/i-mx-applications-processors/i-mx-8-applications-processors/i-mx-8m-plus-arm-cortex-a53-machine-learning-vision-multimedia-and-industrial-iot:IMX8MPLUS?tid=vanIMX8MPLUS>.
22. phyBOARD®-Pollux AI kit. (n.d.) [Electronic resource] // NXP. – Access mode: <https://www.phytec.eu/en/produkte/development-kits/phyboard-pollux-ki-kit/?lang=en>.

Отримано 06.04.2023

УДК 681.5:004.51

Володимир Войтенко¹, Бьорн Олофсон², Максим Солодчук³, Юрій Денисов⁴

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки, робототехніки, автоматики та мехатроніки; дослідник кафедри автоматичного керування
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна); Лундський університет (Лунд, Швеція)
E-mail: v.voytenko@stu.cn.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1490-0600>
ResearcherID: [F-8698-2014](https://orcid.org/0000-0003-1490-0600). Scopus Author ID: [36167678700](https://orcid.org/0000-0003-1490-0600)

²доктор філософії з автоматичного керування, доцент, старший викладач кафедри автоматичного керування
Лундський університет (Лунд, Швеція)
E-mail: bjorn.olofsson@control.lth.se. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6793-7207>. Scopus Author ID: [54793307900](https://orcid.org/0000-0002-6793-7207)

³начальник науково-дослідного відділу
Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації
озброєння та військової техніки (Черкаси, Україна)

E-mail: rocket15733@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1162-6784>

⁴доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електроніки, робототехніки, автоматики та мехатроніки
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: den71ltd@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2293-7964>. ResearcherID: [G-1144-2016](https://orcid.org/0000-0003-2293-7964)

КОМПОНЕНТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО ВИЯВЛЕННЯ ЗОНИ ІНТЕРЕСУ НА ЗОБРАЖЕННЯХ, ОТРИМАНИХ З БПЛА

Швидкість обробки відеоінформації, отриманої з БПЛА під час пошуково-рятувальних, моніторингових і розвідувальних місій, є параметром, який визначає успішність виконання завдання. Щоб зменшити навантаження на оператора БПЛА, безпосередньо на борту здійснюється автоматичне виявлення того фрагмента вихідного зображення поверхні, на якому може бути розташований об'єкт інтересу. Результатом роботи такої автоматичної системи є формування номера зони інтересу, генерація керуючих сигналів і відповідне позиціонування додаткової відеокамери з вузьким полем огляду (спот-камери). Остаточне рішення про виявлення об'єкта інтересу та його класифікацію здійснює оператор на підставі відеозображення з спот-камери.

Для вирішення зазначеної проблеми у статті обґрунтовано вибір компонентів програмно-апаратного комплексу, який безпосередньо на борту автоматично забезпечує орієнтацію спот-камери у потрібному напрямку.

Оцінено допустимі витрати часу для системи автоматичного визначення зони інтересу в залежності від кута нахилу основної камери та висоти польоту БПЛА. Показано, що для вирішення основної задачі потрібне створення бортового детектора об'єктів з часом виявлення зони інтересу порядку одиниць секунд. Для цього можуть бути застосовані комбіновані методи, які використовують як властивості об'єктів, що визначаються текстурними характеристиками всередині зображення, так і класифікатор, налаштований за допомогою алгоритму машинного навчання.

Охарактеризовано набори даних для бортового виявлення об'єктів на зображеннях БПЛА, і показано, що жоден із доступних вільно сьогодні не відповідає потрібним вхідним параметрам і не містить достатньої кількості релевантних зображень. Запропоновані можливі шляхи вирішення даної проблеми.

Для виконання експериментальних досліджень наведені програмно-апаратні рішення, які потенційно можуть бути використані для вирішення всього комплексу завдань, включаючи обробку зображень і керування електродвигунами позиціонування спот-камери безпосередньо на борту БПЛА в умовах численних обмежень.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат (БПЛА); аналіз зображень; людино-машинна система; електропривід; бортовий детектор об'єктів; керування спот-камерою.

Рис.: 5. Табл.: 1. Бібл.: 22.

Ігор Єремєєв¹, Олександр Єщенко²

¹доктор технічних наук, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами
Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського (Київ, Україна)
E-mail: yremeyv@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1968/0395>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики
Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: doc44ent@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3915-486X>

СИСТЕМИ АВТОНОМНОГО ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БУДІВЕЛЬ

На основі системного підходу до аналізу стану енергетичної інфраструктури в роботі представлена концепція трансформації існуючої системи теплопостачання в цілісний комплекс розосереджених енергогенеруючих об'єктів (технопарків) з метою підвищення рівня енергетичної безпеки країни. Для забезпечення надійності та стійкості систем теплопостачання пропонується автономні локальні енергокомплекси із застосуванням когенераційних технологій та відновлювальних джерел енергії з інтегрованими системами акумуляції теплової та електричної енергії.

Ключові слова: енергетична інфраструктура; тепла енергія; розосереджена генерація; евристичний аналіз; оптимальне керування.

Рис.: 1. Бібл.: 5.

Актуальність теми дослідження. Критична енергоінфраструктура відіграє важливу роль у забезпеченні енергетичної безпеки держави, створенні умов для життєдіяльності населення та розвитку національної економіки.

Постановка проблеми. При розробці та проектуванні автономної системи енергопостачання як компонент критичної енергоінфраструктури необхідним є аналіз функцій окремих складових системи та критеріїв, що визначають енергоефективність системи загалом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням функціонального аналізу розосереджених енергетичних систем присвячено достатню кількість наукових праць [1-4]. Зокрема в роботі [1] розглянуто формування оптимальної структури локальної електроенергетичної системи на основі оцінки міри близькості розміщення об'єктів із застосуванням кластерного аналізу для моделювання систем за концепцією Microgrid.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз виконаних досліджень показав, що в питаннях розробки та проектування автономних локальних енергосистем з інтегрованим у них устаткуванням із використанням відновлювальних джерел енергії, необхідним є розгляд функцій окремих складових структурної схеми системи та критеріїв, що визначають енергоефективність системи в цілому, а також їхня взаємодія у різних обставинах. Крім того, дослідження, що проводилися, були присвячені розробці, головним чином, інтелектуальних систем теплозабезпечення приватних будинків, де досить просто вирішити проблеми комфорту та заощаджуванню енергії. Водночас проблема теплозабезпечення багатоквартирних будинків (в аспекті інтелектуалізації функціонування окремих складових системи теплозабезпечення) майже не розглядалася.

Метою статті є розробка концепції автономної локальної системи енергопостачання для багатоквартирних будинків як компонента критичної енергоінфраструктури з метою підвищення рівня енергетичної безпеки країни та забезпечення необхідного комфорту.

Виклад основного матеріалу. Сучасний стан енергетичної інфраструктури накладає певні вимоги до стабільності режимів її роботи, до необхідності пошуку оптимальних з техніко-економічного погляду налаштувань, до отримання припустимих співвідношень таких показників, як економічність та умови комфорту, у тому числі в разі суттєвих коливань погодних умов, відмов у компонентах систем теплозабезпечення, нештатних ситуацій тощо.

Сьогодні комунальне теплопостачання здійснюється різними шляхами:

- централізованими системами теплопостачання, які забезпечують теплом міста або окремі райони великих міст;

- мікрорайонними котельнями, які забезпечують теплом множину будинків того, чи іншого мікрорайону великого міста, або й невелике місто чи СМТ;
- локальними системами теплопостачання (ЛСТ).

Перші два шляхи мають спільні проблеми, пов'язані з втратами теплової енергії під час теплогенерації та втратами в системах транспортування, які зі збільшенням довжини трубопроводів зростають і в сучасних централізованих системах теплопостачання великих міст вони можуть становити 20-30 %.

До локальних систем теплопостачання сьогодні можна віднести домові котельні, теплові насоси та індивідуальні нагрівачі різних типів, які використовують як класичні, так і альтернативні види джерел енергії.

Останнім часом розбудова ЛСТ стає більш популярною завдяки притаманним їм позитивним рисам: суттєво зменшеними порівняно із системами централізованого теплопостачання витратами на транспортування теплоносіїв, незалежністю від проблем адаптації до умов розвитку тепломереж, можливість використовувати альтернативні джерела енергії тощо. Проте ЛСТ мають і свої недоліки. Так, домові котельні в разі пожежі чи вибуху можуть знищити або суттєво пошкодити будинок, виток газу (енергоносія) або продуктів згоряння (особливо СО) може призвести до отруєння мешканців будинку, невеликий димар не сприяє підйому продуктів згоряння на висоту, достатню для забезпечення ефективної турбулентної дифузії та винесенню цих газів за межі району розташування котельні (інакше кажучи, сприяє утворенню смогу в мікрорайоні).

Теплові насоси не мають означених вище недоліків і не вимагають використання палива будь-якого гатунку (за виключенням незначного споживання електроенергії), але їхнє використання обмежується, головним чином, приватним сектором.

Квартирні обігрівачі (окрім притаманних домовим котельням проблем, зазначених вище) мають ще й інші недоліки: зменшений ККД (за рахунок того, що в межах прийнятної вартості та габаритів неможливо використати пристрої утилізації тепла та оптимізації режимів), підвищену небезпеку (адже замість одного джерела тепла в будинку може бути 160-250 таких джерел з відповідним збільшенням вірогідності аварії), неможливість використання альтернативних видів палива (у разі обігрівачів, які використовують газ) або широкого використання електрообігрівачів без суттєвої реконструкції електромереж. Що ж стосується використання сонячної енергії, то такі нагрівачі мають співіснувати з іншими обігрівачами, або ж використовувати досить складні та дорогі системи акумулювання енергії.

Усе зазначене вище вимагає у разі вибору ЛСТ розглядати усі позитивні та негативні риси кожної з ЛСТ, оцінювати кожен систему з усіх поглядів (можливості застосування альтернативних джерел енергії або палива, гнучкості, вартості, екологічності, безпеки) і обирати таку ЛСТ, яка є оптимальною за усіма, чи більшістю показників. З огляду на зазначене вище, одним із варіантів оптимальної ЛСТ можна вважати ЛСТ, яка змонтована в окремому приміщенні й обслуговує декілька будинків, що оточують її. При цьому завдяки дуже коротким теплотрасам втрати тепла будуть мінімальні, будь-яка аварія на ЛСТ не вплине на стан будинків, які вона забезпечує теплом, переведення котельні на альтернативне паливо можна здійснити досить легко, причому в приміщенні котельні можна передбачити установку для отримання газу шляхом піролізу органічної складової твердих побутових відходів, листя, новорічних ялинок та іншого сміття, що дозволить економити паливо та вирішити проблему утилізації відходів.

Для комплексної оцінки якості роботи складної теплоенергетичної системи необхідно проводити аналіз відхилення від заданих значень таких показників:

- температурних графіків теплових мереж;
- теплогідравлічних режимів роботи мереж;
- показників якості водно-хімічного режиму роботи теплових мереж;

- втрат теплової енергії при її транспортуванні;
- витрат електроенергії на транспортування теплоносія;
- надійності тепlopостачання (захист мереж від гідравлічних ударів, число відключень на 1 км траси).

Але, найголовніше, результати цих аналізів мають оцінюватися як з точки зору виявлення сталих трендів показників, що аналізуються, так і з урахуванням коливань погодних умов, налаштувань регуляторів, вибору того чи іншого режиму з точки зору бажаного співвідношення економічність/комфорт, причому повинно мати місце домінування пріоритету надійності тепlopостачання над прибутковістю.

Система управління використанням теплової енергії має базуватися на :

- застосуванні енергоефективного обладнання;
- моніторингу енерговикористання;
- енергоаудиті стану інженерних систем та енергобалансу;
- алгоритмах сталого пошуку та забезпечення оптимальних режимів теплозабезпечення, енергоефективності та комфорту в реальних умовах функціонування всіх компонентів системи та можливих діапазонах дрейфу показників, коливань якісних та кількісних характеристик теплоносіїв і припустимих («штатних») реконфігурацій систем;
- застосуванню сучасних схемно-конструктивних рішень

Іншими словами, щоб отримати енергоефективне тепlopостачання потрібно виконати багато умов, у тому числі й умови, які накладаються на параметри теплоносія, що повертається до джерела теплової енергії (ТЕЦ, опалювальної котельні). Тобто само по собі енергоефективне тепlopостачання є складним інженерним завданням із необхідністю застосування системного підходу з метою забезпечення енергоекономічної експлуатації системи тепlopостачання загалом.

Тому для житлової забудови з багатоквартирними будинками треба знайти адекватні критерії і важелі впливу задля організації стабільного та ефективного теплозабезпечення [3]. На наш погляд, трансформація існуючої системи централізованого тепlopостачання (або її доповнення) можлива із застосуванням:

- комбінованого виробництва теплової та електричної енергії в автономних локальних системах енергопостачання за когенераційною технологією на сучасному високоефективному устаткуванні;
- широкого застосування відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) згідно з вимогами IV енергетичного переходу;
- системи акумуляції електричної та теплової енергії (накопичувачів електричної та теплової енергії, розподілених за окремими об'єктами технопарку);
- системи автоматизованого управління виробництвом, розподілом теплової та електричної енергії;
- системи автоматичного енергомоніторингу, діагностики енергетичного обладнання з центром диспетчеризації, зв'язку та управління об'єктами розосередженого енергопостачання.

Такий підхід гармонізується з проектною розробкою ЕС – платформою енергозабезпечення Europeen Technology Platform SmartGrid на основі розосередженої генерації та Smart-технологій [2; 3].

Одним із найважливіших критеріїв є, звичайно, економія енергоносіїв. У багатоквартирних будинках, де здійснюється централізоване опалення від ТЕЦ або опалювальної котельні, вважається, що можливості економії обмежені. Але це не зовсім так. Ці генератори теплової енергії можуть бути обладнані піролізними генераторами, що, по-перше, перетворюють органічні побутові відходи у піролізний газ, який можна використати замість природного, забезпечуючи економію останнього, та, по-друге, вирішуючи ще і проблему поводження з побутовими відходами. При цьому управління процесами теплогенерації може

завжди починатися з перевірки того, чи достатній тиск піролізного газу у системі і у разі позитивної відповіді використати цей газ для потреб теплогенерації, тобто економити природний газ (або його частку – у разі потреби генерації великої кількості тепла). Якщо використовуються бойлери, то підігрів теплоносіїв може також відбуватися (частково) різними шляхами: гарячою водою від ТЕЦ або котельні, які обладнані піролізними генераторами, або електричним підігрівачем (від акумуляторної батареї, що живиться від сонячної батареї або вітряка, встановлених на будинку). При цьому алгоритм забезпечення бойлера енергією має базуватися на пріоритеті використання альтернативних видів енергії.

Іншим критерієм є комфорт у приміщенні. Забезпечення комфортних умов у багатоквартирних будинках – складна проблема. Але і тут є певні перспективи. По-перше, система тепlopостачання має відстежувати коливання атмосферного тиску, температури, показника сталості атмосфери, вологості, напрямку та швидкості вітру, порівнювати їх з притаманними для цього періоду середніми значеннями цих показників і прогнозувати на підставі цих даних та банку фактів, що зберігає аналогічну інформацію за минулі роки, регулюючи впливи на систему теплoзабезпечення. По-друге, система має враховувати такі нюанси, як режим сну, коли температура у приміщенні може бути на декілька градусів нижча за денну, та режим прокидання, коли ця температура має бути вищою за задану середню температуру у приміщенні.

На жаль, інші критерії, притаманні концепції «розумного будинку», поки що важко використати в багатоквартирних будинках. Їх можна використати хіба що в казармах військових частин або гуртожитках, де життя досить жорстко регламентоване. Саме тому для розробки схемних рішень автономної локальної системи енергопостачання доцільно застосувати методику евристичного аналізу.

До складу інтелектуальної системи теплоспоживання (ІСТ), що може забезпечити управління процесами оптимізації, зазначеними вище, входять як складові технічні засоби (ТЗ) інформаційне (ІЗ) та математичне (МЗ) забезпечення. При цьому до складу ТЗ входять генератори та перетворювачі енергії (бойлери, піролізні генератори, сонячні батареї, вітрогенератори, теплообмінники, утилізатори, електрогенератори, акумуляторні батареї, перетворювачі змінного струму у сталий і сталого у змінний, газові турбіни або газові мотори), регулюючі (виконавчі) органи, засоби завдання та відображення режимів та стану ТЗ. До ІЗ належать вимірювачі параметрів зовнішнього (наколишнього) середовища, параметрів у приміщеннях, що обслуговуються, вимірювачі теплoпотоків до приміщень, що обслуговуються, та з цих приміщень назовні, тобто витрат, вимірювачі поточного часу та даних календаря. До МЗ належать програми, що забезпечують досягнення та утримання оптимальних режимів функціонування системи, а також контроль за працездатністю усіх компонентів системи й перехід, у разі потреби, на інший, передбачений раніше як припустимий, режим роботи.

МЗ формується на базі евристик, що формують умови, за якими припустимий той чи інший режим або перехід до іншої парадигми управління, наприклад наступні:

ЯКШО ($t_{гво} < t_{31}$) **ТА** ($Оп=1$) **ТА** ($ПІРГ=0$), **ТО** ($ПІРГ \rightarrow 1$), **ІНАКШЕ** ($ПрГ \rightarrow 1$),
ЯКШО ($t_{гвгвс} < t_{32}$) **ТА** ($Оп=0$) **ТА** ($ПІРГ=0$) **ТА** ($U_{AB} > U_{ABmin}$), **ТО** ($(УК + АБ) \rightarrow 1$),
ІНАКШЕ ($ПІРГ \rightarrow 1$) **ТА** ($ЕГ \rightarrow 1$),
ЯКШО ($U_{ШСС} < U_{АБ3min}$) **ТА** $\{(t_{гво} < t_{31})$ **АБО** ($t_{гвгв3} < t_{32}\}$, **ТО** ($(УК + АБ) \rightarrow 1$).

Тут $t_{гво}$ – температура гарячої води в системі опалення; t_{31} – мінімально припустиме значення $t_{гво}$; $Оп = 1$ – опалення включено; $ПІРГ=0$ – піролізний генератор відключений; ($ПрГ \rightarrow 1$) – подача природного газу; ($ПІРГ \rightarrow 1$) – включення піролізатора; $t_{гвгв3}$ – температура гарячої води в системі ГВЗ; $Оп=0$ – опалення відключене; $U_{AB} > U_{ABmin}$ – напруга на клеммах АБ перевищує мінімально припустиме; $((УК + АБ) \rightarrow 1)$ – Підключити УК (утилізаційний котел) до АБ; ($ПІРГ \rightarrow 1$) та ($ЕГ \rightarrow 1$) – включити, відповідно, піролізний та електрогенератор; ШСС – шина сталого струму; ($U_{ШСС} < U_{АБ3min}$) – умови включення УК до ШСС, якщо напруга на клеммах останньої нижче за мінімальну напругу, яка необхідна для заряджання АБ.

Один із варіантів схеми альтернативного теплозабезпечення енергоефективного будинку (ЕЕБ) відповідно до наведених евристик наведено на рис. 1. Тут $t_{ГВО}$ визначається на виході з ТП у мережу опалення, а $t_{ГВГВЗ}$ – у мережу ГВЗ.

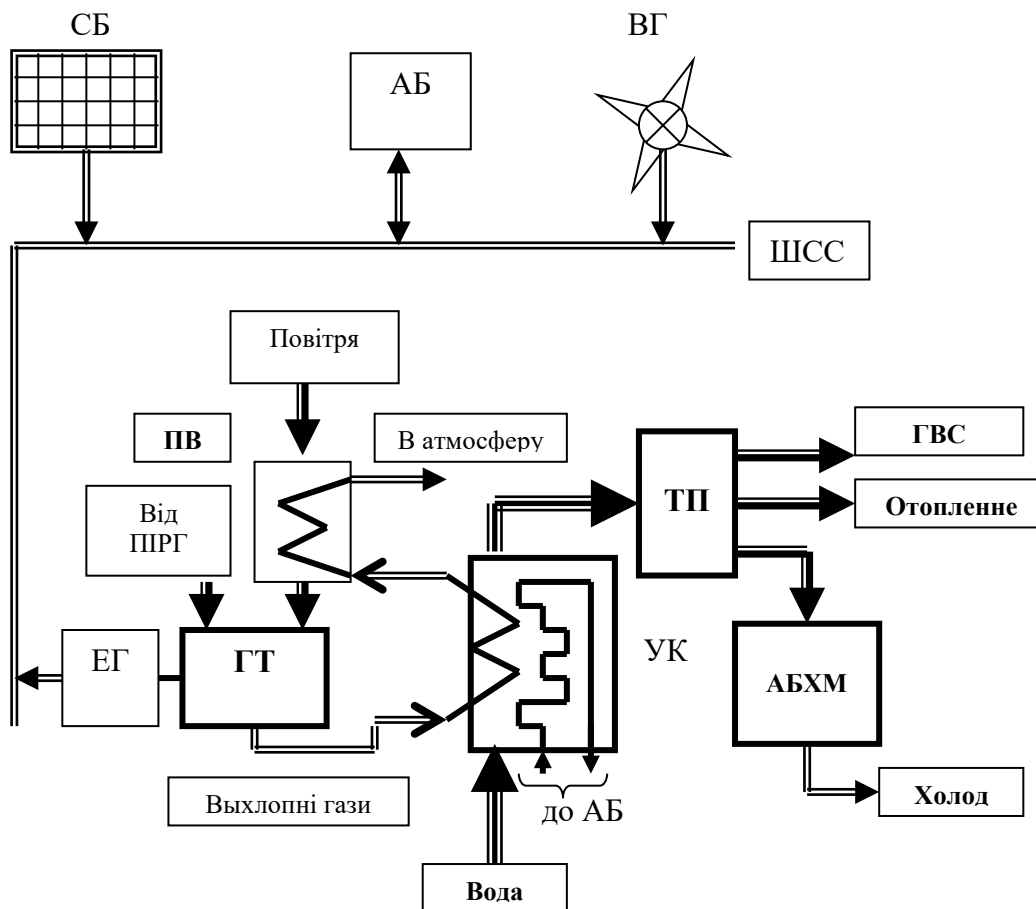


Рис. 1. Варіант схеми автономного енергозабезпечення:

ПП – підігрівач повітря; ТП – теплопункт; ГВЗ – гаряче водозабезпечення;
 ГТ – газова турбіна; УК – утилізаційний котел; АБХМ – абсорбційна холодильна машина
 ЕГ – електрогенератор; СБ – сонячна батарея; АБ – акумуляторна батарея;
 ВГ – вітрогенератор

Інша група евристик передбачає управління з прогнозуванням, мета якого – недопущення порушення комфорту при зміні погодних умов або режимів функціонування. До цієї групи можна віднести такі евристики:

ЯКЩО $\{(|\Delta t_{нв}/\Delta\tau| > \Delta t_{min}) \text{ АБО } (\Delta v/\Delta\tau > \Delta v_{min}) \text{ АБО } (\Delta h/\Delta\tau > \Delta h_{min})\}$ **ТА** $\{PO=1\}$,

ТО $[\Delta R=(\text{sign}\Delta)\times(\text{step}_{\Delta\tau})]$

ЯКЩО $\{(|\Delta t_{нв}/\Delta\tau| > \Delta t_{min}) \text{ АБО } (\Delta v/\Delta\tau > \Delta v_{min}) \text{ АБО } (\Delta h/\Delta\tau > \Delta h_{min})\}$ **ТА** $\{PO=0\}$,

ТО $[\Delta R=0]$

ЯКЩО $\{(|\Delta t_{нв}/\Delta\tau| > \Delta t_{max}) \text{ АБО } (\Delta v/\Delta\tau > \Delta v_{max}) \text{ АБО } (\Delta h/\Delta\tau > \Delta h_{max})\}$ **ТА** $\{PO=0\}$,

ТО $[\Delta R=(\text{sign}\Delta)\times(\text{step}_{\Delta\tau})]$

Тут $\Delta t_{зп}$ – прирощення температури зовнішнього повітря за період сталої часу будинку $\Delta\tau$; Δt_{min} – мінімально припустиме прирощення температури зовнішнього повітря, на яке система може не реагувати; $\Delta v/\Delta\tau$ – прирощення швидкості вітру за період сталої часу будинку $\Delta\tau$; Δv_{min} – мінімально припустиме прирощення швидкості вітру, на яке система може не реагувати; $\Delta h/\Delta\tau$ – мінімально припустиме прирощення вологості зовнішнього повітря, на яке система може не реагувати; $PO = 1$ – нормальний режим опалення

ввімкнуто; ΔR – прирощення керуючого впливу на час $\text{step}_{\Delta t}$, тобто на час Δt з урахуванням знаку прирощення; $PO = 0$ – режим опалення послаблений (нічний час, час довготривалої відсутності мешканців); Δt_{\max} , Δv_{\max} , Δh_{\max} – граничні значення для випадку різних суттєвих змін навколишніх умов, які здатні вплинути на комфортні умови.

Теоретичний аналіз автономної локальної системи теплопостачання базується на засадах моделювання процесу при застосуванні автоматизованої системи управління та енергомоніторингу з елементами самонавчання [5].

У теорії автоматичних систем управління мають місце поняття «навчання» та «самонавчання». У цих поняттях закладений такий зміст. Під навчанням математичної моделі розуміється процес вироблення в цій моделі тієї або іншої реакції на зовнішні сигнали шляхом багаторазового впливу на математичну модель та її зовнішнього коригування. Зрозуміло, що математична модель передбачається потенційно здатною до навчання.

Поставлена мета створення системи самонавчання досягається тим, що система управління теплоспоживанням, яка містить: датчики мікроклімату, датчики параметрів, що характеризують формування мікроклімату, датчики метеоумов, пов'язані через контролер введення/виведення даних із програмою обробки даних, керуючої, у свою чергу, через контролер виконавчими пристроями, додатково містить програмний блок-емулятор показань датчиків зовнішніх метеоумов, що передає змодельовані показання датчиків в програму обробки даних.

Функціональна схема управління теплоспоживанням може зокрема мати таке наповнення: система містить датчики мікроклімату, датчики параметрів технологічних процесів, датчики зовнішніх метеоумов, виконавчі пристрої, контролер введення/виведення даних, програму обробки даних, програмний блок-емулятор показань датчиків зовнішніх метеоумов, що передає змодельовані показання датчиків у програму обробки даних.

Структура й функції автоматизованої системи теплопостачання (АСТП) при цьому повинні передбачати, з одного боку, максимальне використання альтернативних джерел енергії (тобто підключення природного газу лише за умов, коли альтернативні джерела енергії не можуть забезпечити комфортні умови в приміщеннях та необхідну температуру гарячої води), а з іншого – урахування чинників навколишнього середовища (температура, вологість, швидкість вітру), а також часу доби, дня тижня та деяких індивідуальних уставок користувачів системи. Один з варіантів АСТП може включати такі альтернативні джерела як сонячна батарея (СБ) та вітрогенератор (ВГ). Оскільки сонце і вітер «працюють» не весь час і зазвичай не завжди забезпечують під час роботи необхідні параметри, варто електроенергію, яку вони виробляють, прямувати на входи зарядних пристроїв (ЗП) для заряджання акумуляторної батареї (АБ), яка, у свою чергу, живить електронагрівач, який і забезпечує підігрів води в теплообміннику системи теплопостачання (ТО або УК).

Процес управління поділено на цикли рівної тривалості. На початку кожного циклу проводиться послідовне опитування датчиків

Програма обробки даних через контролер опитує датчик та отримує його показник. Час, що витрачається на перетворення та введення вимірювальної інформації в програму обробки даних, значно менше періоду коливань у керованому процесі. Тому вся вимірювальна інформація одного циклу вводиться практично одночасно. Після того, як вся інформація передана в запам'ятовувальний пристрій протягом деякого часу програма обробки даних виконує розрахунок необхідних керуючих сигналів. Потім керуючий сигнал від контролера виконує управляючий вплив, який зберігається незмінним протягом цього циклу управління, або за якимось прогнозуючим алгоритмом змінюється.

Потім оброблена та узагальнена вимірювальна інформація про хід процесу та стан технологічного обладнання передається програмою обробки даних на запам'ятовувальний пристрій та на необхідні периферійні пристрої. Після чого система перетворюється

на стан очікування чи до виконання допоміжних розрахунків, які можуть перериватися без порушення програми та проміжних результатів на час чергового циклу управління.

У початковий період експлуатації системи час між циклами керування використовується для самонавчання системи, яке здійснюється таким чином.

До програми обробки даних підключається програмний блок математичної моделі теплового режиму приміщення. На період між циклами управління програма обробки даних включає програмний блок-емулятор показань датчиків зовнішніх метеоумов.

Робота системи під час навчання відбувається так само, як і під час управління, з тією різницею, що вхідну інформацію система отримує від програмного блоку-емулятора показань датчиків зовнішніх метеоумов, а вихідну передає програмному блоку, що моделює формування мікроклімату приміщень.

Після того, як на черговій моделі формування мікроклімату навчання закінчується, у програму обробки даних вводиться складніша модель формування мікроклімату та система, використовуючи накопичені дані, навчається на цій моделі. Після того як система починає достатньо швидко переходити від однієї математичної моделі формування мікроклімату до іншої, процес навчання на моделях закінчується і система переводиться в режим навчання на реальному об'єкті. Час навчання скорочується за рахунок того, що в період навчання на моделях частота циклів керування збільшується.

Методологія самонавчання математичної моделі представляє окреме математичне завдання. Її рішення та реалізації присвячено велику кількість робіт. В основу математичного апарату для самонавчаючих математичних моделей виявилось можливим і зручним покласти імовірнісні інтерактивні методи, і зокрема методи стохастичної апроксимації.

Висновки. Трансформація існуючої системи централізованого тепlopостачання (або її доповнення) можлива із застосуванням комбінованого виробництва теплової та електричної енергії в автономних локальних системах енергопостачання за когенераційною технологією на сучасному високоефективному устаткуванні й із широким застосуванням відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) згідно з вимогами IV енергетичного переходу. Причому створення альтернативної системи (АСТП) можливо розтягнути у часі (якщо не йдеться про плановий ремонт) за рахунок поступового доповнення (step-by-step) того чи іншого устаткування, що забезпечує певну економію ресурсів і створює резерв для подальшого вдосконалення системи.

Список використаних джерел

1. Василенко В. І. Формування оптимальної структури локальної електроенергетичної системи на основі оцінки міри близькості розміщення об'єктів / В. І. Василенко // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2017. – № 1. – С. 36-46.
2. Bhati A. Energy conservation through smart homes in a smart city / A. Bhati, M. Hansen, C. Man Chan // A lesson for Singapore households Energy Policy. – 2017. – Vol. 104, May. – Pp. 230-239.
3. Kim M. J. Developing Design Solutions for Smart Homes Through User-Centered Scenarios / M.J. Kim, M. E. Cho, H. J. Jun // Front. Environmental Psychol. – 2020. – Vol. 11.
4. Гібридні когенераційно-геотермальні установки в системах теплозабезпечення / М. В. Боярчук, В. М. Сиротюк, В. Ю. Воробкевич, С. В. Сиротюк, М. Ф. Ольм // Ринок інсталяцій. – 2004. – № 4. – С. 13-15.
5. Єремєєв, І. С. Автоматизована система тепlopостачання для «розумного будинку» / І. С. Єремєєв, О. І. Єщенко / Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем : матеріали ІХ Міжнар. наук.-практ. конф (Чернігів, 14-16 трав. 2019 р.). – Чернігів : ЧНТУ, 2109. – С. 178-179.

References

1. Vasylenko, V.I. (2017). ormuвання optymalnoi struktury lokalnoi elektroenerhetychnoi systemy na osnovi otsinky miry blyzkosti rozmishchennia ob'ektiv [The formation of the optimal structure of the local electric power system based on the assessment of the degree of proximity of the placement of objects]. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia – Energy: economics, technologies, ecology*, 1, 36–46.

2. Abhishek Bhati, Michael Hansen, Ching Man Chan. (May 2017). Energy conservation through smart homes in a smart city. *A lesson for Singapore households Energy Policy*, 104, 230-239.
3. Kim, M.J., Cho, M. E., & Jun H. J. (2020). Developing Design Solutions for Smart Homes Through User-Centered Scenarios. *Front. Environmental Psychol.*, 11.
4. Boyarchuk, V.M., Syrotyuk, V.M., Vorobkevich, V.Yu., Syrotyuk, S.V., & Olm, M.F. (2004). Hybridni koheneratsiino-heotermalni ustanovky v systemakh teplozabezpechennia [Hybrid cogeneration-geothermal installations in heat supply systems]. *Rynok instaliatsii – Installation magazine*, 4, 13-15.
5. Yermeev, I.S., & Yeshchenko, O.I. (2019). Avtomatyzovana systema teplopostachannia dlia «rozumnoho budynku» [Automated heat supply system for a “smart house”]. Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system: materialy IKh Mizhnar. nauk.-prakt. konf. – Materials of the IX International Science and Practice conference “Complex quality assurance of technological processes and systems” (pp. 178-179).

Отримано 24.05.23

UDC 621.31

Ihor Yermeev¹, Oleksandr Yeschenko²

¹Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automated Control of Technological Processes
Tavri National University named after V. I. Vernaskyi (Kyiv, Ukraine)

E-mail: yermeyv@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1968/0395>

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Thermal and Alternative Energy
National Technical University of Ukraine “KPI named after Igor Sikorsky” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: doc44ent@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3915-486X>

SYSTEMS OF AUTONOMOUS HEAT SUPPLY OF BUILDINGS

The critical energy infrastructure plays an important role in ensuring the energy security of the state, creating conditions for life of population and development of national economy. The work examines the problems of developing and designing an autonomous energy supply system as a component of critical energy infrastructure, it is necessary to analyze the functions of individual components of the system and the criteria that determine the energy efficiency of the system as a whole.

A sufficient number of scientific papers are devoted to the analysis of research and publications on the functional analysis of distributed energy systems, in particular; the formation of the optimal structure of the local electric power system based on the assessment of the degree of proximity of the location of objects with the use of cluster analysis for modeling systems based on the Microgrid concept is considered.

The purpose of the article is to develop the concept of an autonomous local energy supply system as a component of critical energy infrastructure in order to increase the level of energy security of the country.

The transformation of the existing system of centralized heat supply (or its addition) is possible with the use of combined production of heat and electricity in autonomous local energy supply systems using cogeneration technology on modern high-efficiency equipment and the widespread use of renewable energy sources (RES) in accordance with the requirements of the IV energy transition. This approach is harmonized with project development of the EU – European Technology Platform SmartGrid energy supply platform based on distributed generation and Smart technologies.

For the analysis of schematic solutions of the structure of the autonomous local energy supply system, the heuristic analysis technique was applied, which made it possible to optimize the management of energy resource generation processes, in the form of components: technical means (TK), informational (IS) and mathematical (MZ) support.

The paper provides a theoretical analysis of an autonomous heat supply system based on the principles of process modeling when using an automated control and energy monitoring system with self-learning elements.

Keywords: energy infrastructure; thermal energy; cogeneration technology; distributed generation; heuristic analysis; optimal management; energy monitoring

Fig.: 1. References: 5.

Тимофій Якушкін¹, Роман Єршов², Сергій Степенко³

¹здобувач ступеня доктора філософії на кафедрі електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

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

²науковий співробітник, старший викладач кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

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

ResearcherID: [H-1432-2016](https://orcid.org/0000-0002-0267-2906). SCOPUS Author ID: [57188719994](https://orcid.org/0000-0002-0267-2906)

³кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник,
доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: serhii.stepenko@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7702-6776>

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

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТОПОЛОГІЙ ТА АЛГОРИТМІВ ДЛЯ ВІДСТЕЖУВАЧІВ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ У ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ

Стационарні сонячні електричні станції, що складаються з масиву сонячних панелей, – одні з найбільш вагомих складових автономних електричних мереж. Враховуючи різноманітність існуючих топологій та методів відстежування точки максимальної потужності, метою даної роботи є огляд топологій перетворювачів, класифікація алгоритмів MPPT та їх порівняльний аналіз. На основі проведеного аналітичного огляду складено порівняльну таблицю для розглянутих алгоритмів. У процесі порівняння основних алгоритмів MPPT встановлено, що інтелектуальні алгоритми мають ряд переваг над базовими. Але реалізація таких алгоритмів є комплексною і потребує більших обчислювальних ресурсів, що донедавна становило істотну проблему.

Ключові слова: автономні електричні мережі; алгоритми відстежування максимальної потужності; електроенергетичні системи; ефективність; порівняльний аналіз; сонячні панелі; топології перетворювачів; точка максимальної потужності; фотоелектричні перетворювачі; фотоелектричні системи.

Рис.: 13. Табл.: 1. Бібл.: 30.

Актуальність теми дослідження. Нині в Україні є проблема забезпечення сталого електропостачання, спричинена терористичною діяльністю підступної країни-сусіда. Така ситуація підтверджує необхідність розвитку альтернативної енергетики та її інтеграції в електричну мережу країни [1] з метою її оновлення та еволюційного перетворення у гнучко пов'язану сукупність автономних електричних мереж (АЕМ). Залежно від розміру АЕМ поділяють на Nanogrid, Microgrid, Minigrid [2]. Стационарні сонячні електричні станції (СЕС), що складаються з масиву сонячних панелей (СП) – одні з найбільш вагомих складових АЕМ, які в разі відключення (руйнування) зовнішньої електромережі здатні забезпечити автономне електроживлення від одного приватного господарства до мережі об'єктів критичної інфраструктури.

Постановка проблеми. АЕМ на основі СП мають свої недоліки, основний серед яких – невисока ефективність перетворення сонячної енергії в електричну. Він є наслідком динамічної та нелінійної генерації енергії в СП. У цьому легко впевнитись, знявши ват-амперну або вольт-амперну характеристику (ВАХ) СП. Вплив чинять такі фактори: зміна рівня сонячного освітлення протягом доби та пори року, зміна температури поверхні СП, повне або часткове затінення СП, внутрішній опір СП тощо [3]. Підключення СП як джерела живлення безпосередньо до навантаження призведе до ще менш ефективного перетворення енергії через неузгодження імпедансів. Це унеможливить оптимальне використання енергетичного ресурсу СП. Таким чином, постає необхідність у створенні та розвитку технологій, які дозволяють перетворювати сонячну енергію в електричну більш ефективно (з меншими втратами). Однією з таких парадигм є стеження за точкою максимальної потужності СП – *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). MPPT втілено в багатьох методах та алгоритмах, що враховують зміни факторів навколишнього середовища, фізичні процеси всередині СП та характер навантаження.

За способом інтеграції в АЕМ на основі СП, блоки МРРТ поділяють на централізовані (Centralized МРРТ, СМРРТ), де єдиний блок підключається до масиву СП (які через безліч факторів працюють у неоднакових режимах), та розподілені (Distributed МРРТ, ДМРРТ), де кожний блок підключається до окремої СП. Зважаючи на використання авторами структури та потужність АЕМ, у цій роботі під терміном МРРТ буде розглядатись саме ДМРРТ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. СП складається з послідовно з'єднаних напівпровідникових комірок, які перетворюють енергію сонця в електричну, за допомогою фотоелектричного ефекту. Комірку СП можна представити за допомогою еквівалентної електричної схеми (рис. 1). Така «однодіодна» схема є широко використовуваною і відносно точною для моделювання СП [4].

Як можна побачити (рис. 1), в ідеальному випадку еквівалентна схема складається з джерела струму I_{ph} та паралельно включеного з ним діоду D . Струм джерела I_{ph} відповідає струму, який генерується під час потрапляння фотонів на поверхню комірки. Діод D уособлює напівпровідник, з якого виготовлена комірка, і через який протікає струм I_d , який в свою чергу можна знайти за формулою (1):

$$I_D = I_o \cdot \left(\exp\left(\frac{q}{kT} \cdot v_l\right) - 1 \right), \tag{1}$$

де I_o – зворотний струм насичення; q – заряд електрона; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура комірки; v_l – вихідна напруга ідеальної комірки.

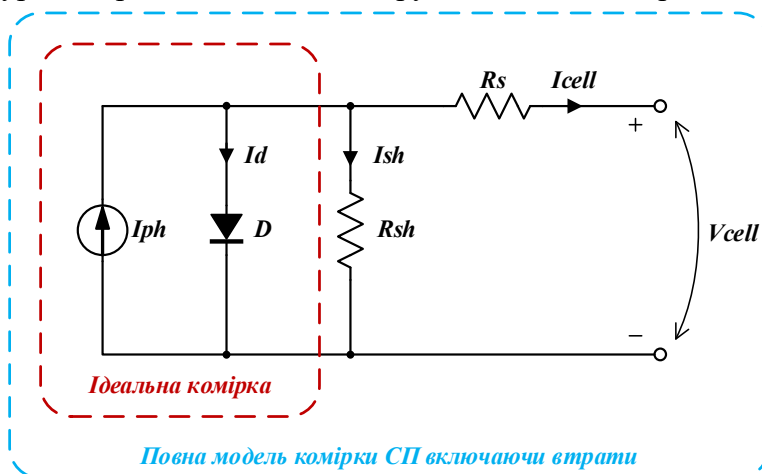


Рис. 1. Еквівалентна схема комірки сонячної панелі

Вихідний струм ідеальної комірки отримується за формулою (2).

$$i_l(v_l) = I_{ph} - I_D, \tag{2}$$

де i_l – вихідний струм ідеальної комірки.

Підставивши (1) у (2) отримаємо повне рівняння ВАХ ідеальної СП [5]:

$$i_l(v_l) = I_{ph} - I_o \cdot \left(\exp\left(\frac{q}{kT} \cdot v_l\right) - 1 \right), \tag{3}$$

Наведені вище залежності стосувалися ідеального випадку. Розглянемо реальну модель з урахуванням втрат. Можна помітити (рис. 1), що в схемі наявні опори R_s та R_{sh} , які впливають на вихідний струм, вносячи певні втрати. Послідовний опір R_s виникає при з'єднанні комірок між собою, а паралельний опір R_{sh} моделює струм витоку [6]. Враховуючи ці опори, формула вихідного струму буде такою:

$$I_{cell}(V_{cell}) = I_{ph} - I_D - I_{sh}, \tag{4}$$

де I_{cell} та V_{cell} – вихідний струм та вихідна напруга комірки СП; I_{sh} – струм витоку.

Формула струму діода I_d (1) зміниться:

$$i_D = I_o \cdot \left(\exp \left[\frac{q}{k \cdot T \cdot N_s \cdot m} \cdot (V_{cell} + I_{cell} \cdot R_s) \right] - 1 \right), \quad (5)$$

Також виділяють поняття термічної напруги V_t , що описується виразом (6):

$$V_t = \frac{k \cdot T \cdot N_s \cdot m}{q}, \quad (6)$$

де N_s – кількість послідовно з'єднаних комірок; m – фактор ідеальності р-п переходу, що залежить від матеріалу напівпровідника з якого виготовлена комірка СП, і набуває значення від 1.2 до 6.0 (наприклад $m = 1.2$ відповідає керамічному монокристалу) [7].

Струм, який протікає через резистор R_{sh} , визначається за формулою (7):

$$I_{sh} = \frac{V_{cell} + I_{cell} \cdot R_s}{R_{sh}}, \quad (7)$$

Фотострум I_{ph} , який залежить від температури комірки й величини сонячної інсоляції та зворотний струм насичення діода I_o знаходяться за формулами (8) та (9) [7]:

$$I_{ph} = \left[I_{sc} + K_i \cdot (T - T_{ref}) \right] \cdot \frac{G}{G_{ref}}, \quad (8)$$

де I_{sc} – струм короткого замикання; K_i – коефіцієнт зміни світлового потоку залежно від температури; T – абсолютна температура комірки; T_{ref} – опорна температура; G – значення освітленості; G_{ref} – опорне значення освітленості;

$$I_o(T) = I_{o(T_{ref})} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^2 \cdot \exp \left[\frac{E_q}{V_t} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} - 1 \right) \right], \quad (9)$$

де E_q – енергія забороненої зони напівпровідникового матеріалу; $I_{o(T_{ref})}$ – зворотний струм насичення діода при температурі T_{ref} .

Нижче зображені вихідні характеристики СП: вольт-амперна (I-V) та ват-амперна (P-V), а також їх залежність від рівня інсоляції (рис. 2) і температури (рис. 3). Графіки змодельовані у MATLAB для СП моделі VERTEX TSM-DE18M(II) 490W.

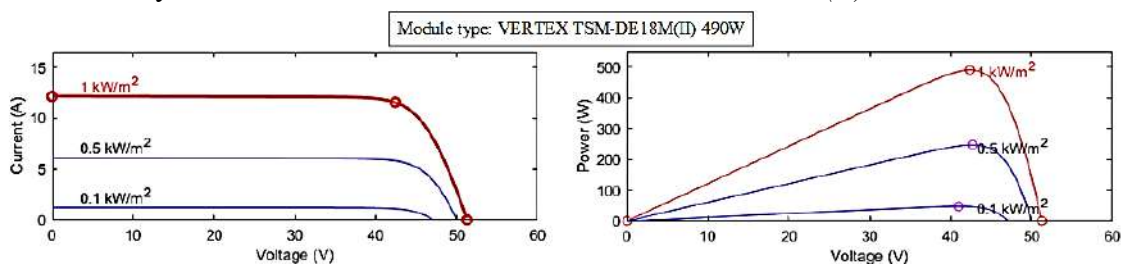


Рис. 2. Вихідні характеристики СП залежно від рівня інсоляції

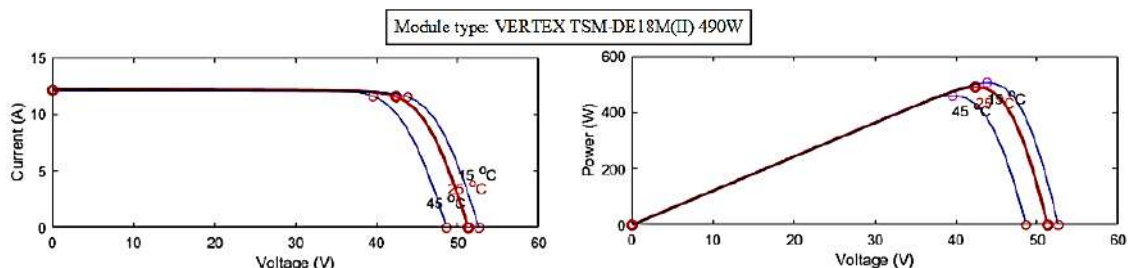


Рис. 3. Вихідні характеристики СП залежно від температури

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Розглянемо структуру АЕМ (рис. 4) та її складові. СП (*PV-panel*), або частіше їх масив (*PV-array*), є джерелом енергії для АЕМ. Вони перетворюють сонячну енергію в електричну завдяки явищу фотоефекту. Безпосередньо до виходу масиву СП послідовно включено блок *MPPT*, задача якого – відбір максимальної потужності від СП, тобто слідкування за узгодженням (збігом) вихідного імпедансу СП зі входним імпедансом перетворювача напруги (*DC-DC* або *DC-AC*).

Інвертор напруги (*DC-AC*) формує змінну синусоїдальну напругу з постійної, що дає можливість заживити відповідні побутові та промислові пристрої, або (за наявності вузла синхронізації *AC-Grid Sync*) постачати електричну енергію в зовнішню централізовану мережу. За несприятливих погодних умов та одночасної наявності мережевого живлення, інвертор напруги, який має функцію реверсування напрямку перетворення (*Bidirectional*), може живити внутрішню мережу АЕМ та підзаряджати блок акумуляторних батарей (*Accumulator Batteries*, АКБ).

Контролер заряду АКБ (*Bidirectional Charger*) дотримується специфічного для хімічного типу АКБ режиму заряджання (постійним струмом, постійною напругою) та балансує заряд між її комірками (*Battery Management System*, *BMS*). Це забезпечує наявність резервного джерела енергії в разі одночасної відсутності живлення у зовнішній мережі та поганих погодних умов для генерації за рахунок СП. Особливу увагу на початку формування АЕМ необхідно приділяти вибору акумуляторних батарей. Авторами [8; 9] було проведено огляд і порівняння свинцево-кислотних, нікель-кадмієвих, нікель-метал-гідридних, літій-іонних, літій-залізо-фосфатних АКБ. У роботі [30] розглянуто стійкість комбінованої системи накопичення енергії на основі суперконденсатора та акумуляторної батареї.

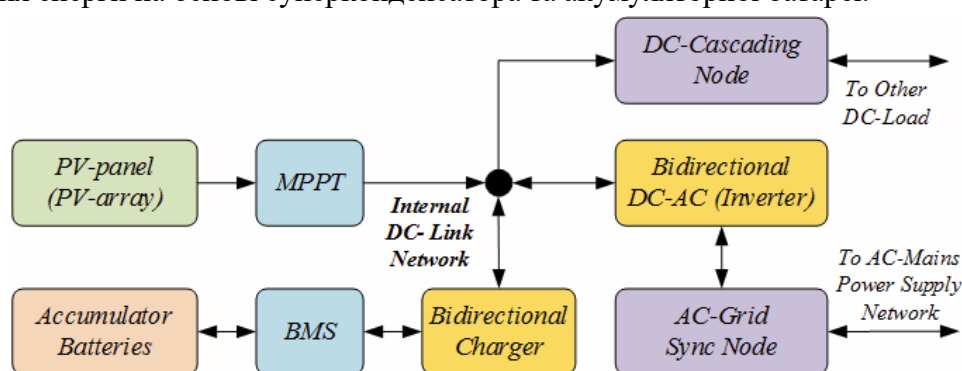


Рис. 4. Узагальнена структура АЕМ на основі СП

Основною функціональною підсистемою в АЕМ є силова частина, і більшість її блоків під'єднано до внутрішньої силової ланки постійного струму (*Internal DC-link Network*). Завданням контролера всієї АЕМ є підтримка напруги в цій ланці стабільною, що забезпечується тими чи іншими блоками, залежно від режиму роботи. Також саме постійну напругу зручно використовувати для каскадування АЕМ з метою нарощування їх потужності (*DC Cascading Node*).

Мета статті. Враховуючи різноманітність існуючих топологій та методів *MPPT*, метою даної роботи є огляд топологій перетворювачів, класифікація алгоритмів *MPPT* та їх порівняльний аналіз за критеріями: набір датчиків, обчислювальна складність, швидкість відстежування, точність відстежування, собівартість, обсяг використаної пам'яті, стабільність, ефективність.

Виклад основного матеріалу. Враховуючи вищезазначене та природу СП, саме перетворення постійної напруги лежить в основі більшості блоків АЕМ, зокрема, блоку *MPPT*, тому надалі розглянемо та порівняємо основні топології *DC-DC* перетворювачів.

Топології схем силової частини *MPPT*. Базовими топологіями *DC-DC* перетворювачів є безтрансформаторні підвищуючий (*Boost Converter*, рис. 5А) та понижуючий (*Buck Converter*, рис. 5В). *Buck Converter* побудований таким чином, що вихідна напруга

V_{out} (напруга навантаження R_{load}) не перевищує вхідну напругу V_s . Boost Converter працює навпаки і для нього V_{out} вище V_s . Також існує інвертуюча топологія (Inverting Buck-Boost Converter, рис. 5C), яка дозволяє отримувати полярність вихідної напруги протилежну відносно вхідної.

Понижучо-підвищуючий перетворювач (Non-Inverting Buck-Boost Converter, рис. 5D) поєднує властивості Buck- і Boost- перетворювачів. Тобто, якщо необхідно отримати на виході, наприклад, $V_{out} = 24$ В, а вхідна напруга V_s змінюється в межах від 20 В до 30 В, то коли $V_s > V_{out}$, перетворювач працює в Buck-режимі, а якщо $V_s < V_{out}$ – у Boost-режимі.

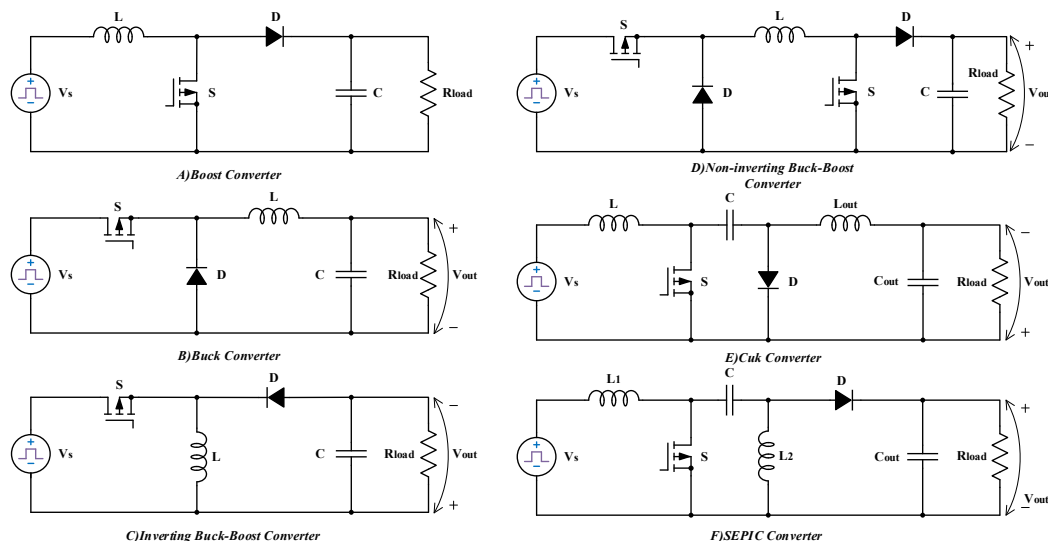


Рис. 5. Топології DC-DC перетворювачів, що можуть бути використані як силова частина для МРРТ

Cuk Converter (рис. 5E) утворений каскадуванням частин Boost- та Buck-перетворювачів через розділяючу ємність. Подібно до Inverting Buck-Boost, він інвертує полярність вихідної напруги відносно вхідної. Разом з тим, подібно до Non-Inverting Buck-Boost перетворювача, може як підвищувати, так і знижувати напругу за модулем, але на відміну від нього, має низькі пульсації вхідного та вихідного струмів.

SEPIC Converter (рис. 5F) також працює в Buck- та Boost- режимах, має низькі пульсації вхідного струму, але вищі пульсації вихідного струму [10]. Cuk та SEPIC перетворювачі можуть забезпечити вищий граничний коефіцієнт перетворення по напрузі, ніж звичайний Buck-Boost. В роботі [11] детально розглянуто і проведено порівняльний аналіз та моделювання топології: Buck-Boost, Cuk та SEPIC.

Аналізуючи реальні зразки МРРТ, помічено, що здебільшого використовується підвищуючий DC-DC перетворювач або його модифікації, оскільки він має властивості записання надлишку відібраної енергії у вихідній ємності, можливість забезпечити неперервний вхідний струм та вищий ККД у широкому діапазоні регулювання. Вища напруга на виході дозволяє забезпечувати необхідну потужність меншим струмом.

Удосконаленнями для топології Boost-перетворювача з метою покращення тих чи інших його характеристик залежно від застосування є: синхронний (з активним випрямлячем), з чергуванням фаз, квазірезонансний та квазіімпульсний. Дані топології перетворювачів, представлені нижче (рис. 6).

Synchronous Boost Converter на перший погляд ускладнюється тим, що треба керувати двома ключами $S1$ і $S2$. Сигнал на $S2$ має бути інвертованим до $S1$. Ці сигнали мають бути синхронні. Потрібно унеможливити випадок, коли $S1$ і $S2$ одночасно перебувають в однакових станах, адже це призведе до виходу із ладу схеми або навантаження. Втрати на MOSFET-ключі $S2$ будуть значно меншими, ніж на діоді D у звичайного Boost-перетворювача.

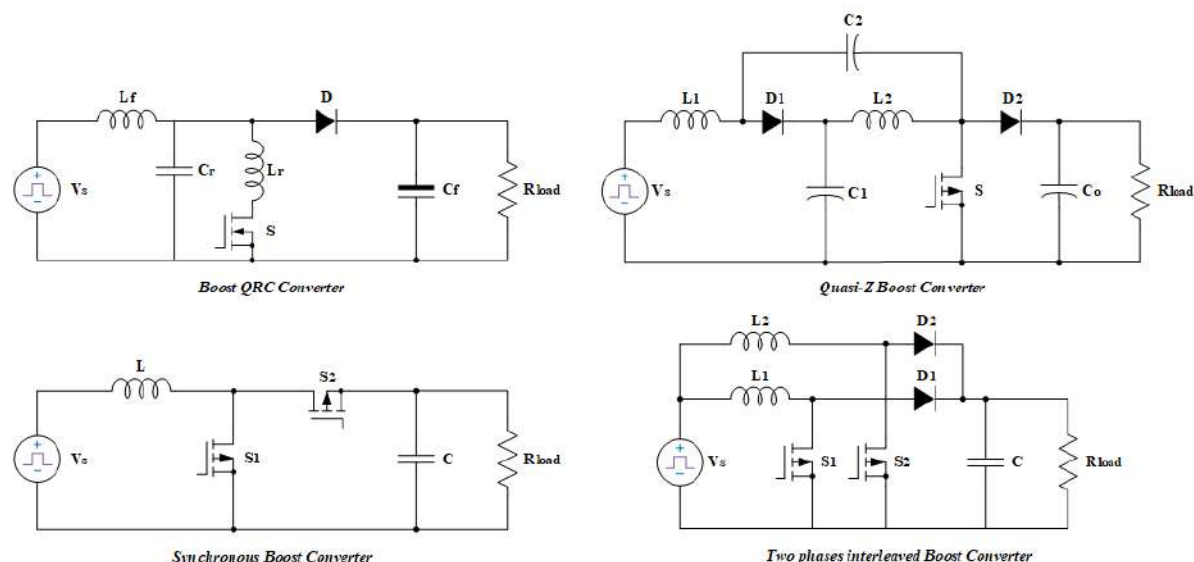


Рис.. 6. Модифіковані топології підвищувальних DC-DC перетворювачів, що можуть бути використані як силова частина для МРРТ

Two-Phase Interleaved Boost Converter дозволяє розширити діапазон перетворюваних напруг. Такий перетворювач має значно менші пульсації струмів, більшу ефективність перетворення і кращу динаміку. Індуктивності L_1 та L_2 можуть бути як окремими, так і магнітно-зв'язаними (на спільному осердді).

Quasi-resonant Boost Converter (QRC) – шляхом комутації при нульовому струмі та/або напрузі значно зменшуються втрати енергії в ключі, що дозволяє підвищити частоту комутації, зменшити габарити реактивних компонентів та покращити (звужити) спектральний склад як циркулюючих, так і відібраних в живлячої мережі напруг та струмів. Недоліками є ускладнений розрахунок та налаштування через наявність резонансного контуру та додаткової схеми контролю для забезпечення “м’якої” комутації ключа, а також необхідність більш ретельного вибору компонентів. Статичні та динамічні характеристики розглянуті та змодельовані у [12], [13].

Quasi-impedance Boost Converter (QZ) – завдяки наявності імпедансної ланки ефективно працює в досить широкому діапазоні вхідних напруг та струмів, адже може оперувати і як джерело напруги, і як джерело струму з метою узгодження імпедансу з вихідним навантаженням, що забезпечує максимальну відібрану потужність. За певних удосконалень [14] QZ може працювати і в двонаправленому режимі, тобто передавати потужність зі входу до виходу, і навпаки. Подібно до QRC, QZ також реалізовує варіант «м’якої» комутації ключа, зменшуючи втрати на перемикання, що своєю чергою підвищує ККД, та дозволяє отримати менші пульсації струму [15].

Керування будь-якою з наведених вище топологій зводиться до керування силовими ключами S для підтримки постійного значення вихідної напруги. Для цього необхідно змінювати значення коефіцієнта заповнення D в ШІМ (або частоту між імпульсами в ЧІМ). Саме в цьому полягає задача МРРТ-контролера на основі специфічних алгоритмів слідування та ланок систем автоматичного керування (наприклад, PI- та/або PID-регуляторів). МРРТ-контролери швидше і якісніше відпрацьовують, ніж звичайний DC-DC перетворювач без функції МРРТ (лише з функцією стабілізатора напруги та/або струму) в умовах, коли їх вхідна напруга (вона ж – вихідна напруга СП) специфічно коливається через погодні умови.

Аналіз різновидів алгоритмів МРРТ. Проаналізуємо та проведемо класифікацію основних алгоритмів МРРТ. На рис. 7 зображена узагальнена схема підключення СП до навантаження з використанням МРРТ-контролера [16].

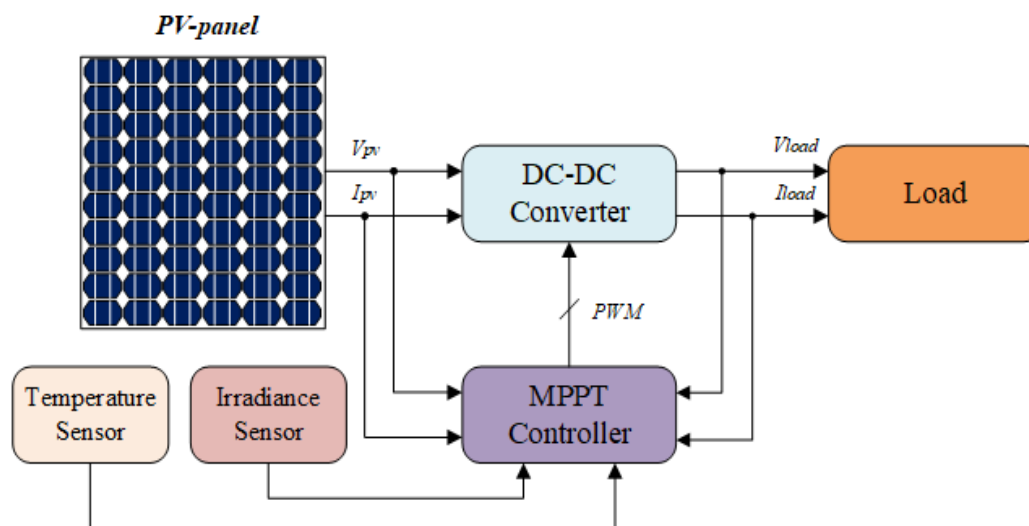


Рис. 7. Узагальнена структурна схема СП з MPPT-контролером

Як бачимо, для повноти контролю необхідний набір додаткових датчиків, а саме для визначення актуального значення температури та освітленості СП. Напруга та струм СП виступають як опорні значення, а напруга та струм навантаження – як вектор сигналів зворотного зв'язку. Конфігурація та кількість датчиків може різнитися залежно від обраного алгоритму MPPT та наявних конструктивних та/або фінансових обмежень.

Вимірювання напруги та струму на виході СП не є складною задачею. Достатньо використовувати спеціалізовані мікросхеми операційних підсилювачів (ОП) в поєднанні з зовнішнім або вбудованим в мікроконтролер (МК) аналого-цифровим перетворювачем (АЦП). Але вимірювання температури та рівня інсоляції, потребує більшої уваги розробників. У простішому випадку можна вимірювати загальну температуру навколишнього середовища поблизу СП за допомогою звичайного цифрового датчика температури. Рівень освітленості можна вимірювати за допомогою невеликої каліброваної фотоелектричної комірки зі схемою перетворювача на основі декількох ОП та оцифрування на основі МК (рис. 8). Це може бути саморобний датчик [17], або дорожче готове комерційне рішення. Метеорологічні станції та порівняння різних методів вимірювання освітленості опрацьовані в роботі [18].

Проте складність виникає в точному вимірюванні температури фотоелементів та освітленості тому, що ці параметри можуть бути нерівномірно розподіленими по всій поверхні СП. Наприклад, якщо ми маємо датчик інсоляції (рис. 8), встановлений поряд зі СП та його фотоелемент затінить хмара, а поверхня СП навпаки буде без затінення, то вимірне значення освітленості буде некоректним. В ідеалі було б доречним знати рівень освітленості та температуру кожної фотоелектричної комірки.



Рис. 8. Датчик освітленості SPEKTRON 485mb Digital Irradiance Sensor SI-RS485

Автори [19], [20] пропонують подібні загальні класифікації для МРРТ алгоритмів. Розподілимо їх на три групи, та проаналізуємо по два алгоритми з кожної:

1. Априорні алгоритми (на основі константних обмежень). Дані алгоритми шукають точку МРР на основі документальних або табличних константних значень параметрів та характеристик СП. До них належать Constant Voltage Tracking, Open-Circuit Voltage Tracking, Short-Circuit Current Tracking, Current Scanning Method, Curve-Fitting Method, Look-up Table Method [20].

2. Апостеріорні алгоритми (на основі поточних вибірок даних). Дані алгоритми проводять вимірювання вихідних значень СП та безпосередньо контролюють МРРТ. Вони прості у реалізації, і через це знаходять широке використання. До них належать Perturb & Observe, Incremental Conductance, Parasitic Capacitance, Ripple Correlation Control, Photovoltaic Array Combination, Actual Measurement, Voltage Feedback, Power Feedback [19].

3. Інтелектуальні алгоритми. Дані методи базуються на інтелектуальних алгоритмах, які більш ефективно враховують нелінійності в системі. До них належать Fuzzy Logic Control, Artificial Neural Network Control, Sliding Mode Control, Biological Swarm Chasing Algorithm [19].

Open-Circuit Voltage Tracking (OCVT)-алгоритм. OCVT алгоритм базується на тому, що вихідну напругу СП V_{pv} в точці МРР можна вважати пропорційною напрузі холостого ходу (ХХ) СП V_{oc} з коефіцієнтом K_{oc} . Тобто напруга в точці МРРТ V_{mpp} :

$$V_{mpp} = K_{oc} \cdot V_{oc}, \quad (10)$$

Для реалізації OCVT потрібно відключати СП від навантаження, вимірювати V_{oc} , розрахувати V_{mpp} та перепід'єднати СП до навантаження з уже налаштованим новим номінальним значенням напруги V_{ref} . Коефіцієнт K_{oc} обирається в діапазоні від 0,7 до 0,8. Хоча сам метод є простим у використанні, саме підбір оптимального значення K_{oc} є проблемним. Також до недоліків варто віднести те, що з певною періодичністю необхідно від'єднувати СП від навантаження для заміру значення V_{oc} .

Short-Circuit Current Tracking (SCCT)-алгоритм. SCCT алгоритм подібний до попереднього OCVT алгоритму, але базується на тому, що струм короткого замикання (КЗ) I_{sc} , який змінюється внаслідок зміни погодних умов (передусім, освітленості), в точці МРР можна вважати пропорційним струму I_{sc} :

$$I_{mpp} = K_{sc} \cdot I_{sc}, \quad (11)$$

Коефіцієнт пропорційності K_{sc} менше ніж 1,0 і залежить від моделей та матеріалів СП (наприклад, $K_{sc} = 0,85$ для полікристалічних СП). Даний алгоритм реалізується подібно до OCVT, але після від'єднання СП від навантаження, необхідно замикати вихідні контакти СП і вимірювати струм I_{sc} , наприклад, за допомогою шунта.

В алгоритмах OCVT та SCCT операції від'єднання СП від навантаження для вимірювання напруги ХХ та струму КЗ можна автоматизувати за допомогою пари реле, таймеру часу та двох вільних каналів АЦП.

Perturb&Observe (P&O) алгоритм. Даний алгоритм, напевно, найбільш розповсюджений в публікаціях, присвячених дослідженню МРРТ через свою простоту та ефективність роботи за сприятливих умов. У назві закладено основний принцип – *спостерігаємо* за величиною вихідної потужності P_{pv} , за необхідності *втручаємося* і вносимо корективу до опорної напруги V_{ref} на фіксовану величину для подальшого обчислення коефіцієнта заповнення ШІМ для DC-DC перетворювача, опісля повторюємо вищезгаданий процес. На рис. 9 проілюстровано схему P&O-алгоритму.

У кожному одиницю часу t дискретизації вимірюємо значення струму I_{pv} та напруги V_{pv} з СП, на основі яких розраховуємо вихідну потужність P_{pv} і проводимо порівняння з попереднім вимірюванням, на основі порівняння робимо крок ($Step$) – збільшуємо або зменшуємо значення опорної напруги V_{ref} на фіксовану величину. У такий спосіб алгоритм намагається знайти та утримувати точку MPP на P-V характеристиці.

З вищеприведеного випливають логічні недоліки такого методу відстежування, які впливають на якість вихідних параметрів та швидкість досягнення точки MPP. Передусім це наявність пульсацій біля точки MPP, величина яких може бути пропорційна до кроку $Step$. При збільшенні кроку пульсації будуть великими. При зменшенні кроку пульсації стануть меншими, але знизиться швидкість виходу на точку MPP [21]. Також відома проблема, коли за стрімкої зміни освітленості (наприклад, під час затінення хмарами) відбувається відстежування точки MPP у неправильному напрямку [22].

Для усунення недоліків класичного P&O-алгоритму вдаються до різних модифікацій. Найлегші шляхи – модифікувати та покращити вихідну характеристику за рахунок спостереження за додатковим параметром – зміною струму ΔI_{pv} . Також можна використовувати залежно від знаку зміни потужності ΔP_{pv} одиничний або подвійний крок, що запропоновано в [23]. Існує дещо складніший варіант модифікації P&O-алгоритму [24], де за допомогою генетичного алгоритму розраховуються коефіцієнти PID-регулятора, який своєю чергою регулює та оптимізує величину кроку для P&O. Це дозволяє ефективніше відпрацьовувати раптові зміни освітленості, а також зменшувати пульсації на виході в порівнянні зі звичайним P&O.

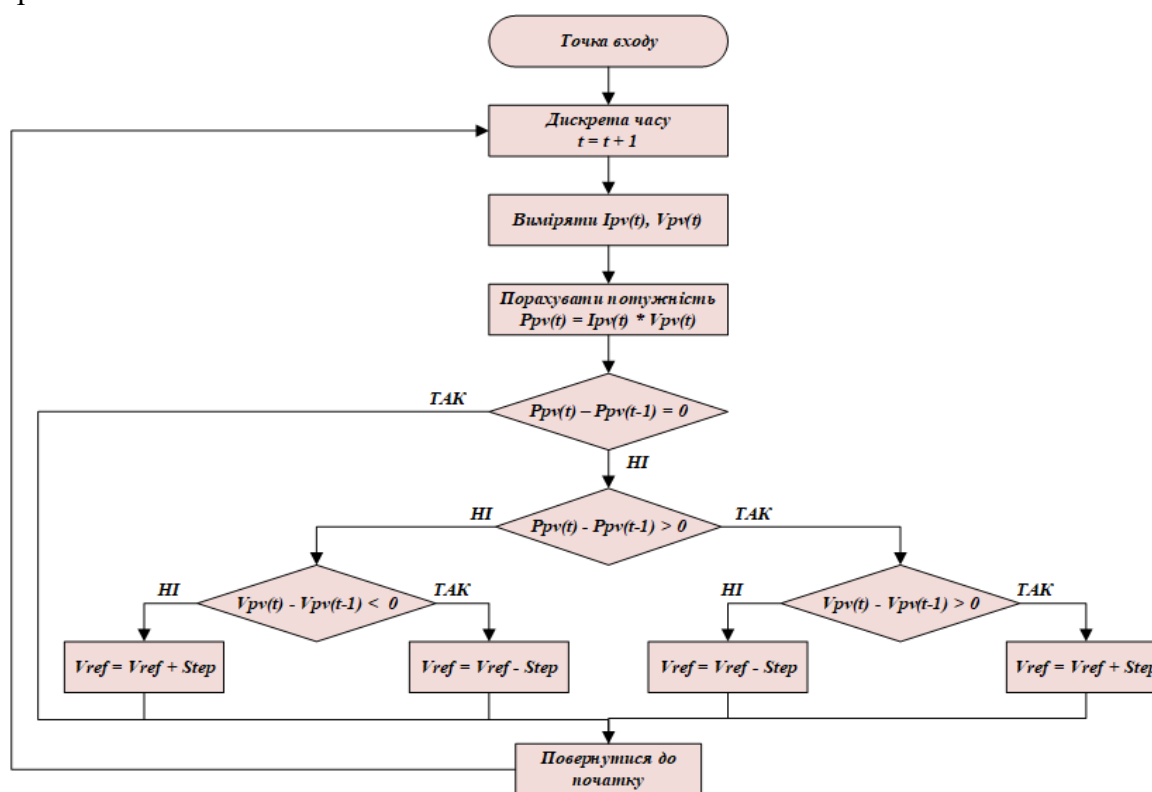


Рис. 9. Схема P&O-алгоритму

Incremental Conductance (InC)-алгоритм. Він поширений не менше, ніж P&O-алгоритм, та є дещо схожим у сенсі порівняння двох величин і відповідної зміни опорного значення напруги. Схема InC-алгоритму наведена на рис. 10.

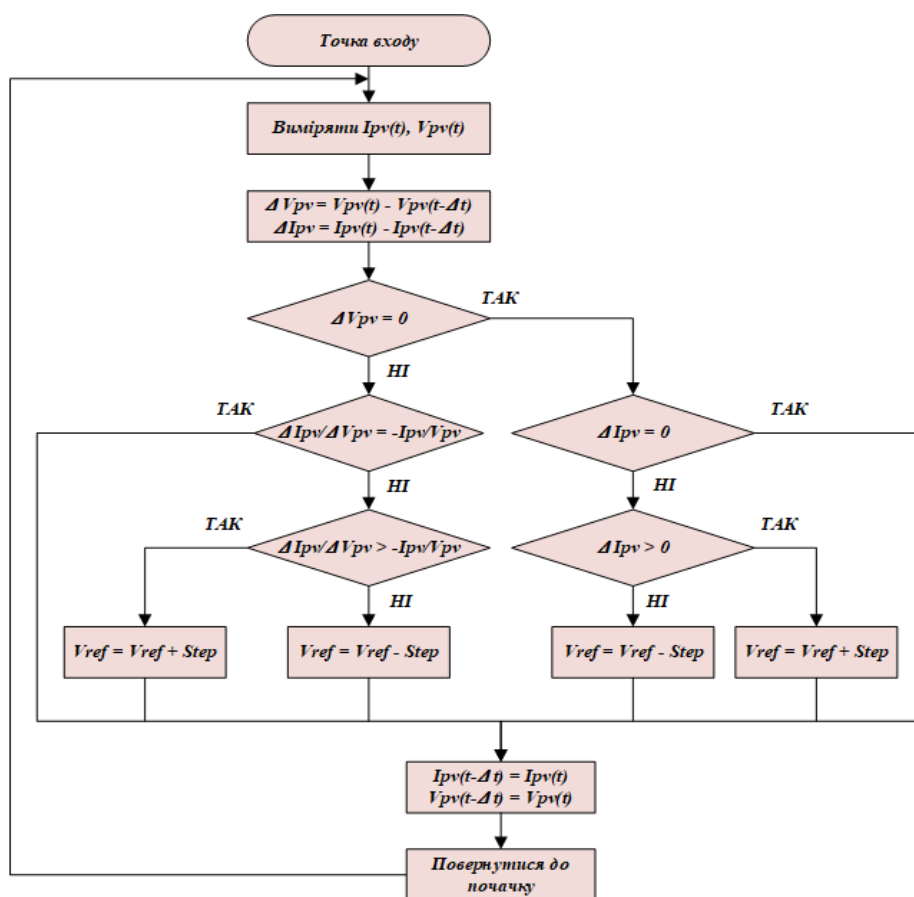


Рис. 10. Схема InC-алгоритму

InC-алгоритм базується на диференціюванні потужності СП по напрузі. Якщо результат такого диференціювання рівний нулю (або близький до нього), то можна вважати, що точка MPP знайдена:

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(V_{PV} \cdot I_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \cdot \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0, \tag{12}$$

Вираз (12) спрощується до рівності миттєвої та зростаючої провідності:

$$\frac{I_{PV}}{V_{PV}} = -\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}}, \tag{13}$$

Значення dV_{PV} та dI_{PV} апроксимують до таких значень ΔV_{PV} , ΔI_{PV} :

$$dV_{PV}(t_2) \approx \Delta V_{PV}(t_2) = V_{PV}(t_2) - V_{PV}(t_1) \tag{14}$$

$$dI_{PV}(t_2) \approx \Delta I_{PV}(t_2) = I_{PV}(t_2) - I_{PV}(t_1) \tag{15}$$

Звідси можна отримати систему нерівностей провідності, що описує поточне положення на P-V характеристиці. Як бачимо (рис. 11), умова A системи відповідає знаходженню в точці MPP, умова B – зліва від точки MPP, а умова C – справа від неї.

На відміну від P&O-алгоритму, InC-алгоритм має нижчі пульсації біля точки MPP. При її досягненні він залишається в робочій точці (а P&O-алгоритм продовжує працювати і вносить пульсації). Також InC-алгоритм більш ефективно спрацьовує за різких змін погодних умов [25]. Найвні недоліки алгоритму приховуються в розмірі кроку, в більших обчислювальних ресурсах для диференціювання, а у випадку використання апроксимованих значень ΔV_{PV} , ΔI_{PV} замість диференційних, не буде змоги відстежувати різкі зміни освітленості. Тому застосовують різні модифікації InC-алгоритму для підвищення ефективності його використання.

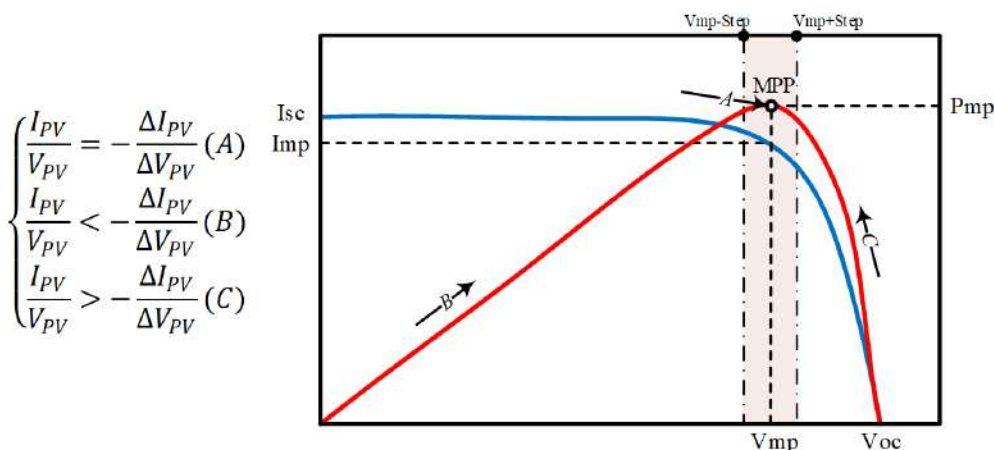


Рис. 11. Система нерівностей провідності та графіки P-V (червона крива) і I-V (синя крива) для СП

Fuzzy Logic Control (FLC)-алгоритм. Даний алгоритм базується на одній із математичних концепцій теорії автоматичного керування, а саме, нечіткій логіці (Fuzzy Logic). FLC-алгоритм дозволяє ефективно працювати при значних нелінійних складових системи та широкому діапазоні збурень, що відповідає процесу перетворення сонячної енергії в електричну. До переваг FLC відносять адаптивність та швидкість роботи у випадку різкої зміни погодних умов, а також простоту реалізації, що не вимагає знання структури моделі системи для точного керування. Така система є більш надійною, ніж попередні розглянуті. FLC як алгоритм «грубого» регулювання доцільно комбінувати у використанні з іншими алгоритмами, особливо, в поєднанні зі штучними нейронними мережами [4].

Алгоритм FLC виконується в три стадії (рис. 12): *фазифікація*, проходження через *механізм виведення* на основі певного набору нечітких правил, та завершальна стадія – *дефазифікація*. На стадії фазифікації вхідні числові значення, які в межах FLC називають чіткими значеннями, проходять процес перетворення до нечітких (лінгвістичних) значень. За допомогою цих змінних визначаються *функції приналежності*. Існує п'ять типів функцій належності нормальних нечітких множин – s, π, γ, t, L, що відрізняються між собою за формою кривих, які представляють графіки цих функцій. Популярними кривим є трапецієподібна, трикутна, гауссова, сигмоїдальна, поліноміальна та інтервальна.

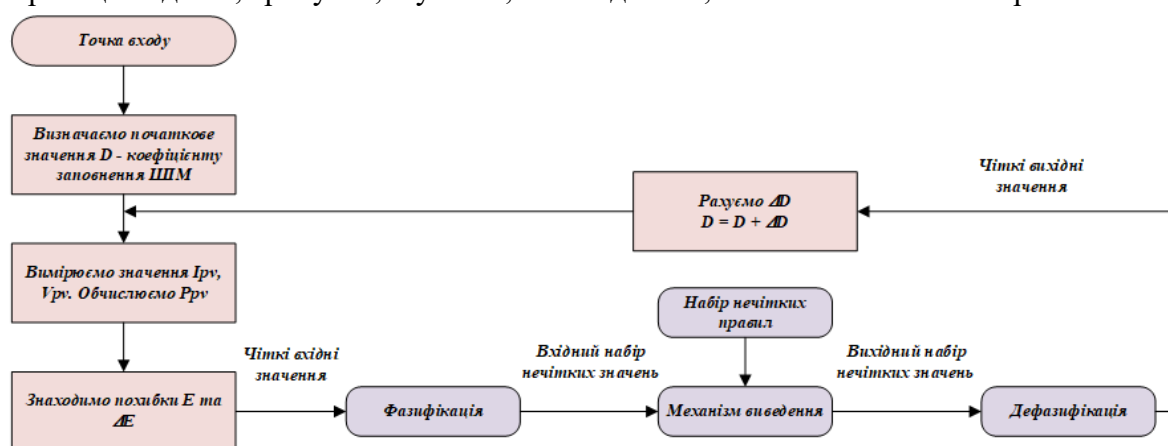


Рис. 12. Схема FLC-алгоритму

В основному, прийнято застосовувати п'ять ступенів належності для однієї лінгвістичної змінної. Якщо їх більше, то це призводить до ускладнення нечіткої системи. Якщо менше, то це зменшує точність обчислення вихідних значень [26]. Такі ступені називають Negative Big (NB), Negative Small (NS), Zero (ZE), Positive Small (PS), Positive Big (PB).

Вхідними значеннями для FLC слугують значення струму I_{pv} та напруги V_{pv} СП, у вигляді помилок E (показує нахил кривої P-V), та ΔE (показує швидкість зміни помилки E в дискретній системі). Помилка E розраховується за рівнянням (16), ΔE за рівнянням (17):

$$E(n) = \frac{V_{pv}(n) \cdot I_{pv}(n) - V_{pv}(n-1) \cdot I_{pv}(n-1)}{V_{pv}(n) - V_{pv}(n-1)} \quad (16)$$

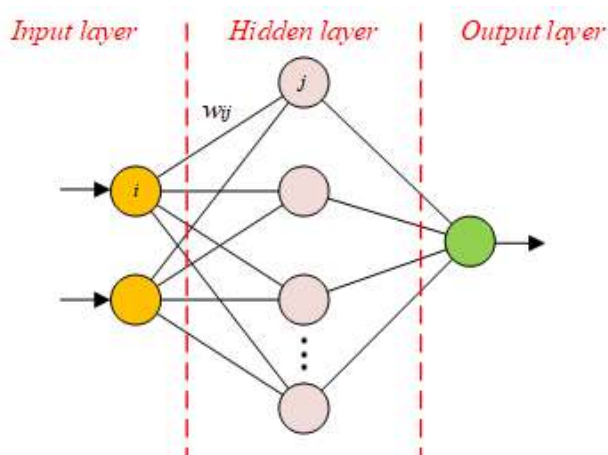
$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \quad (17)$$

Отже, спочатку обчислюються значення E та ΔE , а далі вони під час фазифікації перетворюються на лінгвістичні значення. Ці значення за допомогою набору правил, приклад яких наведено на рис. 13, *a* визначають вихідні нечіткі значення.

Далі йде стадія дефазифікації, на якій за допомогою спеціальних дефазифікаційних методів (Mean of Maximum, Center of Gravity, Center Average), обирається оптимальне чітке значення, що є числовим значенням коефіцієнта заповнення D для ШІМ DC-DC перетворювача.

$\Delta E \backslash E$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

a



б

Рис. 13. Таблиця нечітких правил (*a*) та узагальнена структура ШІМ (*б*)

Як зазначено вище, FLC добре комбінується з іншими алгоритмами МРРТ. Так, у роботах [26], [27], [28] запропоновано та змодельовано алгоритм на основі нейронечіткої системи. Також за допомогою FLC, можна відстежувати не тільки МРР, а можливі помилки та несправності пов'язані з СП. Автори [6] визначили 8 різновидів таких несправностей та способи їх детектування за допомогою FLC.

Artificial Neural Network Control (ANNC)-алгоритм. Як випливає з назви, відстежування точки МРР здійснюється за допомогою штучної нейронної мережі (ШІМ), що складається з окремих нейронів, пов'язаних між собою за допомогою зважених зв'язків. Даний алгоритм базується на таких властивостях нейронів:

- *ваговий коефіцієнт w_{ij}* , налаштовуваний для кожного входу кожного нейрона, що може збуджувати (посилювати, $w_{ij} > 0$), гальмувати (послаблювати, $w_{ij} < 0$), або розривати (встановленням $w_{ij} = 0$) зв'язок між довільною парою нейронів i та j в сусідніх шарах;
- *нелінійна активаційна (вихідна) функція*, що може компенсувати собою нелінійність об'єкта керування, сформувати зону насичення чи зону нечутливості в нейрона. Шаблонами функцій можуть бути обрані такі: гаусіана, сигмоїда, зрізаний лінійний вузол (Rectified Linear Unit, ReLU), Softmax, Swish, порогова, гіперболічний тангенс тощо.

Вектор вхідних значень для ШІМ можуть утворювати як напруги та струми СП, так і температура та освітленість. Структура ШІМ (рис. 13 б), складається з трьох шарів:

вхідний шар (input layer), прихований шар (hidden layer), вихідний шар (output layer). На основі великої вибірки вхідних і необхідних вихідних значень ШНМ зважає зв'язки між вузлами за допомогою процесу *навчання (тренування) ШНМ* з метою конкретизації математичної моделі процесу, яким вона керуватиме. Під час навчання в створеному багатовимірному просторі рішень будується січна поверхня, задача якої – відділяти «правильні» рішення від «неправильних». Порядок такої поверхні залежить від кількості шарів нейронної мережі, а кількість вимірів простору – від кількості вхідних величин. Навчання ШНМ може займати багато часу залежно від обраної кількості нейронів у прихованому шарі, що також впливає на точність результату.

Процес навчання забезпечується алгоритмами, серед яких Supervised Learning, Unsupervised Learning, Reinforcement Learning, Deep Learning, Semi-supervised Learning, Transfer Learning, Supervised Reinforcement Learning та ін. Для *оптимізації навчання* ШНМ існує безліч алгоритмів, зокрема, зворотного розповсюдження помилки, гібридний, градієнтного спуску, Newton's Method, Levenberg-Marquardt algorithm, ADAM (Adaptive Moment Estimation), RMSprop, Rectified ADAM, Lookahead, AdaBelief. У статті [29] запропоновано модифікацію алгоритму Adam, та проведено порівняння з деякими вище зазначеними алгоритмами оптимізації (RMSprop, AdaBelief, Adam). Важливою є оцінка часу тренування ШНМ, хоча це є складною задачею. Вона залежить від багатьох факторів і параметрів (обсяг даних, складність моделі (структура ШНМ, кількість шарів), обраний алгоритм оптимізації, обчислювальна потужність системи).

Запропоновано ANN-алгоритм [22] на основі **двох** ШНМ. Перша за вхідними значеннями температури, напруги та струму СП розраховує значення освітленості, що разом з температурою є вхідним значенням для другої ШНМ. У результаті на виході отримують опорне значення напруги. Так можна заощадити на датчиках освітленості, вартість яких може перевищувати всю систему керування. В роботі [21] проведено порівняння ANN-алгоритму з найбільш простими та поширеними P&O та InC. Шляхом симуляцій показано, наскільки ефективно і якісно відпрацьовує ANN-алгоритм.

Результати аналітичного порівняння. На основі проведеного вище аналітичного огляду складено порівняльну таблицю для розглянутих алгоритмів МРРТ. Для порівняння було обрано такі якісні критерії:

1. Набір датчиків. Кількість та тип основних датчиків, що формуватимуть вектор вхідних параметрів для МРРТ-контролера. V – датчик напруги, I – датчик струму, T – датчик температури навколишнього середовища та/або СП, G – датчик освітленості;

2. Обчислювальна складність. Показує, яку кількість інструкцій мікропроцесора (та їх різновидів) необхідно витратити на виконання однієї ітерації алгоритму. Доцільно порівнювати алгоритми на одній апаратній платформі. Наприклад, в алгоритмі P&O необхідно лише вимірювати V та I , обраховувати значення потужності та порівнювати його з попереднім. У випадку InC необхідно робити те саме, але з додатковим чисельним диференціюванням, що значно підвищує обчислювальну складність;

3. Швидкість відстежування МРР. Цей критерій показує, яку кількість ітерацій алгоритму МРРТ необхідно виконати для знаходження нової МРР за різких збурень, що змінили режим генерації в СП. Суттєво зростає за умови частих та раптових затінь;

4. Точність відстежування МРР. Визначає, наскільки знайдене алгоритмом значення МРР відрізняється від реального значення. Залежить від апаратних можливостей підсистеми вимірювання, повноти опису моделі СП та обраного кроку в алгоритмі;

5. Собівартість. Вартість компонентів системи та складність її виготовлення, складність реалізації алгоритму і витрачений на нього час розробників;

6. Обсяг використаної пам'яті. Кількість постійної та оперативної пам'яті, необхідної для реалізації алгоритму та здійснення обчислень мікропроцесорною системою;

7. Стабільність. Визначає здатність блоку МРРТ забезпечувати навантаження максимально можливою потужністю в умовах різкої зміни збурюючих факторів або невизначеності поведінки навантаження (робастність). Складовими стабільності МРРТ-алгоритму також є: плавність (поступове, але безперервне коригування МРР) та збіжність (направлене відшукування точки МРР, коли кожна наступна ітерація покращує результати попередньої).

Таблиця – Результати порівняння МРРТ алгоритмів

Назва алгоритму	Набір датчиків	Обчислювальна складність	Швидкість відстежування	Точність відстежування	Собівартість	Обсяг використаної пам'яті	Стабільність	Ефективність
Апріорні алгоритми								
OCVT	<i>V</i>	Низька	Низька	Низька	Низька	Низький	Низька	<90%
SCCT	<i>I</i>	Низька	Низька	Низька	Низька	Низький	Низька	<90%
Апостеріорні алгоритми								
P&O	<i>V</i> та <i>I</i>	Низька	Середня	Середня	Середня	Низький	Низька	>95%
InC	<i>V</i> та <i>I</i>	Середня	Середня	Середня	Середня	Низький	Середня	>97%
Інтелектуальні алгоритми								
FLC	<i>V</i> та <i>I</i>	Висока	Висока	Висока	Висока	Високий	Дуже висока	>98%
ANNC	<i>V, I, G, T</i>	Дуже висока	Висока	Висока	Висока / Дуже висока	Дуже високий	Дуже висока	>98%

Для якісних критеріїв обрано ступені оцінки – **низький, середній, високий, дуже високий**. За кількісний критерій оцінювання алгоритму МРРТ обрано **ефективність (%)**, тобто здатність керувати силовою частиною перетворювача з максимально можливим для неї ККД. Коректним є порівняння ефективності алгоритмів, коли вони тестуються на одній топології перетворювача, що працює на однакове за величиною та поведінкою навантаження. На кількісний показник ефективності прямо впливають такі якісні критерії, як точність та швидкість відстежування (формують час, коли після дії збурення система не вийшла на оптимальний режим), а також стабільність.

Висновки. Підсумовуючи викладений та проаналізований у цій роботі матеріал, можна зробити наступні висновки:

1. АЕМ є комплексними системами. У цих системах необхідно проводити дослідження як окремих блоків, так і особливостей їх комбінування та взаємодії. Такі дослідження першочергово повинні бути спрямовані на підвищення загальної ефективності системи (перетворення сонячної енергії у електричну з меншими втратами), а за її досягнення – на покращення інших її параметрів (наприклад, розширення діапазону дозво-

лених напруг/струмів, пришвидшення стабілізації вихідних напруг/струмів, або ж мінімізація їх пульсацій). Надалі досліджуються шляхи здешевлення системи без втрати раніше досягнутої ефективності.

2. Значну кількість досліджень присвячено важливій складовій АЕМ-систем на основі СП – блоку МРРТ, адже він значно покращує ефективність перетворення енергії шляхом відбирання максимально можливої потужності безпосередньо від СП. В першу чергу досліджуються шляхи вдосконалення існуючих алгоритмів МРРТ (зменшення пульсацій біля МРР та підвищення швидкодії за невизначених мінливих збурень) та вибір оптимальної топології напівпровідникового перетворювача в силовій частині МРРТ (для заданих параметрів масиву СП та напруги ланки постійного струму АЕМ).

3. У процесі порівняння основних алгоритмів МРРТ встановлено, що *інтелектуальні алгоритми МРРТ* мають ряд переваг над базовими (простішими) – вищу ефективність, дуже високу стабільність, високу швидкість відстежування та точність знаходження. Але реалізація таких алгоритмів є комплексною і потребує більших обчислювальних ресурсів, що донедавна становило істотну проблему.

4. Враховуючи вичерпні дослідження алгоритмів, що спираються на класичні математичні моделі, можна припустити, що подальші дослідження будуть здебільшого спрямовані на інтелектуальні алгоритми МРРТ. Це дозволить підвищити загальну ефективність АЕМ на основі СП за рахунок розширення переліку та діапазонів факторів впливу навколишнього середовища, а також швидкого реагування на їх раптові зміни (наприклад, знаходження МРРТ в умовах часткового затінення).

Наступним важливим етапом роботи стане багатокритеріальне моделювання АЕМ, а саме її первинної ланки, яка утворена поєднанням трьох блоків – СП, МРРТ та двонаправленого DC/DC перетворювача для зарядки АКБ, де основна увага буде приділена МРРТ. Поточний матеріал слугуватиме основою для подальшої роботи.

Дане дослідження виконується в рамках науково-дослідного проекту молодих вчених «Забезпечення максимальної ефективності автономних електроенергетичних систем на основі фотоелектричних перетворювачів для спеціальних застосувань» №0123U100975 за підтримки Міністерства освіти і науки України.

Список використаних джерел

1. Yershov, R. D. Energy efficiency analysis in distributed electrical networks based on embedded system and combined calculation algorithm / R. D. Yershov, D. O. Naumov, A. S. Revko, K. O. Tytelmaier // International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF). – 2015. – Pp. 1-4. DOI: 10.1109/YSF.2015.7333224.
2. Overview of the Optimal Smart Energy Coordination for Microgrid Applications / Mbungu Nsilulu, Naidoo Raj, Bansal Ramesh, Vahidinasab Vahid // IEEE Access. – 2019. – Pp. 1-1. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2951459.
3. A novel hysteresis power point optimizer for distributed solar power generation / O. Veligorskyi, O. Husev, V. Shevchenko, K. Tytelmaier, R. Yershov, R. Kosenko, D. Vinnikov // Electrical, Control and Communication Engineering. – 2018. – Vol. 14, no. 1. – Pp. 12-22. DOI: <https://doi.org/10.2478/ecce-2018-0002>.
4. Bhukya L. Enhanced Maximum Power Point Techniques for Solar Photovoltaic System under Uniform Insolation and Partial Shading Conditions / L. Bhukya, N.R. Kedika, S.R. Salkuti // A Review. Algorithms. – 2022. – Vol. 15. – P. 365. DOI: <https://doi.org/10.3390/a15100365>.
5. A solar photovoltaic system with ideal efficiency close to the theoretical limit / Zhao Yuan, Sheng Ming-Yu, ZhouWei-Xi, ShenYan, Ertao Hu, Chen Jian-Bo, Zheng Yu-Xiang, Lee Youngpak, Lynch D., Chen Liang-Yao // Optics express. – 2012. – Vol. 20. – A28-38. DOI:10.1364/OE.20.000A28.
6. Marah Bacha. Diagnosis algorithm and detection faults based on fuzzy logic for PV panel / Marah Bacha, Amel Terki // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 51, Part 7. – Pp. 2131-2138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.490>.
7. Development software program for extraction of photovoltaic cell equivalent circuit model parameters based on the Newton–Raphson method / Adak S., Cangi H., Yilmaz A.S. et al. // J Comput Electron. – 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10825-022-01969-8>.

8. Фесенко А. П. Огляд та обґрунтування вибору акумуляторних батарей для автономної системи електроживлення на основі фотоелектричних перетворювачів / А. П. Фесенко, Р. Д. Єршов, С. А. Степенко // *Технічні науки та технології*. – 2021. – № 1(7). – Pp. 177–186.
9. Захарченко Д. Огляд та обґрунтування вибору накопичувачів електроенергії для роботи електроенергетичних об'єктів / Д. Захарченко, С. Степенко // *Технічні науки та технології*. 2021. – № 4(22). – С. 198–209. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4\(22\)-198-209](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4(22)-198-209).
10. Rudy Severns, Springtime Enterprises, Hal Wittlinger. High frequency power converters. Application Note. No. AN9208, Intersil Semiconductor. April 1994.
11. An assessment on performance of DC-DC converters for renewable energy applications / Selvam Sivakumar, Mohamed Ali Jagabar S., Manoj P.s, Sundararajan G. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 58. – Pp. 1475-1485. DOI:10.1016/j.rser.2015.12.057.
12. Static Characteristics of Zero-Current-Switching Quasi-Resonant Boost Converter under Variation of Resonant Circuit and Load Parameters / A. V. Dymerecs, A. N. Gorodny, R. D. Yershov, A. S. Revko, S. A. Stepenko // 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – Kyiv, 2022. – Pp. 357-362. DOI:10.1109/ESS57819.2022.9969266.
13. Dynamic Characteristics of Zero-Current-Switching Quasi-Resonant Boost Converter under Variation of Resonant Circuit and Load Parameters / A. V. Dymerecs, A. N. Gorodny, R. D. Yershov, Y. O. Denisov, O. Roslik, M. M. Tryputen // 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – Pp. 283-288. DOI:10.1109/ESS50319.2020.9160220.
14. Bidirectional cascaded quasi-Z-source DC-DC converter / T. Sato, T. Shimo, T. Takiguchi, H. Koizumi // *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. – Dallas, TX, USA. – 2014. – Pp. 1270-1276. DOI:10.1109/IECON.2014.7048665.
15. Review of Extended Boost qZSI Topologies for Single Phase Applications / J. G. N. Barath, A. Soundararajan, S. Stepenko, S. Padmanaban, A. Prystupa and M. Bolotov // 2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). – Riga, Latvia, 2019. – Pp. 1-8. DOI:10.1109/RTUCON48111.2019.8982342.
16. Yakushin T. V. Modeling of the photovoltaic based energy systems / T. V. Yakushin, S. A. Stepenko // *Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі»: тези доповідей*. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – С. 198-199.
17. Plesz B. Low cost solar irradiation sensor and its thermal behaviour / B. Plesz, Á. Földváry, E. Bándy // *Microelectronics Journal*. – 2011. – Vol. 42, Issue 4. – Pp. 594-600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2010.06.003>.
18. GEUDER, N., et al. Comparison of different methods for measuring solar irradiation data. In: 3rd International Conference on Experiences with Automatic Weather Stations. – Torremolinos, Spain: Spanish National Meteorological Institute, 2003. – p. 19-21.
19. Classification and summarization of solar photovoltaic MPPT techniques: A review based on traditional and intelligent control strategies / Mingxuan Mao, Lichuang Cui, Qianjin Zhang, Ke Guo, Lin Zhou, Han Huang // *Energy Reports*. – 2020. – Vol. 6e – Pp. 1312-1327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.05.013>.
20. Nabil Karami. General review and classification of different MPPT Techniques / Nabil Karami, Nazih Moubayed, Rachid Outbib // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Vol. 68, Part 1. – Pp. 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.132>.
21. Gundogdu Ahmet. ANN-Based MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems / Gundogdu, Ahmet & Celikel, Resat. – 2020. – Vol. 15. – Pp. 101-110.
22. Maximum Power Point Tracking For Pv Systems Using Artificial Neural Networks / Sepulveda Tiago, Martinez Luciana, Pires André. DOI:10.20906/CPS/CBA2018-0327.
23. Belkaid A. Implementation of a modified P&O-MPPT algorithm adapted for varying solar radiation conditions / A. Belkaid, I. Colak, K. Kayisli // *Electr Eng*. – 2017. – Vol. 99. – Pp. 839–846. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-016-0457-3>.
24. Abdelghani Harrag. Variable step size modified P&O MPPT algorithm using GA-based hybrid offline/online PID controller / Abdelghani Harrag, Sabir Messalti // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – Vol. 49. – Pp. 1247-1260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.003>.
25. Xuejun Liu. An improved perturbation and observation maximum power point tracking algorithm for PV arrays / Liu Xuejun, Luiz AC Lopes // 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No. 04CH37551). – 2004. – Vol. 3. – IEEE.

26. Іванець С. А. Дослідження роботи нейронечіткої системи відстеження точки максимальної потужності фотоелектричного перетворювача / С. А. Іванець, О. В. Красножон // Технічні науки та технології. – 2016. – № 3 (5). – С. 146-155.

27. Harrag, Abdelghani. IC-based Variable Step Size Neuro-Fuzzy MPPT Improving PV System Performances / Harrag Abdelghani, Messalti Sabir // Energy Procedia. – 2019. – Vol. 157. – Pp. 362–374. DOI:10.1016/j.egypro.2018.11.201.

28. Heelan Mayada Yousif. International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE) - Design and Simulation of Neuro-Fuzzy Based MPPT Controller for PV Power System / Heelan Mayada Yousif, Al-Qrimli Fadhil Abbas M. – 2020. – Vol. 1–6. DOI:10.1109/ICECCE49384.2020.9179287.

29. Reyad Mohamed. A modified Adam algorithm for deep neural network optimization / Reyad Mohamed, Sarhan Amany, Arafa Mohammad // Neural Computing and Applications. – 2023. – Pp. 1-18. DOI:10.1007/s00521-023-08568-z.

30. Стійкість комбінованої системи накопичення енергії на основі суперконденсатора та акумуляторної батареї / О. Ф. Бондаренко, Ю. В. Кожушко, Т. О. Карбівська, Є. О. Желязков, П. С. Сафронов // Електротехніка і Електромеханіка. 2020. – № 5(11). – С. 31-37. DOI:10.20998/2074-272X.2020.5.05.

References

1. Yershov R.D., Naumov D.O., Revko A.S., & Tytelmaier K.O. (2015). Energy efficiency analysis in distributed electrical networks based on embedded system and combined calculation algorithm. *International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF)* (pp. 1-4). doi:10.1109/YSF.2015.7333224.

2. Mbungu, N. Nsilulu, B. Raj, V. Ramesh, Wahid. (2019). Overview of the Optimal Smart Energy Coordination for Microgrid Applications. *IEEE Access*, 1-1. doi:10.1109/ACCESS.2019.2951459.

3. Veligorskyi, O., Husev, O., Shevchenko, V., Tytelmaier, K., Yershov, R., Kosenko, R., & Vinnikov, D. (2018). A novel hysteresis power point optimizer for distributed solar power generation. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 14(1), 12-22. <https://doi.org/10.2478/ecce-2018-0002>.

4. Bhukya, L., Kedika, N.R., & Salkuti, S.R. (2022). Enhanced Maximum Power Point Techniques for Solar Photovoltaic System under Uniform Insolation and Partial Shading Conditions. *Algorithms*, 15, 365. <https://doi.org/10.3390/a15100365>.

5. Zhao, Y., Sheng, M.-Y., Zhou, W.-X., Shen, Y., Ertao, H., Chen, J.-B., Zheng, Y.-X., Lee, Y., Lynch, D., & Chen, L.-Y. (2012). A solar photovoltaic system with ideal efficiency close to the theoretical limit. *Optics express*, 20, A28-38. doi:10.1364/OE.20.000A28.

6. Bacha, M., Terki, A. (2022). Diagnosis algorithm and detection faults based on fuzzy logic for PV panel. *Materials Today: Proceedings*, 51(7), 2131-2138. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.490>.

7. Adak S., Cangi H., Yilmaz A. S. et al. (2022). Development software program for extraction of photovoltaic cell equivalent circuit model parameters based on the Newton–Raphson method. *J Comput Electron*. <https://doi.org/10.1007/s10825-022-01969-8>.

8. Fesenko, A.P., Yershov, R.D., & Stepenko, S. (2017). Ohliad ta obgruntuvannia vyboru akumuliatornykh batarei dlia avtonomnoi systemy elektrozhyvlennia na osnovi fotoelektrychnykh peretvoriuvachiv [A Review and justification of the choice of batteries for autonomous power supply system based on photovoltaic converters]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (1(7)), 177-186. http://nbuv.gov.ua/UJRN/tnt_2017_1_23.

9. Zakharchenko, D., & Stepenko, S. (2021). Ohliad ta obgruntuvannia vyboru nakopychuvachiv elektroenerhii dlia roboty elektroenerhetychnykh obektiv [Review and justification of the energy storage devices selection for electric power facilities operation]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (4(22)). 198-209. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4\(22\)-198-209](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4(22)-198-209).

10. Severns, R., Enterprises, S., & Wittlinger, H. (1994). High frequency power converters. *Application Note*, No. AN9208, Intersil Semiconductor, 11-178-11-186. https://www.mouser.com/pdfDocs/intersil_high_frequency_power_converters.pdf.

11. Selvam, S., Mohamed, A., Jagabar, S., Manoj, P., & Sundararajan, G. (2016). An assessment on performance of DC-DC converters for renewable energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (58), 1475-1485. doi:10.1016/j.rser.2015.12.057.

12. Dymerecs, A.V., Gorodny, A.N., Yershov, R.D., Revko, A.S., Stepenko, S.A. (2022). Static Characteristics of Zero-Current-Switching Quasi-Resonant Boost Converter under Variation of Resonant Circuit and Load Parameters. *IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. (pp. 357-362). doi:10.1109/ESS57819.2022.9969266.
13. Dymerecs, A.V., Gorodny, A.N., Yershov, R.D., Denisov, Y.O., Roslik, O., & Tryputen, M.M. (2020). Dynamic Characteristics of Zero-Current-Switching Quasi-Resonant Boost Converter under Variation of Resonant Circuit and Load Parameters. *IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)* (pp. 283-288). doi:10.1109/ESS50319.2020.9160220.
14. Sato, T., Shimo, T., Takiguchi, T., & Koizumi, H. (2014). Bidirectional cascaded quasi-Z-source DC-DC converter. *IECON 2014 : 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 1270-1276). doi:10.1109/IECON.2014.7048665.
15. Barath, J.G.N., Soundarajan, A., Stepenko, S., Padmanaban, S., Prystupa, A., & Bolotov, M. (2019). Review of Extended Boost qZSI Topologies for Single Phase Applications. *2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. (pp. 1-8). doi:10.1109/RTUCON48111.2019.8982342.
16. Yakushin, T.V., Stepenko, S.A. (2023). Modeling of the photovoltaic based energy systems. *Newest technologies in scientific activity and educational process : Ukrainian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists : theses of reports* (pp. 198-199). Chernihiv Polytechnic National University.
17. Plesz, B., Földváry, Á., Bándy, E. (2011). Low cost solar irradiation sensor and its thermal behaviour. *Microelectronics Journal*, 42(4), 594-600. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2010.06.003>.
18. Geuder, N., Trieb, F., Schillings, C., & Meyer, R. (2003). Comparison of different methods for measuring solar irradiation data. *3rd International Conference on Experiences with Automatic Weather Stations. Torremolinos* (pp. 19-21). Spanish National Meteorological Institute.
19. Mao, M., Cui, L., Zhang, Q., Guo, K., Zhou, L., & Huang, H. (2020). Classification and summarization of solar photovoltaic MPPT techniques: A review based on traditional and intelligent control strategies. *Energy Reports*, 6, 1312-1327. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.05.013>.
20. Karami, N., Moubayed, N., & Outbib, R. (2017). General review and classification of different MPPT Techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(1), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.132>.
21. Gundogdu, Ahmet, & Celikel, Resat. (2020). ANN-Based MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems. *Turkish Journal of Science & Technology*, (15), 101-110.
22. Sepulveda, T., Martinez, L., & Pires, A. (2018). *Maximum Power Point Tracking for PV Systems Using Artificial Neural Networks*. doi:10.20906/CPS/CBA2018-0327.
23. Belkaid, A., Colak, I., & Kayisli, K. (2017). Implementation of a modified P&O-MPPT algorithm adapted for varying solar radiation conditions. *Electr Eng.*, (99), 839-846. <https://doi.org/10.1007/s00202-016-0457-3>.
24. Harrag, A., Messalti, S. (2015). Variable step size modified P&O MPPT algorithm using GA-based hybrid offline/online PID controller. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 1247-1260. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.003>.
25. Xuejun L., & Luiz A.C. Lopes. (2004). An improved perturbation and observation maximum power point tracking algorithm for PV arrays. *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No. 04CH37551)*, 3.
26. Ivanets, S.A., & Krasnozhan, O.V. (2016). Doslidzhennia roboty neironechitkoi systemy vidstezhennia tochky maksimalnoi potuzhnosti fotoelektrychnoho peretvoriuvacha [The study of work of neuro fuzzy system of tracking the point of maximum power of photovoltaic inference]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (3(5)), 146-155.
27. Abdelghani, H., Sabir, M. (2019). IC-based Variable Step Size Neuro-Fuzzy MPPT Improving PV System Performances. *Energy Procedia*, (157), 362-374. doi:10.1016/j.egypro.2018.11.201.
28. Heelan, M. Y., Al-Q., M Fadhil Abbas. (2020). International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering. *(ICECCE) Design and Simulation of Neuro-Fuzzy Based MPPT Controller for PV Power System* (pp. 1-6). doi:10.1109/ICECCE49384.2020.9179287.
29. Reyad, M., Sarhan, A., & Arafa, M. (2023). A modified Adam algorithm for deep neural network optimization. *Neural Computing and Applications* (pp. 1-18). doi:10.1007/s00521-023-08568-z.

30. Bondarenko, O.F., Kozhushko, Yu.V., Karbivska, T.O., Zheliazkov, Y.O., & Safronov, P.S. (2020). Stiiikist kombinovanoi systemy nakopychennia enerhii na osnovi superkondensatora ta akumu-liatornoi batarei [Stability analysis of hybrid energy storage based on supercapacitor and battery. *El-ektrotekhnika i Elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, (5), 31-37. doi:10.20998/2074-272X.2020.5.05.

Отримано 30.06.23

UDC 621.31:621.383

Tymofii Yakushkin¹, Roman Yershov², Serhii Stepenko³

¹PhD student at the Electrical Engineering, Information and Measurement Technologies Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

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

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

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

ResearcherID: [H-1432-2016](https://orcid.org/0000-0002-0267-2906). SCOPUS Author ID: 57188719994

³PhD 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. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7702-6776>

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

COMPARATIVE ANALYSIS OF TOPOLOGIES AND ALGORITHMS FOR MAXIMUM POWER POINT TRACKERS IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Currently, there is a problem of ensuring a stable electricity supply in Ukraine, caused by the terrorist activities of an insidious neighboring country. Stationary solar power stations consisting of an array of solar panels are one of the most important components of autonomous power networks.

The main functional subsystem in autonomous electrical networks is the power part, and most of its units are connected to the internal DC power link. The task of the controller of the entire system is to keep the voltage in this link stable, which is provided by certain units, depending on the operating mode. It is also convenient to use constant voltage for cascading in order to increase power.

Taking into account the variety of existing topologies and methods of tracking the point of maximum power, the purpose of this work is to review the topologies of converters, classify MPPT algorithms and compare them according to the following criteria: set of sensors, computational complexity, tracking speed, tracking accuracy, cost, amount of used memory, stability, efficiency.

On the basis of the conducted analytical review, a comparative table was compiled for the considered algorithms. In the process of comparing the main MPPT algorithms, it was established that intelligent algorithms have a number of advantages over the basic (simpler) ones - higher efficiency, very high stability, high tracking speed and accuracy of finding. But the implementation of such algorithms is complex and requires more computing resources, which was a significant problem until recently.

Key words: *autonomous electrical networks; maximum power point tracking algorithms; electric power systems; efficiency; comparative analysis; solar panels; topologies of converters; maximum power point; photovoltaic converters; photovoltaic systems.*

Figures: 13. Table: 1. References: 30.

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2023-2(32)-340-354
УДК 620.28:[628.4.038:621]

**Ярослав Ляшок¹, Сергій Подкопаєв², Олексій Повзун³,
Світлана Вірич⁴, Валерій Калиниченко⁵**

¹доктор економічних наук, професор, ректор
Донецький національний технічний університет (Луцьк, Україна)
E-mail: iaroslav.liashok@donntu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7643-8485>. ResearcherID: [M-9725-2019](https://orcid.org/0000-0002-7643-8485)

²доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи
Донецький національний технічний університет (Луцьк, Україна)
E-mail: prof.s.podkopaiev@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3258-9601>. ResearcherID: [B-7422-2019](https://orcid.org/0000-0002-3258-9601)

³кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки
Донецький національний технічний університет (Луцьк, Україна)
E-mail: povzun.aleksey@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8183-9585>. SCOPUS Author ID: [57215584638](https://orcid.org/0000-0001-8183-9585)

⁴кандидат технічних наук, завідувачка кафедри прикладної механіки
Донецький національний технічний університет (Луцьк, Україна)
E-mail: svitlana.viryich@donntu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4734-345X>
SCOPUS Author ID: [57210125718](https://orcid.org/0000-0003-4734-345X)

⁵кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки
Донецький національний технічний університет (Луцьк, Україна)
E-mail: kvv157@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0598-8076>. SCOPUS Author ID: [57215577915](https://orcid.org/0000-0002-0598-8076)

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЛИВАРНОГО ВІДХОДУ МАШИНОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА

У роботі надано технологію ніздрюватого бетону із застосуванням як кремнеземистий компонент ливарного відходу – кондиційованих відпрацьованих формувальних сумішей ливарного виробництва машинобудівних підприємств. За показниками кратності і стійкості піни, а також за впливом складових ніздрюватобетонних сумішей на утворення пор у матеріалі визначено найефективніший піноутворювач. Встановлено оптимальний режим тепловологісної обробки пінобетонних зразків. Обґрунтовано відповідність досліджуваного пінобетону на основі відходу ливарних цехів машинобудівних заводів вимогам державних стандартів України.

Ключові слова: відпрацьовані формувальні суміші; піноутворювач; кратність і стійкість піни; пінобетон.
Рис.: 3. Табл.: 2. Бібл.: 24.

Актуальність теми дослідження. Законом України «Про енергетичну ефективність будівель» [1] визначено, що для поступового підвищення енергетичної ефективності будівель необхідно збільшити кількість будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії [2]. Виконання Національного плану з підвищення кількості таких будівель на 2020-2030 роки передбачено у два етапи [2]:

- I етап (2020-2025 роки) – подолання технічних, організаційних та фінансових проблем на шляху збільшення кількості енергонезалежних будівель;
- II етап (2025-2030 роки) – перехід до обов'язкового дотримання стандартів енергонезалежних будівель щодо всіх об'єктів будівництва та будівель, у яких здійснюється реконструкція [2].

Будівлі в Україні за енергетичною ефективністю поділяють на сім класів (класи А, В, С, D, E, F, G; до класу А належать будівлі з найвищою енергоефективністю, до класу G – з найнижчою енергоефективністю) [3]. Клас енергетичної ефективності будівель визначають як відсоткову різницю між загальним і граничним показниками питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні. Енергонезалежні будівлі повинні відповідати класу енергетичної ефективності не нижче класу «А» [2].

Як і в країнах Європейського Союзу в Україні з метою заощадження енергії і природних ресурсів застосовують нові засади під час проектування енергоефективних будівель. Тому виникає потреба створювати та удосконалювати низькоенергоємне виробництво теплоізоляційних і конструкційно-теплоізоляційних енергоефективних стінових матеріалів. Під «енергоефективними матеріалами» розуміють матеріали, які

сприяють споживанню найменшої кількості енергії за прийнятого рівня енергетичного забезпечення будівель або технологічних процесів на виробництві [1].

Клас енергоефективності (A, B, C, D, E, F, G) теплоізоляційного матеріалу або виробу встановлюється згідно зі значенням показника енергоефективності, який є сумою критеріїв теплопровідності матеріалу, дифузії водяної пари, повітропроникності матеріалу, теплової надійності матеріалу, стійкості матеріалу до механічних навантажень [4].

Постановка проблеми. В Україні житлові будинки споживають до 60 % виробленої енергії, що у 5-6 разів більше на м² експлуатованої площі, ніж у країнах ЄС [5]. Одним зі заходів забезпечення виконання основної вимоги щодо економії енергії та енергетичної ефективності є проєктування конструктивних рішень елементів теплоізоляційної оболонки будівель з урахуванням змін теплофізичних характеристик матеріалів в процесі експлуатації виробів [6].

На сьогодні в Україні і світі будівельна галузь висуває високі вимоги до будівельних матеріалів. У зв'язку з необхідними підвищеними значеннями приведенного опору теплопередачі огорожувальних конструкцій житлових і громадських будівель [7] дедалі більшого поширення набувають технології енергоефективних матеріалів (зі зменшеними затратами паливно-енергетичних ресурсів), які скорочують втрати тепла через огорожувальні конструкції. Матеріали з меншою собівартістю виробництва (відповідно і зі зменшеною ринковою вартістю) є більш конкурентоспроможними (і тому вони заслуговують на особливу увагу).

В Україні проблема відходів вирізняється масштабністю і значущістю внаслідок домінування в національній економіці ресурсоємних багатовідхідних технологій. Широкі масштаби ресурсокористування та енергетично-сировинна спеціалізація національної економіки визначають високі показники утворення та накопичення відходів [8; 9]. На жаль, в Україні спостерігається низький рівень заміщення первинних природних ресурсів внаслідок використання відходів виробництва чи побічних продуктів [8].

Використання промислових відходів та вторинних сировинних ресурсів в енергоощадних технологіях будівельних матеріалів сприятиме зниженню собівартості їх виробництва і є ефективним засобом у боротьбі із забрудненнями навколишнього середовища. Зокрема, утилізація відпрацьованих формувальних сумішей ливарного виробництва машинобудівних заводів дозволить скоротити земельні площі, зайняті цим відходом; знизити розповсюдження пилу з поверхні відвалів на прилеглі до них території; зменшити транспортні витрати на вивезення відходу до відвалів; поліпшити екологічну ситуацію в регіоні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огорожувальні конструкції стандартних будинків мають досить великий коефіцієнт теплопередачі. Це призводить до значних втрат: наприклад, тепловтрати звичайного цегляного будинку становлять 250-350 кВт/год з м² опалювальної площі за рік [10]. Енергозатратні при виробництві й не енергоефективні під час експлуатації традиційні стінові матеріали (цегла керамічна, керамзитобетон, керамзит) витиснені з будівельного ринку через постійне подорожчання енергоносіїв та підвищені значення термічного опору теплопередачі огорожувальних конструкцій [7].

Американський вчений Девід Орт (David Orr) сформулював принципи проєктування і зведення енергоефективної будівлі [11]. Основними складовими пасивного будинку (будинку з наближеним до нульового рівнем споживання енергії) з дотриманням високих стандартів енергоефективності є:

- застосування матеріалів і конструкцій з максимальним опором теплопередачі для скорочення непродуктивних втрат тепла;
- організація припливно-витяжної вентиляції з використанням рекуператорів, що споживають тепло викидного повітря для обігріву, що потрапляє ззовні;
- вживання природних джерел енергії для опалення і гарячого водопостачання (енергії сонця, вітру, термальних підземних джерел).

Відновлення багатотоннажних промислових відходів для виробництва енергоефективних матеріалів сприяє розширенню сировинної бази, економії традиційної сировини, скороченню витрат на виробництво і зниженню цін на будівельні матеріали. Нині на відходи ливарного виробництва припадає більша частина промислових відходів [12]. 90 % твердих відходів ливарних цехів машинобудівних заводів становлять відпрацьовані формувальні та стержневі суміші (горіла земля, горілий пісок), що після вибивання форм не можуть бути використані повторно і вивозяться у відвали, які займають великі земельні площі [13]. Так, для виробництва 1 тонни чавунних виливків витрачається близько 6 тонн формувальних матеріалів (у відвал вивозиться 0,7-1,2 т відпрацьованих сумішей) [14].

Слід зазначити, що вільних місць для складування відходів поблизу підприємств практично немає, а для організації нових відвалів необхідно виділяти нові земельні угіддя. Тому доцільне запровадження ресурсозберігаючої технології – організація технологічного процесу сумішеприготування з використанням відпрацьованих формувальних і стержневих сумішей [15].

Перспективними напрямками розвитку ливарного виробництва є застосування регенерації відпрацьованих сумішей на місцях їх утворення з поверненням (до 95 %) у виробництво, розроблення екологічно безпечних і безвідходних технологічних процесів та обладнання. Основною метою регенерації є відновлення зернового складу горілого піску і видалення плівок зв'язуючого з поверхні його зерен. Найбільше поширення для регенерації, наприклад, холоднотверднучих сумішей набули механічний (вибивання форми, дроблення спечених грудок суміші, охолодження регенерату, пиловидалення) і термомеханічний способи.

Для виготовлення холоднотверднучих сумішей з використанням смоли ОФОС (олігомер на основі олігофурфурилоксисилоксанів) доцільно використовувати збагачений пісок зі вмістом глинистої складової не більше ніж 0,2-0,5 % і основною фракцією піску 0,2-0,315 мм [16]. Міцність сумішей на основі відпрацьованої суміші нижче, ніж на основі свіжого піску. Підвищити міцність таких сумішей можна за рахунок збільшення процентного вмісту смоли та каталізатора [16].

Першорядними критеріями придатності застосування відходу як будівельний матеріал та мінеральну сировину є його радіаційно- та санітарно-гігієнічні параметри. Встановлено [12], що ефективна питома активність природних радіонуклідів у відпрацьованих формувальних сумішах ливарного виробництва становить менше за 370 Бк·кг⁻¹. Згідно з Нормами радіаційної безпеки України НРБУ-97 зазначений відхід відноситься до I класу (тобто його можна використовувати без обмежень для всіх видів будівництва), а за ступенем токсичності – до IV класу небезпеки [17] (тобто є малонебезпечним відходом).

Відвальні ливарні суміші можна використовувати для виробництва безклінкерного шлакового в'язучого, цегли, як компонент сировинної суміші для виготовлення керамічних виробів з тугоплавких глин [18], [19].

За гранулометричним складом значення повних залишків на ситах відпрацьованих формувальних сумішей ливарного виробництва не входять в оптимальну область якісного дрібного заповнювача для важких цементних бетонів. Ці суміші характеризуються підвищеними пустотністю і вмістом пиловидних та глинистих частинок, що призводить до додаткової водопотреби бетонних і розчинних сумішей і зниження міцнісних властивостей. Застосування формувальних сумішей у важких цементних бетонах і розчинах для часткової або повної заміни кварцового піску дозволяє досягти проектних марок за міцність на стиск та вигин без підвищення витрати цементу. Введення у важкі бетони і розчини на основі формувальної суміші пластифікатора С-3 збільшує їх міцнісні показники на 50-75 %, що дає можливість скоригувати витрату цементу у бік його зниження [12].

Відпрацьовані ливарні суміші використовують для влаштування підстильних шарів основ автомобільних доріг [18], а також як складову асфальтобетонних сумішей різних типів [20]. У технологічному процесі приготування пісків з формувальної суміші на Ха-

рківському тракторному заводі вживають мазут. Це призводить до гідрофобізації їх поверхні, про що, зокрема, свідчать значення коефіцієнта фільтрації цих пісків у 2,5-4,0 рази менші в порівнянні з необробленими. Унаслідок цього адгезія бітуму до поверхні формульованого піску становить 80-85 %, а природного – не більше 20 %. Асфальтобетони на основі таких пісків характеризуються підвищеною водостійкістю ($K_v^{28} = 0,80$), міцністю на стиск при 50 °С ($R_{50} = 1,50$ МПа), морозостійкістю ($F_{50} = 0,62$) і зсувостійкістю ($\tau = 0,21$ МПа). Схильність до старіння асфальтобетонів з використанням відпрацьованих формульованих пісків не вища, ніж асфальтобетонів зі звичайним природним піском [20].

Горілу землю застосовують також для влаштування пішохідних доріжок та майданчиків, розрахованих на невелике навантаження; як підсипку під фігурні елементи мощення [18], а також як баластний матеріал для вирівнювання рельєфу місцевості [19].

Аналіз публікацій та досвіду сучасного будівництва показує, що одним із високоефективних стінових матеріалів є ніздрюватий бетон різних видів [21].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Технологічні параметри приготування ніздрюватобетонної суміші з використанням відпрацьованих формульованих сумішей ливарного виробництва не розроблено.

Метою статті є обґрунтування доцільності вироблення поризованого матеріалу на основі відпрацьованих формульованих сумішей ливарних цехів машинобудівних заводів.

Виклад основного матеріалу. Для досліджень прийнято матеріали: як кремнеземистий компонент ніздрюватобетонної суміші відхід ливарного виробництва Дружківського машинобудівного заводу (Донецька область) – відпрацьовані формульовані суміші (для порівняння фізико-механічних властивостей ніздрюватого бетону як кремнеземистий компонент використовували природний кварцовий пісок Часов'ярського родовища Донецької області); портландцемент марки ПЦ400А Краматорського цементного заводу-Пушка Донецької області; вапно Маріупольської Фірми «Азовбудматеріали»; піноутворювачі вітчизняних підприємств-виробників (білково-миловий концентрат – БМК; гідролізний тваринний білок – ПБК; поверхнево активні білкові речовини з функціональними і стабілізаційними добавками – Альпен-ПБ; на основі триетаноламінових солей алкілсульфатів – Софір-ПБ; смола деревна омилена – СДО; мийні засоби (відходи) – ВМЗ); вода для бетонів і розчинів.

Перероблення формульованих сумішей, які були у використанні, має за мету наблизити (відновити) властивості формульованих пісків у їх складі до властивостей свіжих пісків [13]. Перед приготуванням пінобетонної суміші відновлювали відпрацьовані формульовані суміші ливарного виробництва, тобто проводили їх кондиціонування, а саме:

- металеві вclusions (шпильки, брздки, краплі тощо) видаляли за допомогою магнітного сепаратора;
- вилучені з відпрацьованої суміші спечені грудки піддавали роздрібненню у щоківній дробарці, після чого суміш просіювали;
- після висушування розмелювання ливарного відходу провадили у лабораторному кульовому млині.

Регенерація відрізняється від кондиціонування тим, що під час неї обов'язково видаляють плівки зв'язувального компонента із зерен наповнювача [13].

Визначення піноутворювальної здатності розчину піноутворювача, кратності піноутворення, стабільності технічної піни

Технічна піна є дисперсною системою, яка містить комірки – бульбашки газу (пари), що розділені плівками рідини або твердої речовини. Як зазвичай, газ (пара) розглядається як дисперсна фаза, а рідина або тверда речовина – як суцільне дисперсійне середовище. Технологічно перевагу мають піни з рідким дисперсійним середовищем.

Технічну піну готували диспергаційним способом, коли піна утворюється внаслідок інтенсивного спільного диспергування (збивання) піноутворювального розчину і повітря, у високооборотному лабораторному змішувачі впродовж двох хвилин. Для оцінювання піноутворювальних розчинів і приготованих із них пін вживали такі параметри, як об'єм та висоту стовпа піни за певних умов проведення експерименту, співвідношення об'єму або висоти стовпа до вихідного об'єму рідини, тривалість існування об'єму (висоти стовбура) піни тощо.

Визначали такі основні притаманні пінній системі властивості:

1. Піноутворювальна здатність розчину (пінявість) – це кількість піни, виражене її об'ємом (в мл) або висотою стовпа (в мм), яка утворюється з постійного об'єму розчину під час дотримування визначених умов впродовж певного часу.

2. Кратність піноутворення (K), що характеризується коефіцієнтом кратності, який обчислюють як відношення об'єму піни до об'єму робочого розчину піноутворювача, з якого вона утворилася [22], за формулою $K = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{р}}} = \frac{V_{\text{Г}} + V_{\text{р}}}{V_{\text{р}}}$, де $V_{\text{п}}$ – об'єм піни, м³; $V_{\text{Г}}$ – об'єм газу в піні, м³; $V_{\text{р}}$ – об'єм робочого розчину піноутворювача, м³.

Об'єм робочого розчину піноутворювача дорівнював 50-100 мл.

3. Стабільність (стійкість) піни – її здатність зберігати загальний об'єм, дисперсний склад протягом певного часу й перешкоджати витіканню рідини (синерезису). Часто як параметр стабільності піни застосовують час існування (життя) елемента піни (окремої бульбашки, плівки) або певного її об'єму.

Враховуючи те, що технологічно для одержання поризованого матеріалу необхідно, щоб максимальна тривалість існування піни до її зіткнення з іншими компонентами ніздрюватобетонної суміші становила дві хвилини, то її придатність оцінювали як «добра», «задовільна», «незадовільна». Стійкість піни визначали за такою методикою:

- відбирали 200 мл піни у мірний циліндр. Якщо впродовж двох хвилин об'єм не зменшився, то придатність піни «добра»;

- при зменшенні об'єму не більше 25 % (залишилось в циліндрі не менше 150 мл), то придатність піни «задовільна»;

- якщо в циліндрі залишилось менш як 150 мл, то придатність «незадовільна».

Температура розчинів піноутворювачів під час випробувань становила 22±2 °С.

Властивості технічної піни дуже суттєво залежать від концентрації піноутворювача у робочому розчині (бажано здобути оптимальні характеристики піни за мінімальної концентрації піноутворювача).

За однакової концентрації піноутворювача (наприклад, 5 %) найбільшу піноутворювальну здатність має розчин на основі піноутворювача Альпен-ПБ (поверхнево-активні білкові речовини з функціональними і стабілізуючими добавками), коефіцієнт кратності піноутворення > 20 (рис. 1, крива 3).

Найменшу кратність (8) має технічна піна на піноутворювачі ПБК, виробленому в процесі гідролізу тваринного білка з додаванням каніфолі (рис. 1, крива 2). Середнє значення кратності (10) має розчин піноутворювача на смолі деревній омилений (омилена лугом частково конденсована (термооброблена) деревна смола) (рис. 1, крива 5).

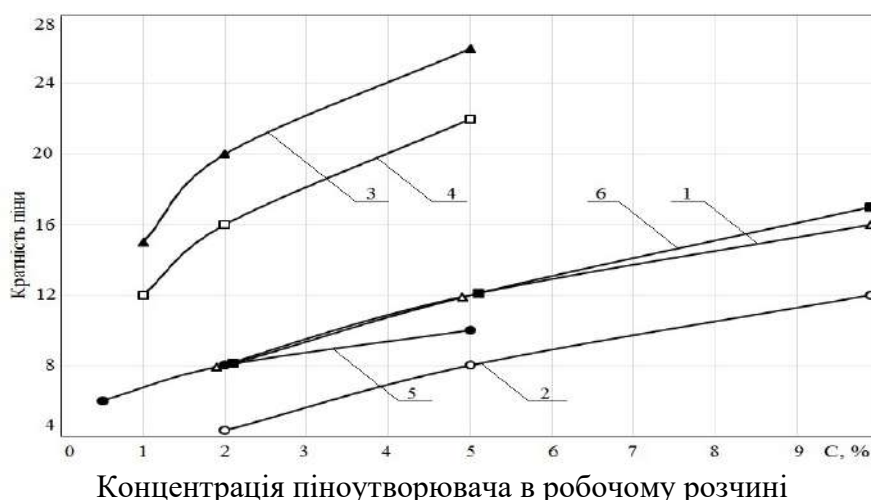


Рис. 1. Залежність кратності піни від концентрації піноутворювача:
1 – БМК; 2 – ПБК; 3 – Альпен-ПБ; 4 – Софір-ПБ; 5 – СДО; 6 – ВМЗ

За будь-якої концентрації піноутворювача в робочому розчині стійкість технічної піни «добра» лише на смолі деревній омилений (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати якісного оцінювання стабільності технічної піни

№ з/п	Марка піноутворювача	Підприємство-виробник піноутворювача	Концентрація піноутворювача у розчині, %	Стабільність (стійкість) піни
1	БМК (містить каніфоль, каустичну соду, столярний кістковий клей)	Приватне підприємство «Сегнетел» (м. Київ)	2,0 5,0	Задовільна Добра
2	ПБК ТУ У 15.6-00418030-001:2007	ТДВ «Лисичанський желатиновий завод» Луганської області	2,0 5,0 10,0	Незадовільна Добра Добра
3	Альпен-ПБ ТУ У 24.6-32740136- 001:2006	ТОВ «Альхім» (м. Вишневе Київської області)	1,0 2,0 5,0	Незадовільна Незадовільна Задовільна
4	Софір-ПБ ТУ У 26.6-32440539-002:2005	ТОВ «Фірма «Союз ЛТД»» (м. Харків)	1,0 2,0 5,0	Незадовільна Незадовільна Задовільна
5	СДО (побічний продукт лісохімічного виробництва) ТУ 13-102810781-93	ТОВ «Термо-Панцер» (м. Черкаси)	0,5 2,0 5,0	Добра Добра Добра
6	ВМЗ ДСТУ 2972:2010 ДСТУ ISO 14024:2018	ВАТ «Фірма СВ» (Харківська область)	2 5	Задовільна Задовільна

Остаточний вибір найефективнішого піноутворювача здійснювали під час приготування ніздрюватобетонної суміші.

Експериментальне дослідження впливу компонентів ніздрюватобетонної суміші на пороутворювальну здатність піноутворювачів

На процес поризації мінеральної маси впливають вид і концентрація піноутворювача, спосіб приготування технічної піни, режим та спосіб перемішування піни й в'язучого, температура суміші, її реологічні властивості. Під час проведення лабораторних досліджень постала задача вибору піноутворювача для одержання піни і спосіб приготування поризованої суміші. За сухої мінералізації, коли сухі компоненти суміші змішують з попередньо приготованою технічною піною, відбувалось її гашення на всіх випробуваних піноутворювачах під час подачі в'язучого. Приготування непоризованого розчину з подальшим його збиванням тягне за собою підвищену витрату піноутворювача, а за попереднього замішування сухих компонентів водою і наступним змішуванням з технічною піною ускладнювалось проникнення піни у замішане в'язуче.

Для поризації суміші було вибрано спосіб одночасної подачі і перемішування всіх складових ніздрюватобетонної суміші: сухих компонентів, води і піни. Для отримання ніздрюватобетонних зразків з використанням різних піноутворювачів технологічні властивості поризованої суміші мають забезпечити:

- скорочення вистоювання сирцю до розрізання і тепловологісної обробки;
- усунення можливості осідання маси;
- набирання сирцем маркової міцності за природного тужавіння або умов тепловологісної обробки;

Піноутворювач повинен відповідати таким основним вимогам, тобто мати:

а) достатню міцність плівок, щоб піна не руйнувалась під час механічного змішування її з мінеральною частиною розчину і забезпечувала б стійкість свіжоприготовленої ніздрюватобетонної суміші, аж до тужавлення в'язучого та утворення доволі міцного скелета бетону;

б) великий вихід щодо взятого розчину (кратність технічної піни) і дрібнодисперсну структуру;

в) достатню в'язкість плівок піни, перешкоджаючи розшаруванню ніздрюватої суміші та як таку, що забезпечуватиме рівномірний розподіл мінеральних частинок по всьому об'єму.

Крім того, піноутворювальний розчин не повинен негативно впливати на фізико-механічні властивості ніздрюватого бетону.

Суміші, що поризовані технічною піною, одержаною з піноутворювачів БМК, Альпен-ПБ та Софір-ПБ, мали велике зсідання, оскільки піна була нестійкою навіть при її приготуванні і частково руйнувалась під час перемішування. Зразки пінобетону, який містив піноутворювачі ПБК та ВМЗ, характеризувались високою середньою густиною (понад 1000 кг/м^3), а при середній густині нижче за 900 кг/м^3 спостерігались неоднорідність суміші і незначне осідання.

Безусадкова однорідна поризована ніздрюватобетонна суміш вийшла з використанням смоли деревної омиленої (СДО); середня густина пінобетону дорівнювала $700\text{-}1000 \text{ кг/м}^3$. СДО відноситься до гідрофобізуювальних поверхневоактивних речовин, відмітною ознакою яких є явно виражена асиметрія їх молекул, збалансованих таким чином, що забезпечується їх дифільність (здатність молекул речовин одночасно виявляти гідрофільні й гідрофобні властивості). Суттєво, що при введенні подібних добавок внутрішня поверхня повітряних порожнин у ніздрюватому бетоні виявляється гідрофобізованою. Поризовану суміш готували за концентрації піноутворювача в робочому розчині в діапазоні від 0,5 до 5,0 %. Як стабілізатор технічної піни вживали СаО.

При застосуванні СДО з концентрацією 1,5-5,0 % значно подовжувалась тривалість тужавіння (набирання пластичної міцності) пінобетонної суміші. За концентрації СДО менше за 1 % поризована суміш мала осідання. Оптимальні властивості ніздрюватобетонна суміш мала за концентрації СДО 1 % у робочому розчині.

Таким чином, з шести досліджуваних у роботі піноутворювачів вітчизняного виробництва найефективнішим виявлено смолу деревну омилену, з використанням якої розроблено технологічні параметри приготування ніздрюватобетонної суміші.

Під час проведення лабораторних досліджень визначено вплив компонентів пінобетонної суміші на пороутворювальну здатність піноутворювача СДО (стійкість технічної піни у ніздрюватобетонній суміші).

До складу пінобетонної суміші входили: портландцемент марки ПЦ400А, кальцієве негашене вапно активністю 72 % і кремнеземистий компонент (кварцовий пісок) питомою поверхнею $270 \text{ м}^2/\text{кг}$. Кількість цементу у складі пінобетону становила від 30 до 50 %, кварцового піску – від 50 до 70 %, вапна – від 0 до 3 %. Вміст піноутворювача і

стабілізатора технічної піни (СаО) за масою складав понад 100 % ніздрюватобетонної суміші. Концентрація кожного піноутворювача у робочому розчині дорівнювала 1 %.

Контрольні формування показали, що:

- зміна складу поризованої суміші у зазначених діапазонах не вплинуло на пороутворювальну здатність піноутворювача;

- заміна у складі поризованої суміші традиційного кремнеземистого компонента (кварцового піску) відпрацьованими формувальними сумішами ливарного виробництва машинобудівних заводів суттєво не вплинуло на фізико-механічні властивості пінобетонної суміші за інших незмінних умов.

Розроблення технологічних параметрів приготування пінобетонної суміші

Спосіб поризації ніздрюватобетонної суміші зумовлюють параметри його здійснення. Враховуючи, що піноутворювач сповільнює процеси гідратації в'язучої речовини, вибраний спосіб поризації суміші має забезпечити пінобетону задовільних характеристик за найменшої витрати піноутворювача. Тому кращим є спосіб приготування одночасної подачі і перемішуванні сухих компонентів, води і технічної піни.

Якщо попередньо приготовано шлам кремнеземистого компонента, то у такому разі шлам перемішують з водою і сухими компонентами, а потім одержану суміш поризують за рахунок введення технічної піни перемішування маси.

У лабораторних умовах кремнеземистий компонент подавали у вигляді сухого порошку питомою поверхнею 270 м²/кг. Для пінобетонної суміші використовували портландцемент марки ПЦ400А, кальцієве негашене вапно активністю 72 %, а як піноутворювач – смолу деревну омилену. Поризовану суміш виливали у форми 0,07×0,07×0,07 м.

Помел кремнеземистого компонента здійснювали в лабораторному кульовому млині.

Склади поризованих сумішей добирали [23] з розрахунку компонентів на 1 кг сухих складових (0,3 кг цементу + 0,7 кг кремнеземистого компонента; 0,4 кг цементу + 0,6 кг кремнеземистого компонента; 0,5 кг цементу + 0,5 кг кремнеземистого компонента) (табл. 2). У складах пінобетонів 1-9 (серії ніздрюватобетонних зразків I-III) як кремнеземистий компонент використовували кварцовий пісок, у складах 10-18 (серії ніздрюватобетонних зразків IV-VI) – відпрацьовані формувальні суміші ливарних цехів машинобудівних підприємств.

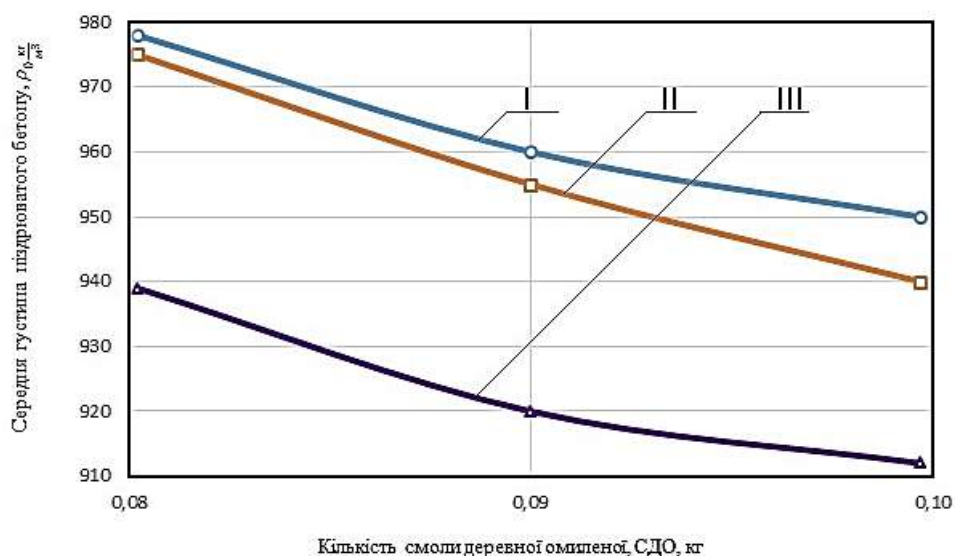
Таблиця 2 – Склади пінобетону

Серія складів бетону	№ складу бетону	Вміст компонентів			піноутворювач, (смола деревна омилена), л	Водотверде відношення, (В/Т)
		цемент, кг	кремнеземистий компонент, кг			
			пісок	відпрацьована формувальна суміш		
I	2	3	4	5	6	7
I	1	0,30	0,70	-	0,08	0,410
	2	0,30	0,70	-	0,09	0,410
	3	0,30	0,70	-	0,10	0,410
II	4	0,40	0,60	-	0,08	0,415
	5	0,40	0,60	-	0,09	0,415
	6	0,40	0,60	-	0,10	0,410
III	7	0,50	0,50	-	0,08	0,420
	8	0,50	0,50	-	0,09	0,420
	9	0,50	0,50	-	0,10	0,420
IV	10	0,30	-	0,70	0,08	0,435
	11	0,30	-	0,70	0,09	0,445
	12	0,30	-	0,70	0,10	0,445
V	13	0,40	-	0,60	0,08	0,440
	14	0,40	-	0,60	0,09	0,440
	15	0,40	-	0,60	0,10	0,445
VI	16	0,50	-	0,50	0,08	0,445
	17	0,50	-	0,50	0,09	0,445
	18	0,50	-	0,50	0,10	0,440

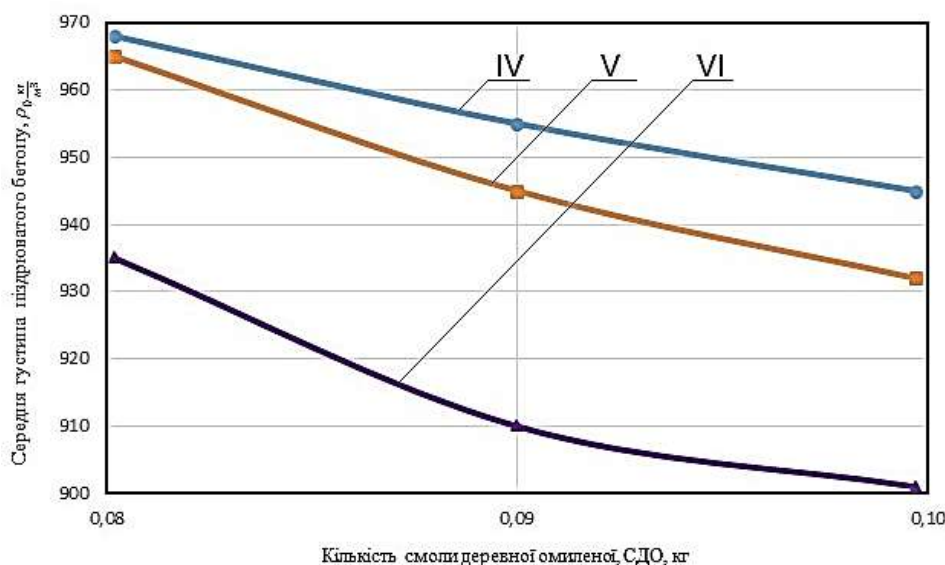
Пінобетонні зразки-куби піддавали термовологісній обробці за експериментально визначеним оптимальним режимом 0,5 + 7,0 + 1,0 (години) – підняття температури + ізо-термічне вистоювання + охолодження.

Як критерії ресурсної цінності відпрацьованих формувальних сумішей прийнято середню густину пінобетону та його межу міцності на стиск [8]. Перед випробуванням зразки-куби 0,07×0,07×0,07 м висушували в електрошафі за температури (105±10) °С до постійної маси).

З підвищенням вмісту смоли деревної омиленої в ніздрюватобетонній суміші середня густина пінобетону закономірно знижується (рис. 2).



а



б

Рис. 2. Залежність середньої густини пінобетону на основі кварцового піску (а) та на основі відпрацьованих формувальних сумішей (б) від кількості смоли деревної омиленої

Незначне зниження середньої густини (у всіх випадках менш за 5 %) викликано заміною крупнішого компонента (питома поверхня кремнеземистого компонента 270 м²/кг) дрібнішим компонентом (питома поверхня цементу, як правило, 400 м²/кг). В такому разі зменшується товщина і, відповідно, маса оболонки кожної бульбашки піни, що призводить до зниження щільності бетону.

Середня густина пінобетону на кварцовому піску на 1,0-1,2 % вища, ніж на відпрацьованих формувальних сумішах.

Значення середньої густини ніздрюватого бетону з використанням ливарного відходу становлять 901-968 кг/м³, що згідно з [24] досліджуваний пінобетон належить до марок D900 і D1000.

З підвищенням вмісту смоли деревної омиленої в ніздрюватобетонній суміші міцність на стиск пінобетону теж закономірно знижується (рис. 3).

При заміні частини кремнеземистого компонента цементом міцність матеріалу збільшується за всіх інших незмінних умов. При постійній середній густині пінобетону міцність підвищилась би більшою мірою, ніж показано на рисунку 3.

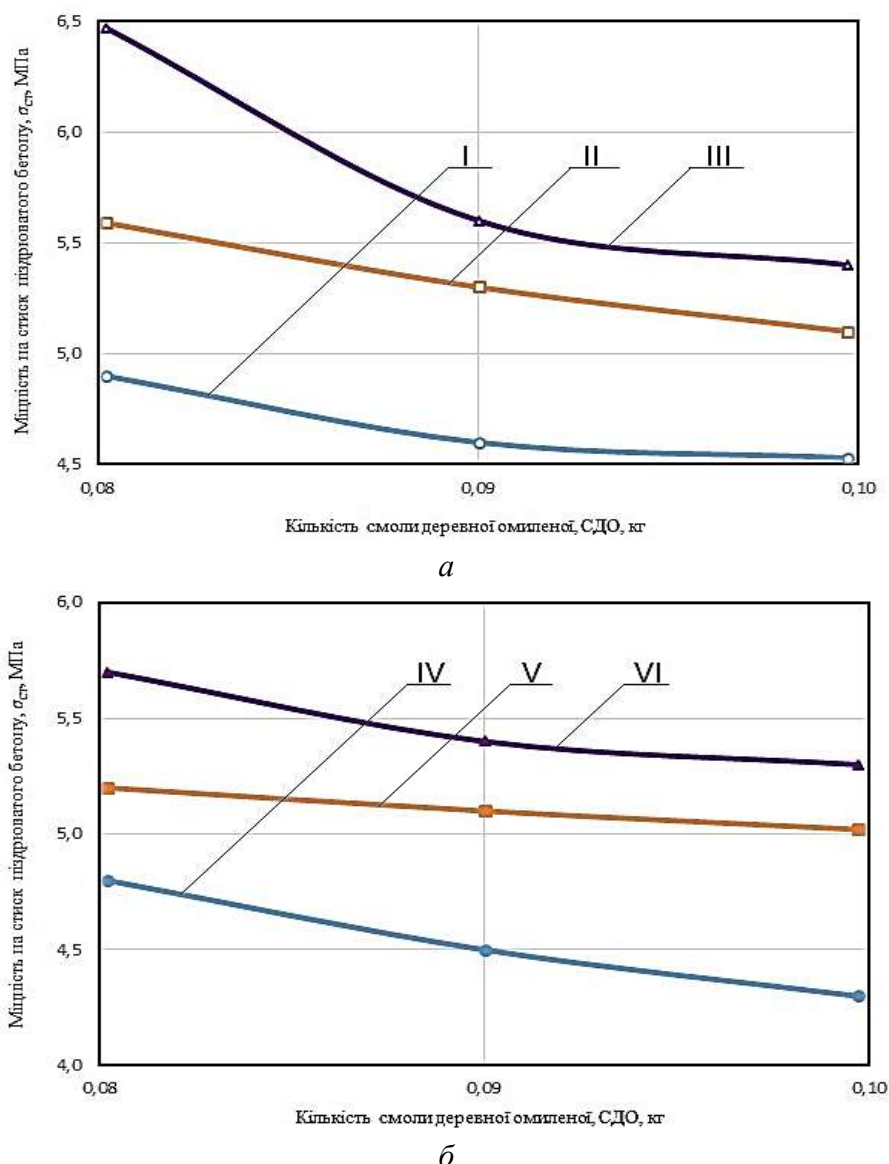


Рис. 3. Залежність міцності на стиск пінобетону на основі кварцового піску (а) та на основі відпрацьованих формувальних сумішей (б) від кількості смоли деревної омиленої

Міцність на стиск пінобетону на основі традиційного кремнеземистого компонента (кварцового піску) в середньому на 7 % вища, ніж на основі відпрацьованих формувальних сумішей, що обумовлено неоднорідністю гранулометричного складу останніх і наявністю на поверхні їх зерен пилоподібної фракції та плівок затверділих зв'язувальних композицій, які залишилися після високотемпературної обробки під час заливання розплавленого металу у форми.

Значення міцності на стиск пінобетону з використанням ливарного відходу складають 4,3-5,7 МПа, що згідно зі Зміною 2 [24] досліджуваній пінобетон належить до класу C3,5 і C5.

Пінобетон марки D900 і класу C3,5 відноситься до конструкційно-теплоізоляційного виду, а пінобетон марки D1000 і класу C5 – до конструкційного [24].

Під час формування пінобетонних зразків на основі відпрацьованих формувальних сумішей набирання пластичної міцності тривало понад 20 годин і спостерігалось осідання ніздрюватобетонної суміші.

Висновки. На підставі визначення властивостей технічної піни (кратність, стабільність) шести піноутворювачів вітчизняних підприємств-виробників різної концентрації робочого розчину виявлено найефективніший піноутворювач – смола деревну омилену.

Розроблено технологічні параметри приготування пінобетонної суміші на основі відпрацьованих формувальних сумішей ливарного виробництва машинобудівних заводів.

Застосування відпрацьованих формувальних сумішей ливарних цехів машинобудівних підприємств як кремненеземистий компонент у ніздрюватих бетонах (для повної заміни традиційного кремнеземистого компонента – кварцового піску) дозволяє досягнути проєктних марок за середньою густиною і межею міцності на стиск пінобетону в сухому стані без підвищення витрати цементу.

Утилізація ливарних відходів машинобудівного виробництва сприяє розв'язанню екологічних проблем і зниженню затрат на виготовлення енергоефективних будівельних матеріалів та виробів.

У подальших дослідженнях доцільно приділити особливу увагу вирішенню завдання скорочення терміну набирання пластичної міцності пінобетонної суміші, а також зменшенню осіданні поризованої маси, що призведе до зниження середньої густини пінобетонних виробів.

Список використаних джерел

1. Про енергетичну ефективність [Електронний ресурс] : Закон України 22. 06. 2017 № 2118-VIII – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>.

2. Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері забезпечення енергетичної ефективності будівель у частині збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії та затвердження Національного плану збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії [Електронний ресурс] : Розпорядження Кабінету Міністрів України № 88-р 29. 01. 2020. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/88-2020-%D1%80#Text>.

3. Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель [Електронний ресурс] : Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України № 169 від 11.07.2018. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0822-18#n14>.

4. ДСТУ-Н Б В.2.6-2019:2016 Настанова з енергетичного маркування будівельних теплоізоляційних матеріалів та виробів [Електронний ресурс] / Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» ; затв. наказом від 02.07.2016 № 212. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=65831.

5. Використання сучасних ефективних утеплювачів для підвищення енергоефективності громадських будівель / Р. О. Тімченко, Д. А. Крішко, В. О. Савенко, В. М. Яблонська // Вісник Криворізького національного університету. – 2022. – Вип. 54. – С 153-158.

6. ДБН В.1.2-11:2021 Енергозбереження та енергоефективність [Електронний ресурс] / Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» ; затв. наказом від 30.12.2021 № 366 Про затвердження державних будівельних норм. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98036.

7. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель [Електронний ресурс] / Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» ; Наказ від 30.12.2021 № 366 Про затвердження державних будівельних норм – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98037.

8. Кваша Т. Перспективні світові наукові та технологічні напрями досліджень у сфері «Відходи»: монографія / Т. Кваша, О. Паладченко, І. Молчанова. – Київ: УкрІНТЕІ, 2020. – 103 с.
9. Guo H. Mixed-indicators model for identifying emerging research areas / H. Guo, S. Weingart, K. Borner // *Scientometrics*. – 2011. – Vol. 89, No 1. – Pp. 421-435.
10. Яценюк О. А. Енергозбереження в житлово-комунальному секторі / О. А. Яценюк // *Містобудування та територіальне планування*. – 2012. – № 45. – С. 373-377.
11. Тимченко Р. А. Использование современных технологий энергосбережения в малоэтажной застройке городов / Р. А. Тимченко, Д. А. Кришко, А. В. Буренкова // *Містобудування та територіальне планування*. – 2015. – Вип. 55. – С. 443-447.
12. Шалевская И. А. Исследование возможности утилизации отходов формовочных смесей / И. А. Шалевская, А. И. Гутько // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. – 2011. – № 4(25). – С. 169-173.
13. Лютий Р. В. Формувальні суміші / Р. В. Лютий, Ш. М. Гурія. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 258 с.
14. Прокопович Л. В. Підвищення екологічної активності відвалів ливарного виробництва: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Л. В. Прокопович; НТУ «КПІ імені І. Сікорського». – Київ, 1999.
15. Використання виробничого потенціалу ливарних цехів у вирішенні завдань екології та охорони праці / В. А. Шаповалов, Л. Н. Світгарєєв, Т. П. Ярош, І. Е. Скідін // *Гірничий вісник*. – 2019. – Вип. 105. – С. 68-74.
16. Евтушенко, Н. С. Исследование свойств регенерируемых смесей на основе ОФОС / Н. С. Евтушенко, О. И. Шинский, О. И. Пономаренко // *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. – 2013. – № 4(34). – С. 48-51.
17. Евтушенко Н. С. Экология литейного производства / Н. С. Евтушенко, О. И. Пономаренко, Л. Н. Чунихина // *Литье. Металлургия*. 2016: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. – 2016. – С. 84-85.
18. Иванова Л. А. Литейное производство как элемент системы техносфера – биосфера / Л. А. Иванова, Л. В. Прокопович // *Экотехнологии и энергосбережение*. – 1997. – № 4. – С. 48-52.
19. Савчук Л. А. Оцінка впливу на навколишнє середовище ливарно-механічного заводу «Горсталь» у м. Горохів / Л. А. Савчук, І. Л. Шевчук // *Екологічні нотатки*. – 2017. – № 4. – С. 23-28.
20. Поясник, Г. В. Пути повышения водоустойчивости асфальтобетонов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г. В. Поясник; Харьковский государственный автомобильно-дорожный технический университет. – Харьков, 1996.
21. Ковальський В. П. Пінобетон на змішаному в'язучому / В. П. Ковальський, І. М. Войтюк, Д. О. Вознюк // *Інноваційні технології в будівництві: зб. матеріалів Міжнар. наук.-тех. конф.* – 2018. – С. 179-182.
22. ДСТУ 3789:2015 Пожежна безпека. Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж. Загальні технічні вимоги та методи випробування [Електронний ресурс] / Український науково-дослідний інститут пожежної безпеки МНС України; затв. наказом від 22.06.2015 № 61 Про прийняття нормативних документів України, гармонізованих з міжнародними та європейськими нормативними документами, національних стандартів України, скасування нормативних документів України та міждержавних стандартів в Україні. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=64357.
23. ДСТУ-Н Б В.2.7.-308:2015 Настанова з виготовлення виробів з ніздрюватого бетону [Електронний ресурс] / Державне підприємство «Український науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут будівельних матеріалів та виробів «НДІБМВ». Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=63751.
24. ДСТУ Б В.2.7.-45:2010 Бетони ніздрюваті [Електронний ресурс] / Державне підприємство «Український науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут будівельних матеріалів та виробів «НДІБМВ» – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=65208.

References

1. Pro enerhetychnu efektyvnist [About energy efficiency], Law of Ukraine № 2118-VIII (2017) (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>.

2. Pro skhvalennia Kontseptsii realizatsii derzhavnoi polityky u sferi zabezpechennia enerhetychnoi efektyvnosti budivel u chastyni zbilshennia kilkosti budivel z blyzkym do nulovoho rivnem spozhyvannia enerhii ta zatverdzhennia Natsionalnogo planu zbilshennia kilkosti budivel z blyzkym do nulovoho rivnem spozhyvannia enerhii [On the approval of the Concept of implementation of the state policy in the field of ensuring the energy efficiency of buildings in terms of increasing the number of buildings with a near-zero level of energy consumption and approval of the National Plan for increasing the number of buildings with a near-zero level of energy consumption], Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 88-r (2020) (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/88-2020-%D1%80#Text>.

3. Pro zatverdzhennia Metodyky vyznachennia enerhetychnoi efektyvnosti budivel [About the approval of the Methodology for determining the energy efficiency of buildings], Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine № 169 (2018) (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0822-18#n14>.

4. Derzhavne pidpriemstvo «Derzhavnyi naukovy doslidnyi instytut budivelnykh konstrukttsii». (2016). Nastanova z enerhetychnoho markuvannia budivelnykh teploizoliatsiinykh materialiv ta vyrobiv [Guideline on energy labeling of construction heat-insulating materials and products] (DSTU-N B V.2.6-2019:2016). Ministerstvo rehionalnogo rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnogo hospodarstva Ukrainy.

5. Timchenko, R.O., Krishko, D.A., Savenko, V.O., & Yablonska, V.M. (2022). Vykorystannia suchasnykh efektyvnykh uteplivachiv dlia pidvyshchennia enerhoefektyvnosti hromadskykh budivel [The use of modern effective insulation materials to increase the energy efficiency of public buildings]. *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnogo universytetu – Bulletin of Kryvyi Rih National University*, (54), 153-158.

6. Derzhavne pidpriemstvo «Derzhavnyi naukovy doslidnyi instytut budivelnykh konstrukttsii». (2021). Enerhozberezhennia ta enerhoefektyvnist [Energy saving and energy efficiency] (DBN V.1.2-11:2021). Ministerstvo rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy.

7. Derzhavne pidpriemstvo «Derzhavnyi naukovy doslidnyi instytut budivelnykh konstrukttsii». (2021). Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel [Thermal insulation and energy efficiency of buildings] (DSTU V.2.6-31:2021). Ministerstvo rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy.

8. Kvasna, T., Paladchenko, O., & Molchanova, I. (2020). *Perspektyvni svitovi naukovi ta tekhnolohichni napriamy doslidzhen u sferi «Vidkhydy» [Perspective global scientific and technological directions of research in the field of «Waste»]*. UkrINTEI.

9. Guo, H., Weingart, S., & Borner, K. (2011). Mixed-indicators model for identifying emerging research areas. *Scientometrics*, 89(1), 421-435.

10. Yatseniuk O.A. (2012) Enerhozberezhennia v zhytlovo-komunalnomu sektori [Energy saving in the residential and communal sector]. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia – Urban planning and territorial planning*, (45), 373-377.

11. Timchenko, R.A., Krishko, D.A., & Burenkova, A.V. (2015). Ispolzovanie sovremennykh tekhnologiy energosberezheniya v maloetazhnoy zastroyke gorodov [The use of modern energy saving technologies in low-rise urban development]. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia – Urban planning and territorial planning*, (55), 443-447.

12. Shalevskaya, I.A., & Gutko, A.I. (2011). Issledovanie vozmozhnosti utilizatsii otkhodov formovochnykh smesey [Study of the possibility of recycling molding sand waste]. *Visnyk Donbaskoi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii – Bulletin of the Donbas State Machine-Building Academy*, (4(25)), 169-173.

13. Liutyi, R.V., & Huriia, Sh.M. (2020). *Formovalni sumishi [Molding mixtures]*. KPI.

14. Prokopovych, L.V. (1999) *Pidvyshchennia ekolohichnoi aktyvnosti vidvaliv lyvarnogo vyrobnytstva [Increasing the environmental activity of foundry dumps]*. NTU «KPI».

15. Shapovalov, V.A., Saithareiev, L.N., Yarosh, T.P., & Skidin, I.E. (2019). Vykorystannia vyrobnychoho potentsialu lyvarnykh tsekhiv u vyrishenni zavdan ekolohii ta okhorony pratsi [Using the production potential of foundries in solving environmental and labor protection problems]. *Hirnychi visnyk – Mining Herald*, (105), 68-74.

16. Yevtushenko, N.S., Shinskiy, O.I., & Ponomarenko, O.I. (2013). Issledovanie svoystv regeneriruemyykh smesey na osnove OFOS [Investigation of properties of regenerated mixtures based on OFOS]. *Kompressornoe i energeticheskoe mashinostroenie – Compressor and power engineering*, (4(34)), 48-51.

17. Yevtushenko, N.S., Ponomarenko, O.I., & Chunikhina, L.N. (2016). Ekologiya liteynogo proizvodstva [Ecology of foundry]. *Lite. Metallurgiya – Casting. Metallurgy*, 84-85.
18. Ivanova, L.A., & Prokopovich, L.V. (1997). Liteynoe proizvodstvo kak element sistemy tekhnosfera – biosfera [Foundry as an element of the technosphere-biosphere system]. *Ekotekhnologii i energosberezhenie – Ecotechnologies and energy saving*, (4), 48-52.
19. Savchuk, L.A., & Shevchuk, I.L. (2017). Otsinka vplyvu na navkolyshnie seredovysheche lyvarno-mekhanichnoho zavodu «Horstal» u m. Horokhiv [Assessment of the impact on the environment of the foundry and mechanical plant «Horstal» in the city of Horohiv]. *Ekologichni notatky – Ecological notes*, (4), 23-28.
20. Poyasnik, G.V. (1996). *Puti povysheniya vodoustoychivosti asfaltobetonov [Ways to improve the water resistance of asphalt concrete]*. KhGADTU.
21. Kovalskyi, V.P., Voitiuk, I.M., & Vozniuk, D.O. (2018). Pinobeton na zmishanomu viazhuchomu [Foam concrete on a mixed binder]. *Innovatsiini tekhnologii v budivnytstvi – Innovative technologies in construction*, 179-182.
22. Ukrainskyi naukovo-doslidnyi instytut pozhezhnoi bezpeky MNS Ukrainy. (2015). Pinoutvoriuvachi zahalnoho pryznachennia dla hasinnia pozhezh [General purpose foaming agents for extinguishing fires] (DSTU 3789:2015). Natsionalnyi orhan standartyzatsii DP «UkrNDNTs».
23. Derzhavne pidpriemstvo «Ukrainskyi naukovo-doslidnyi i proektno-konstruktorskyi instytut budivelnykh materialiv ta vyrobiv «NDIBMV». (2015). Nastanova z vyhotovlennia vyrobiv z nizdriuvatoho betonu [Instructions for manufacturing products from aerated concrete] (DSTU-N B V.2.7.-308:2015). Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy.
24. Derzhavne pidpriemstvo «Ukrainskyi naukovo-doslidnyi i proektno-konstruktorskyi instytut budivelnykh materialiv ta vyrobiv «NDIBMV». (2010). Betony nizdriuvati [Aerated concrete] (DSTU B V.2.7.-45:2010). Ministerstvo rehionalnoho rozvytku ta budivnytstva Ukrainy.

Отримано 12.06.23

UDC 620.28:[628.4.038:621]

**Yaroslav Liashok¹, Serhii Podkopaiev², Oleksii Povzun³,
Svitlana Virych⁴, Valerii Kalynychenko⁵**

¹Doctor of Economic Sciences, Professor, Rector, Donetsk National Technical University (Lutsk, Ukraine)

E-mail: liashov@donntu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7643-8485>. ResearcherID: [M-9725-2019](https://orcid.org/0000-0002-7643-8485)

²Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector in Scientific Work

Donetsk National Technical University (Lutsk, Ukraine)

E-mail: prof.s.podkopaiev@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3258-9601>. ResearcherID: [B-7422-2019](https://orcid.org/0000-0002-3258-9601)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Applied Mechanics

Donetsk National Technical University (Lutsk, Ukraine)

E-mail: povzun.aleksey@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8183-9585>. SCOPUS Author ID: [57215584638](https://orcid.org/0000-0001-8183-9585)

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Applied Mechanics

Donetsk National Technical University (Lutsk, Ukraine)

E-mail: svitlana.virych@donntu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4734-345X>

SCOPUS Author ID: [57210125718](https://orcid.org/0000-0003-4734-345X)

⁵PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Applied Mechanics

Donetsk National Technical University (Lutsk, Ukraine)

E-mail: kvv157@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0598-8076>. SCOPUS Author ID: [57215577915](https://orcid.org/0000-0002-0598-8076)

ENERGY-EFFICIENT MATERIAL WITH THE USE OF MACHINE-BUILDING PRODUCTION FOUNDRY WASTE

In order to save energy and natural resources in Ukraine and the world, new principles are applied during the design of energy-efficient buildings. Therefore, there is a need to create and improve the low-energy production of heat-insulating and structural-heat-insulating energy-efficient wall materials.

One of the measures to ensure the fulfillment of the main requirement for energy saving and energy efficiency is the design of constructive solutions for elements of the thermal insulation shell of buildings, taking into account changes in the thermo-physical characteristics of materials during the operation of the products. The use of industrial waste and secondary raw materials in energy-saving technologies of building materials will help reduce the cost of their production and is an effective means of pollution control.

Energy-consuming during production and inefficient during operation, traditional wall materials (ceramic brick, expanded clay concrete, expanded clay) have been pushed out of the construction market due to the constant increase in the price of energy carriers and increased values of the enclosing structures heat transfer thermal resistance. Analysis of publications and experience of modern construction shows that one of the highly effective wall materials is aerated concrete of various types.

The technological parameters of the aerated concrete mixture preparation using spent molding mixtures of foundry production have not been developed.

The purpose of the article is to substantiate the expediency of producing porous material based on spent molding mixtures from foundries of machine-building plants.

The study of six foaming agents from local production on their foaming ability is presented in the work. The multiplicity of foam formation and the stability of the technical foam prepared on them were determined. The influence of the components of aerated concrete mixture on the pore-forming ability of foaming agents was studied. The technological parameters for the preparation of the powdered mixture using the most effective foaming agent tested in the work - saponified wood resin - have been developed. In terms of physical and mechanical properties, the studied concrete based on spent molding mixtures of foundry construction of machine-building enterprises meets the requirements of the state standards of Ukraine.

On the basis of determining the properties of technical foam (multiplicity, stability) of six foaming agents from local manufacturers with different concentrations of the working solution, the most effective foaming agent was found, which is saponified wood resin. The technological parameters for the preparation of foam concrete mixture based on used molding mixtures from foundry production of machine-building plants have been developed. The implementation of used molding mixtures from foundries of machine-building enterprises as a siliceous component in aerated concrete (for a complete replacement of the traditional siliceous component - quartz sand) makes it possible to achieve required grade for the average density and compressive strength limit of foam concrete in the dry state without increasing cement consumption. Utilization of foundry waste from machine-building production contributes to solving environmental problems and reducing costs for the production of energy-efficient construction materials and products. In further research, it is advisable to pay special attention to solving the problem of reducing set of strength period for foam concrete mixture plastic strength, as well as reducing the settling of the porous mass, which will lead to a decrease in the average density of foam concrete products.

Keywords: spent molding compounds; foaming agent; multiplicity and stability of foam; foam concrete.

Fig.: 3. Table: 2. References: 24.

Олександр Менейлюк¹, Віктор Руссий²

¹доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології будівельного виробництва
Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)

E-mail: pr.mai@ogasa.org.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1007-309X>

ResearcherID: [11952295](https://orcid.org/0000-0002-1007-309X), Scopus Author ID: [57219246915](https://orcid.org/0000-0002-1007-309X)

²здобувач ступеня доктора філософії, асистент кафедр технології будівельного виробництва та хімії та екології
Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)

E-mail: viruswot@odaba.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5884-2097>

ResearcherID: [HNC-2665-2022](https://orcid.org/0000-0002-5884-2097), Scopus Author ID: [57287814900](https://orcid.org/0000-0002-5884-2097)

**АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДИК ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ
ВІДНОВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНИХ БУДІВЕЛЬ**

Десятки тисяч будівель та споруд на території України пошкоджено внаслідок ведення воєнних дій та постійних терористичних атак. Відновлення будівель є трудомістким та витратним процесом і потребує вирішення цілого ланцюгу організаційно-технологічних та інших питань. Процес відновлення супроводжується обмеженістю наявних фінансових, матеріально-технічних та інших ресурсів. Тому аналіз сучасних методик пошуку ефективних рішень з відновлення є актуальним.

У статті виконано аналіз відомих методик, які використовуються для пошуку оптимальних рішень відновлення будівель. А саме: вибору найбільш ефективних конструктивно-технологічних рішень та визначенню оптимальних значень організаційно-економічних показників відновлення.

Проведений аналіз дозволи визначити, що розглянуту методику багатокритеріального аналізу можливо використати для вибору найбільш ефективних конструктивно-технологічних рішень відновлення цегляних стін. За допомогою методики експериментально-статистичного моделювання можливо визначити оптимальні значення організаційно-економічних показників відновлення пошкоджених будівель при накладенні діючих обмежень.

Ключові слова: багатокритеріальний аналіз; організаційно-економічні показники; конструктивно-технологічні рішення; відновлення пошкоджених будівель; оптимізація; експериментально-статистичне моделювання.

Рис.: 1. Бібл.: 29.

Актуальність теми дослідження. Будівлі та споруди на території України постійно піддаються негативному впливу воєнних дій та терористичних атак. Пошкоджено або зруйновано десятки тисяч будівель.

Відновлення пошкоджених будівель – це трудомісткий та високовартісний процес. Крім цього, при виконанні робіт з відновлення наявна обмеженість ресурсів – фінансових, матеріально-технічних та інших. Тому процес відновлення потребує використання найбільш ефективних будівельних рішень із залученням мінімальної кількості ресурсів.

За допомогою використання відомих методик оптимізації можливо вирішити цілий спектр питань із забезпечення ефективності відновлення, розв'язання яких не надається в офіційних нормативних документах та рекомендаціях України.

Тому аналіз сучасних методик пошуку ефективних рішень з відновлення є актуальним.

Постановка проблеми. Можливо застосувати різноманітні рішення при виконанні робіт з комплексного процесу відновлення пошкоджених будівель. Усе залежить від багатьох факторів: характеру та причин отриманих пошкоджень, характеру впливу вибуху, регіональних можливостей будівельних організацій, вимог нормативних документів, обмежень тривалості, фінансування та інших ресурсів. Крім цього, роботи з відновлення можуть проводитись у діючих будівлях та в обмежених просторових умовах.

Вибір найбільш ефективних рішень відновлення пошкоджених будівель повинен враховувати всю вищевказану проблему.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останніх публікаціях проаналізовано пошкодження будівель, отриманих унаслідок воєнних дій, та визначено, що найбільшу кількість пошкоджень отримали безкаркасні цегляні будівлі [1].

Визначено одне з основних супутніх пошкоджень – поява мереж тріщин та вибоїн у стінових конструкціях; традиційні та сучасні технології усунення цих недоліків [2; 3].

Серед наукових досліджень, присвячених різним аспектам вибору технології і організації будівельного виробництва та їх моделювання виділяються роботи О. І. Менейлюка [4-6], В. Р. Млодецького [7], О. А. Тугай [8], В. О. Галушко [9], І. М. Бабія [10], І. С. Чернова [11], Л. В. Лобакової [12], Л. А. Черепашук [13].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попередній аналіз інформаційних джерел дозволив виявити найбільш розповсюджений тип пошкоджених будівель та технології усунення тріщин та вибоїв (основного виду пошкоджень цегляних стін). Однак наявно недостатньо праць щодо використання методик для вибору найбільш ефективних рішень комплексного процесу відновлення пошкоджених внаслідок військових дій будівель. Тому необхідно віднайти сучасні методики, які використовуються для підвищення ефективності комплексного процесу відновлення будівель.

Мета статті. Метою роботи є пошук методик, які можливо використати для вибору найбільш ефективних конструктивно-технологічних рішень та визначенню оптимальних значень організаційно-економічних показників відновлення пошкоджених будівель при накладенні діючих обмежень.

Виклад основного матеріалу. Виконання робіт із відновлення будівель, пошкоджених внаслідок військових дій, супроводжується цілим ланцюгом питань: організаційно-технологічних та конструктивних, умов проведення відновлення будівлі, можливостей матеріально-технічної бази, доступності сучасних технологій тощо. Тому для досягнення максимального результату при проведенні комплексу ремонтно-відновлювальних робіт із відновлення будівель необхідно визначити рівні ефективності застосування конструктивно-технологічних рішень [14-16].

Для визначення рівнів ефективності рішень потрібно виконати аналіз існуючих методів та умов проведення робіт з відновлення будівель [15]. При цьому слід враховувати традиційні та сучасні тенденції будівельного ринку, регіональні особливості та актуальність літературних джерел інформації. Використовувати насамперед такі інформаційні джерела: бібліотеки, наукометричні бази даних, наукові репозиторії тощо. Інформація, знайдена за допомогою інтернет-ресурсів, має кожний раз піддаватися сумнівам та проходити ретельну перевірку на її автентичність. Зокрема, шляхом звернення до експертного середовища, чисельних і натурних досліджень та розрахунків.

За допомогою методики багатокритеріального аналізу [15; 16] можливо визначити рівні ефективності конструктивно-технологічних рішень, що використовуються для комплексного процесу відновлення. Основою багатокритеріального аналізу є пошук конструктивно-технологічних рішень; можливості їх впровадження на тому чи іншому об'єкті будівництва. Для виконання цього завдання аналізуються інформаційні джерела.

Алгоритм вибору ефективних рішень за допомогою багатокритеріального аналізу представлений на рисунку 1 [15; 16].

Після визначення якісних і кількісних оцінок рішень та переведення їх в єдину бальну шкалу, отримані дані включають у «зведені таблиці» в програмному комплексі MS Excel. Надалі, за допомогою функції «зведена діаграма» MS Excel будуються та аналізуються діаграми масиву даних «зведених таблиць» [16]. Таким чином визначаються рівні ефективності кожного з порівнюваних рішень.

Наступним та останнім кроком методики є здійснення та однозначний вибір єдиного конструктивно-технологічного рішення з поетапним обґрунтуванням доцільності його використання [14-16]. Виключення рішень має бути послідовним і внутрішньо несуперечливим [16].

В управлінні будівельними процесами характерною ознакою є множинність рішень. Вибір ефективного рішення ускладнюється швидким розвитком будівельних технологій та методів організації будівництва. Проблему врахування множинності рішень вирішують за допомогою побудування різноманітних моделей.

Модель являє собою абстрактне відображення найбільш впливових властивостей, процесів і взаємозв'язків реальних систем [17; 18]. Модель – це умовний образ об'єкта, сконструйований для спрощення його дослідження [19].

Визначити оптимальні значення організаційно-економічних показників можливо за допомогою побудови певної кількості моделей (наприклад кошторисних та організаційно-технологічних графіків виконання робіт). Моделі створюються за допомогою спеціалізованих програмних комплексів [20].

Інформаційні моделі розрізняють на описові, табличні та ієрархічні. Для визначення ефективних будівельних рішень найбільш наочними є табличні та графічні моделі, зокрема кошторисні розрахунки та графіки виконання робіт [21].

Кошторисні розрахунки відображають дані про технологічні процеси та їх собівартість. Скласти ці розрахунки можливо за допомогою різноманітних кошторисоутворюючих програм: АС-4, АВК-5, АКР-2, АКР-3, ІВК, ТК-ІДС, Експерт-Смета, Смета-Лідер та ін. [20, 22].

Основними графічними моделями служать лінійні графіки, циклограми та мережеві графіки [23].

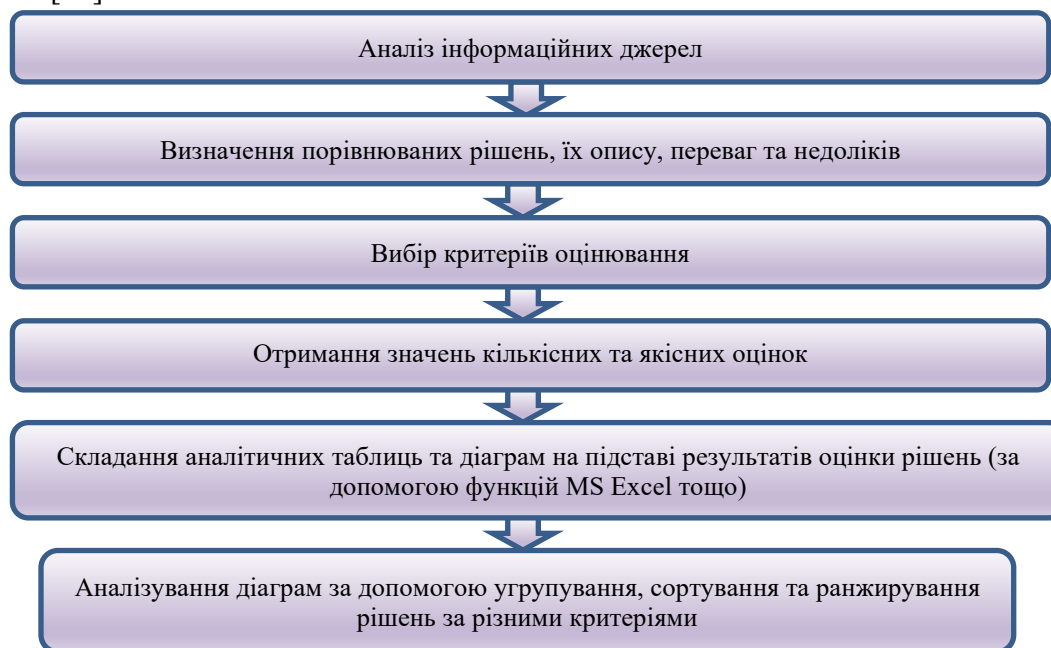


Рис. 1. Алгоритм багатокритеріального аналізу

Вибір програмного засобу при моделюванні здійснюється з урахуванням специфіки процесів відновлення будівель, можливостями його використання на даному об'єкті для вирішення поставлених завдань [24; 25].

Для складання графічних моделей використовують такі спеціалізовані програмні комплекси: MS Project, Primavera, Spider Project, АС-4-Графік, Р6 та ін. [15; 22].

Для проведення оптимізації організаційно-економічних показників відновлення виконується побудова необхідної кількості моделей згідно з обраними планів експериментів. Ці моделі є відображення багатьох аспектів математичної статистики і теорії планування експериментів. Визначити аналітичні та графічні залежності отриманих значень показників відновлення від варійованих факторів можливо отримати за допомогою використання методики експериментально-статистичного моделювання в програмному комплексі ComrEx 2009.01. За допомогою теорії планування експериментів в програмному комплексі ComrEx 2009.01 реалізуються побудовані кошторисні та графічні моделі, виконується їх дослідження – тобто проведення обчислювального експерименту [15; 26]. У результаті виконання аналізу отриманих залежностей можливо віднайти оптимальні значення показників відновлення та відповідні поєднання факторів. Процес пошуку оптимальних значень показників відновлення може включати накладення діючих обмежень на отримані залежності з метою врахування особливостей процесів, що моделюються [22; 27].

Експериментально-статистичне моделювання дозволяє вирішити такі завдання [28; 29]:

- мінімізація витрат інтелектуальних, часових та матеріальних ресурсів при пошуку потрібного інженерного результату;

- підвищення достовірності й інформативності експериментальних досліджень;
- покращення якості продукції та її конкурентної спроможності, пошук шляхів ресурсозбереження при забезпеченні потрібних значень показників якості.

Висновки. Проведений аналіз дозволив встановити існуючі методики, які можливо використовувати для пошуку ефективних рішень комплексного процесу відновлення пошкоджених будівель.

Аналіз сутності розглянутих методик дозволив встановити наступне:

- методику багатокритеріального аналізу можливо використати для вибору найбільш ефективних конструктивно-технологічних рішень відновлення цегляних стін;

- за допомогою методики експериментально-статистичного моделювання можливо визначити оптимальні значення організаційно-економічних показників відновлення пошкоджених будівель при накладенні діючих обмежень.

Список використаних джерел

1. Менеїлюк О. І. Аналіз характерних пошкоджень будівель та споруд отриманих в результаті військових дій. / О. І. Менеїлюк, В. В. Руссий // Збірник тез доповідей 77-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу академії (Одеса, 13-14 трав. 2021 р.). – Одеса : ОДАБА, 2021. – С. 3.

2. Менеїлюк О. І. Традиційні та сучасні технології відновлення цегляних будівель / О. І. Менеїлюк, В. В. Руссий // Нові матеріали і технології в будівництві : зб. тез доп. XXXI всеукр. конф. здобувачів вищ. освіти і молод. вчених (Одеса, 1-2 черв. 2021 р.). – Одеса : ОДАБА, 2021. – С. 359-363.

3. Менеїлюк, А. І. Инновации в строительстве и реконструкции / А. И. Менеїлюк, Т. М. Дубельт, И. А. Менеїлюк. – Київ : ТОВ НВП «Інтерсервіс», 2018. – 650 с.

4. Менеїлюк А. И. Выбор эффективных организационно-технологических решений возведения жилых зданий / А. И. Менеїлюк, И. С. Чернов // Будівельне виробництво. – 2012. – № 54. – С. 98-100.

5. Оптимизация организационно-технологических решений реконструкции высотных инженерных сооружений / А. И. Менеїлюк, М. Н. Ершов, А. Л. Никифоров, И. А. Менеїлюк. – Київ : ТОВ НВП «Інтерсервіс», 2016. – 332 с.

6. Менеїлюк А. И. Изменение экономических показателей проекта по утеплению фасадов зданий путём варьирования организационно технологических факторов / А. И. Менеїлюк, И. Н. Бабий, А. М. Каминская-Пинаева // Будівельне виробництво. – 2015. – № 59. – С. 62-65.

7. Млодецький В. Р. Концепція надійності в організації будівельного виробництва / В. Р. Млодецький // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2014. – № 4. – С. 19-24.

8. Тугай О. А. Календарне планування в сучасних умовах / О. А. Тугай // Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. – Київ : КНУБА, 2015. – Вип. 34. – С. 31-39.

9. Галушко В. А. Исследование технологии закрепления теплоизоляционного материала в фасадных системах / В. А. Галушко, И. Н. Бабий, А. А. Борисов // Forum International pour le Developpement de l'Education et des Sciences. Actes des conferences dans le forum international pour le developpement de l'education et des science en 2009/ CIES 2009/ FIDES 2009/ PH. D/ THESIS 2009 en langues etrangeres. – Paris, France, 2009. – P. 128-131.

10. Бабий И. Н. Влияние организационно-технологических решений и технико-экономические показатели проекта утепления фасадов / И. Н. Бабий, А. И. Каминская-Пинаева // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2016. – № 9 (222). – С. 42-48.

11. Чернов І. С. Вибір ефективних моделей зведення житлових будівель при фінансовій ситуації, що змінюється : автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.08, «Технологія та організація промислового та цивільного будівництва» / І. С. Чернов. – Одеса, 2013. – 20 с.

12. Лобакова Л. В. Організаційне моделювання реконструкції будівель при їх перепрофілюванні : автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.08, «Технологія та організація промислового та цивільного будівництва» / Л. В. Лобакова. – 2016. – 21 с.
13. Черепашук Л. А. Зведення малоповерхових будівель з енергоефективними огорожувальними конструкціями : автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.08, «Технологія та організація промислового та цивільного будівництва» / Л. А. Черепашук. – Одеса, 2018. – 24 с.
14. Меньлюк А. И. Выбор эффективных организационно-технологических решений возведения жилых зданий / А. И. Меньлюк, И. С. Чернов // Будівельне виробництво. – 2012. – № 54. – С. 98-100.
15. Оптимизация организационно-технологических решений реконструкции высотных инженерных сооружений / А. И. Меньлюк, М. Н. Ершов, А. Л. Никифоров, И. А. Меньлюк. – Київ : ТОВ НВП «Інтерсервіс», 2016. – 332 с.
16. Меньлюк А. И. Методичні вказівки з дисципліни «Інновації в будівництві» / А. И. Меньлюк, О. Л. Никифоров. – Одеса : ОДАБА 2018. – 54 с.
17. Kowalski S. M. A Modified Path of Steepest Ascent for Split-Plot Experiments. / S. M. Kowalski, C. M. Borrer, D. C. Montgomery // Journal of Quality Technology. – 2005. – № 37. – Pp. 75-83.
18. Осипов А. Ф. Адаптивные динамически трансформирующиеся технологические системы. Методология проектирования организационно-технологических решений реконструкции зданий : монография / А. Ф. Осипов. – Киев : ФОРМ Ямчинський О. В., 2022. – 393 с.
19. Дорош А. М. Організація будівельного виробництва : навч. посіб. / А. М. Дорош. – Київ : Аграрна освіта, 2011. – 255 с.
20. Lee S. Customer interactive building information modeling for apartment unit design / S. Lee, M. Ha // Automation in Construction. – 2013. – V. 35. – P. 424-430.
21. Ковальчук, Я. О. Технологія та організація будівництва / Я. О. Ковальчук. – Тернопіль : ТНТУ, 2017. – 191 с.
22. Лобакова Л. В. Організаційне моделювання реконструкції будівель при їх перепрофілюванні : автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.08, «Технологія та організація промислового та цивільного будівництва» / Л. В. Лобакова. – Одеса, 2016. – 21 с.
23. Білецький А. А. Організація і технологія будівельних робіт / А. А. Білецький. – Рівне : НУВГП, 2007. – 202 с.
24. Організація будівництва. Теорія і практика організації, планування та управління будівельним виробництвом : навч. посіб. / О. В. Редкін та ін. – Харків : ТОВ «Компанія» СМІТ, 2009. – 304 с.
25. Benoist T. Subcontractors scheduling on residential. Building construction sites / T. Benoist, A. Jeanjean, G. Rochart // Quentin en Yvelines. – France, 2006.
26. Вознесенский, В. А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ / В. А. Вознесенский, Т. В. Ляшенко, Б. Л. Огарков. – Київ : Вища шк., 1989. – 328 с.
27. Using Genetic Algorithms to Generate Mixture-Process Experimental Designs Involving Control and Noise Variables / H. B. Goldfarb, C. M. Borrer, D. C. Montgomery, C. M. Anderson-Cook // Journal of Quality Technology. – 2005. – № 37. – P. 60-74.
28. Ковальов В. В. Систематизація організаційно-технологічних та інших факторів, які впливають на вартість будівництва об'єктів, з урахуванням вимог щодо їх енергоефективності і екологічності / В. В. Ковальов, Т. В. Данилова, С. В. Спіфанцева // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2018. – № 6. – С. 57-64.
29. Вовк С. Н. Математический эксперимент и научное познание / С. Н. Вовк. – Киев : Вища Школа, 1984. – 195 с.

References

1. Meneiliuk, O. I., & Rusysy, V.V. (2021). Analiz kharakternykh poshkodzhen budivel ta sporud otrymanykh v rezultati viiskovykh dii [Analysis of characteristic damage to buildings and structures resulting from military operations]. *Zb. tez dopovidei 77-yi naukovo-tekhnichnoi konferentsii prof.-vykl. skladu akademii– Collection of abstracts of reports of the 77th scientific and technical conference of the professorial staff of the academy* (p. 3). ODABA.
2. Meneiliuk, O.I., & Rusysy, V.V. (2021). Tradytiini ta suchasni tekhnolohii vidnovlennia tshlianykh budivel [Traditional and modern technologies of restoration of brick buildings]. *Zb. tez dopovidei XXXI vseukrainskoi konferentsii здобувачив вищої освіти і молодих вчених «Novi materialy i tekhnolohii v budivnytstvi» – New materials and technologies in construction: coll. theses add. XXXI All-Ukrainian conf. university graduates education and youth. of scientists* (pp. 359-363). ODABA.

3. Meneiliuk, A.I., Dubelt, T.M., Meneiliuk, I.A. (2018). *Innovatsii v stroitelstve i rekonstruktsii [Innovations in construction and reconstruction]*. TOV NVP «Interservis».
4. Meneiliuk, A.I., & Chernov, I.S. (2012). Vybory effektivnykh organizatsionno-tekhnologicheskikh reshenii vozvedeniia zhilykh zdaniy [The choice of effective organizational and technological solutions for the construction of residential buildings]. *Budivelne vyrobnytstvo – Building production*, (54), 98-100.
5. Meneiliuk, A.I., Ershov, M.N., Nikiforov, A.L., & Meneiliuk, I.A. (2016). *Optimizatsiia organizatsionno-tekhnologicheskikh reshenii rekonstruktsii vysotnykh inzhenernykh sooruzhenii [Optimization of organizational and technological solutions for the reconstruction of high-rise engineering structures]*. TOV NVP «Interservis».
6. Meneiliuk, A.I., Babii, I.N., & Kaminskaia-Pinaeva, A.M. (2015). Izmenenie ekonomicheskikh pokazatelei proekta po utepleniu fasadov zdaniy putem varirovaniia organizatsionno tekhnologicheskikh faktorov [Changing the economic indicators of the project for the insulation of facades made by varying the organizational technological factors]. *Budivelne vyrobnytstvo – Building production*, (59), 62-65.
7. Mlodetskyi, V.R. (2014). Kontseptsii nadiinosti v orhanizatsii budivelnoho vyrobnytstva [The concept of reliability in the organization of construction production]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury – Bulletin of the Dnipro State Academy of Construction and Architecture*, (4), 19-24.
8. Tuhai, O.A. (2015). Kalendarnye planuvannia v suchasnykh umovakh [Calendar planning in modern conditions]. *Zb. nauk. prats «Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn» – Ways to increase the efficiency of construction in the conditions of the formation of market relations*, 34, 31-39.
9. Galushko, V.A., Babii, I.N., & Borisov, A.A. (2009). Issledovanie tekhnologii zakrepleniia teploizoliatsionnogo materiala v fasadnykh sistemakh [Study of the technology of fixing heat-insulating material in facade systems]. *Forum International pour le Developpement de l'Education et des Sciences. Actes des conferences dans le forum international pour le developpement de l'education et des science en 2009/ CIES 2009/ FIDES 2009/ PH. D/ THESIS 2009 en langues etrangeres* (pp. 128-131).
10. Babii, I.N., & Kaminskaia-Pinaeva, A.I. (2016). Vliianie organizatsionno-tekhnologicheskikh reshenii i tekhniko-ekonomicheskikh pokazatelei proekta utepleniia fasadov [Influence of organizational and technological decisions and technical and economic indicators of the facade insulation project]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury – Bulletin of the Dnipro State Academy of Construction and Architecture*, (9(222)), 42-48.
11. Chernov, I.S. (2013). *Vybir effektivnykh modelei zvedenniia zhytlovykh budivel pry finansovoi sytuatsii, shcho zminiuietsia [Selection of effective models for the construction of residential buildings in a changing financial situation]* [PhD dissertation; Odesa].
12. Lobakova, L.V. (2016). *Orhanizatsiine modeliuvannia rekonstruktsii budivel pry yikh pereprofiluvanni [Organizational modeling of reconstruction of buildings during their repurposing]* [PhD dissertation; Odesa].
13. Cherepashchuk, L.A. (2018). *Zvedenniia malopoverkhovykh budivel z enerhoefektyvnymy ohorodzhuvalnymy konstruktsiiamy [Construction of low-rise buildings with energy-efficient enclosing structures]* [PhD dissertation; Odesa].
14. Meneiliuk, A.I., & Chernov, I.S. (2012). Vybory effektivnykh organizatsionno-tekhnologicheskikh reshenii vozvedeniia zhilykh zdaniy [The choice of effective organizational and technological solutions for the construction of residential building]. *Budivelne vyrobnytstvo – Building production*, (54), 98-100.
15. Meneiliuk, A.I., Ershov, M.N., Nikiforov, A.L., & Meneiliuk, I.A. (2016). *Optimizatsiia organizatsionno-tekhnologicheskikh reshenii rekonstruktsii vysotnykh inzhenernykh sooruzhenii [Optimization of organizational and technological solutions for the reconstruction of high-rise engineering structures]*. TOV NVP «Interservis».
16. Meneiliuk, A.I., & Nikiforov, O.L. (2018). *Metodychni vkazivky z distsypliny «Innovatsii v budivnytstvi» [Methodical guidelines for the discipline «Innovations in construction»]*. ODABA.
17. Kowalski, S.M., Borrer, C.M., & Montgomery, D.C. (2005). A Modified Path of Steepest Ascent for Split-Plot Experiments. *Journal of Quality Technology*, 37, 75–83.

18. Osypov, A.F. (2022). *Adaptivnye dinamicheski transformiruiushchiesia tekhnologicheskie sistemy. Metodologiya proektirovaniia organizatsionno-tekhnologicheskikh reshenii rekonstruktsii zdaniia* [Adaptive mature transforming technological systems. Methodology for designing organizational and technological solutions for the reconstruction of buildings] (2nd ed.). FOP Yamchynskiy O. V.
19. Dorosh, A.M. (2011). *Orhanizatsiia budivelnoho vyrobnytstva* [Organization of construction production]. Ahrarna osvita.
20. Lee, S., & Ha, M. (2013). Customer interactive building information modeling for apartment unit design. *Automation in Construction*, 35, 424–430.
21. Kovalchuk, Ya.O. (2017). *Tekhnolohiia ta orhanizatsiia budivnytstva* [Construction technology and organization]. TNTU.
22. Lobakova, L.V. (2016). *Orhanizatsiine modeliuвання rekonstruktsii budivel pry yikh pereprofiluванні* [Organizational modeling of reconstruction of buildings during their repurposing] [PhD dissertation; Odesa].
23. Biletskyi, A.A. (2007). *Orhanizatsiia i tekhnolohiia budivelnykh robot* [Organization and technology of construction works]. NUVHP.
24. Redkin, O.V. (2009). *Orhanizatsiia budivnytstva. Teoriia i praktyka orhanizatsii, planuvannya ta upravlinnia budivelnym vyrobnytstvom* [Organization of construction. Theory and practice of organization, planning and management of construction production]. TOV «Kompaniia» SMIT.
25. Benoist, T., Jeanjean, A., & Rochart, G. (2006). *Subcontractors scheduling on residential. Building construction sites*. Quentin en Yvelines.
26. Voznesenskii, V.A., Liashenko, T.V., & Ogarkov, B.L. (1989). *Chislennyye metody resheniia stroitelno-tekhnologicheskikh zadach na EVM* [Numerical methods of solving construction and technological problems on a computer]. Vishcha shkola.
27. Goldfarb, H.B., Borrer, C.M., Montgomery, D.C., & Anderson-Cook, C.M. (2005). Using-Genetic Algorithms to Generate Mixture-Process Experimental Designs Involving Control and Noise Variables. *Journal of Quality Technology*, 37, 60–74.
28. Kovalov, V.V., Danylova, T.V., & Yepifantseva, S.V. (2018). Systematyzatsiia orhanizatsiino-tekhnolohichnykh ta inshykh faktoriv, yaki vplyvaiut na vartist budivnytstva ob'ektiv, z urakhuvanniam vymoh shchodo yikh enerhoefektyvnosti i ekolohichnosti [Systematization of organizational, technological and other factors that affect the cost of construction of objects, taking into account the requirements for their energy efficiency and environmental friendliness]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury – Bulletin of the Dnipro State Academy of Construction and Architecture*, (6), 57–64.
29. Vovk, S.N. (1984). *Matematicheskii eksperiment i nauchnoe poznanie* [Mathematical experiment and scientific knowledge]. Vyshcha Shkola.

Отримано 05.06.23

UDC 69.059:69.003

Oleksandr Menelyuk¹, Victor Russyi²¹Doctor of Science, Professor, Head of the Department of technology of building production

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture (Odessa, Ukraine)

E-mail: pr.mai@ogasa.org.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1007-309X>ResearcherID: [11952295](https://orcid.org/11952295), Scopus Author ID: [57219246915](https://orcid.org/57219246915)²PhD student, assistant of the departments of technology of construction and of chemistry and ecology

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture (Odessa, Ukraine).

E-mail: viruswot@odaba.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5884-2097>ResearcherID: [HHC-2665-2022](https://orcid.org/HHC-2665-2022), Scopus Author ID: [57287814900](https://orcid.org/57287814900)**ANALYSIS OF KNOWN METHODS FOR FINDING OPTIMAL SOLUTIONS FOR THE RESTORATION OF DAMAGED BUILDINGS**

Dozens of thousands of buildings and structures in Ukraine have been damaged as a result of military actions and constant terrorist attacks. The recovery of buildings is a labor-intensive and costly process that requires addressing a whole range of organizational and technological issues. The recovering process is constrained by limited financial, material, technical, and other resources. Therefore, the analysis of modern methods for finding effective recovering solutions is relevant.

Preliminary analysis of information sources has revealed the most common type of damaged buildings and technologies for crack and cavity removal (main types of damage to brick walls). However, there is insufficient research on the use of methods for selecting the most effective solutions for the comprehensive recovering process of buildings damaged by military actions. Hence, it is necessary to identify contemporary methodologies used to enhance the efficiency of the comprehensive recovering process of damaged buildings.

This article presents an analysis of known methods used for finding optimal solutions, specifically, selecting the most effective structural and technological solutions and determining the optimal values of organizational and economic indicators for recovering.

The conducted analysis allowed identifying existing methodologies that can be used for finding effective solutions in the comprehensive recovering process of damaged buildings.

The analysis revealed that the considered multi-criteria analysis methodology can be employed to select the most effective structural and technological solutions for the recovering of brick walls. The experimental-statistical modeling methodology can be used to determine the optimal values of organizational and economic indicators for the recovering of damaged buildings while imposing existing constraints.

Keywords: multicriteria analysis; organizational and economic indicators; constructive-technological solutions; reconstruction of damaged buildings; optimization; experimental and statistical modeling.

Fig.: 1. References: 29.

Mykhailo Fys¹, Yurii Hubar², Andrii Brydun³, Andrii Sohor⁴

¹Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Cartography and Geospatial Modelling
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: mykhailo.m.fys@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8956-2293>

ResearcherID: [AAB-9528-2020](https://orcid.org/0000-0001-8956-2293). Scopus Author ID: [36091174500](https://orcid.org/0000-0001-8956-2293)

²Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Cadastre of Territory
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: yurii.p.hubar@lpnu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2538-0727>

ResearcherID: [ABZ-0251-2022](http://orcid.org/0000-0003-2538-0727). Scopus Author ID: [57224950139](http://orcid.org/0000-0003-2538-0727)

³PhD in Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor of the Department of Cartography and Geospatial Modelling
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: andrii.m.brydun@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5634-0512>

ResearcherID: [AAC-1271-2020](https://orcid.org/0000-0001-5634-0512). Scopus Author ID: [57212560353](https://orcid.org/0000-0001-5634-0512)

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Cartography and Geospatial Modelling
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: andrii.r.sohor@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0084-9552>

ResearcherID: [ABI-6288-2020](https://orcid.org/0000-0002-0084-9552). Scopus Author ID: [57224950613](https://orcid.org/0000-0002-0084-9552)

**COMPARISON AND ACCURACY OF THE METHODS
FOR DETERMINING THE AREA OF PARCELS**

The method of work is to perform a comparative analysis of the methods of determining the area of land plots. Research methods were performed: calculation of the area of land plots on the physical surface of the ellipsoid; calculation of the area of the horizontal projection of the land plot; Calculation of the area of the physical surface of land plots, as well as through practical implementation, the stated theoretical studies were confirmed. The performed calculations indicate that the results of calculating the physical areas of land plots using different coordinate systems are practically the same. However, the difference between the results obtained by dividing the land plot into triangles and the results of increasing the area of physical surfaces by the coordinates of the top reaches a value of approximately 1%. The reason for these discrepancies arises from the fact that all the vertices of the polygon lie on the same area, and when dividing this polygon (land plot) into triangles, the different slope of the land surface in different places of the land plot is taken into account. Calculation of the area of real estate objects must be performed simultaneously with an assessment of the accuracy of the results obtained. Accuracy assessment is characterized by the reliability of area information and also ensures making correct decisions about changes to the original data when re-determining the area. The work proves that during the procedure of buying and selling land plots at their market value, the purpose of land acquisition is: in one case, the horizontal dimensions of land plots are important; in the second - the dimensions of the area of physical surfaces. Thus, in agriculture, the horizontal area determines the number of upright plants, and the size of the area of the physical surface of the land affects the amount of work related to its cultivation, and therefore in land management, cadastre, and real estate evaluation, it is appropriate to use the area of the horizontal projection and the physical surface of the land plot.

Keywords: area of the land plot; physical surface of the ellipsoid; horizontal projection of the land plot; real estate object; cadastre; land management; real estate evaluation.

Fig.: 3. Table: 8. References: 22.

Introduction. One of the main parameters entered into the state land cadastre of real estate is the area of parcels. The value of this attribute is decisive in the monetary evaluation of objects, thus they are used to solve fiscal problems, record land resources and real estate objects and their number, distribution among owners and other participants in market relations. They also serve as the basis for analytical processing in order to prepare the necessary data for management decisions. It is the implementation of the procedure of sale and purchase of real estate that requires accurate area sizes, as it actually determines the market value, and the deviation of these values is likely to lead to a false price and even escalate into litigation. The area value of parcels depends on their location on the physical surface, i.e the earth's surface taking into account its terrain; on the horizontal projection of the parcel; projection on the surface of the earth ellipsoid and the geodetic parcel (the image of the parcel in the adopted projection, usually in the transverse Mercator map projection [1]).

Therefore, depending on tasks set, one of the above options is used. Nowadays, as documents on the rights to parcels include the area of the geodetic site obtained when measuring by means of cartographic-topographic materials, the subsequent calculations take it as a basis. Moreover, in choosing the local coordinate system, the average terrain level is considered as

the relativity surface, due to which the values of the geodetic and horizontal areas are practically the same. The total value of monetary proceeds from the parcel sale is determined in this case as the sum of the areas of these horizontal areas with a possible coefficient of their value.

Analysis of literature. Yu. H. Batrakov, V. D. Baranovskyy, V. N. Hanshyn, V. I. Hladkykh, Yu. P. Hubar, Yu. A. Karpinskyy, A. A. Lyashchenko, A. V. Maslov, M. M. Fys and many others dedicated their works to the development of methods for determining and estimating the accuracy of land areas.

Requirements for the accuracy of determining the area of parcels are related to the cost of natural resources. Some standards for accuracy are given in [2; 3]. In particular, the accuracy of calculating the area of parcels in the process of drafting a project for their allocation for use or for the issuance of a deed of ownership is characterized by relative error $m_p/P = 1/1000$. For large areas, such as agricultural land or forestry, this error can amount to 1/500. Therefore, depending on the dimensions and configuration of the parcel and on the requirements for accuracy, a particular way to determine its area will be used.

In 1995, the FIG enacted the statement, where the cadastre is defined as a site-based land information system that contains up-to-date information on rights and restrictions on land rights. This system includes a geometric description of land parcels and other information about these parcels, including information about their value. It can be used for fiscal purposes (assessment and taxation), legal purposes (transfer of rights under agreements), spatial planning purposes and to promote sustainable development and environmental protection. This resolution, in particular, recommends the use of a systematic approach to land registration as the most effective one compared to the sporadic approach. Thus, FIG has set a standard that many countries worldwide have begun to follow, mainly due to the development of technology. The cadastre concept developed by FIG has proven its potential in different parts of the world [4].

Cooperation between FIG and UN organizations increased markedly in the second half of the 1990s. This is evidenced by the adoption of the Bogor Declaration by international experts in the field of cadastre in 1996 in Bogor (Indonesia). For the first time, the Bogor Declaration officially recognized cadastral systems to be a critical element of infrastructure that supports solutions to sustainable development and natural resource management.

At the Bathurst Conference (Bathurst, Australia, 1999), the key issues related to strengthening land policy, institutions, and cadastral infrastructure were considered. The Declaration on Land Administration for Sustainable Development adopted at this conference created a strong link between efficient land administration and sustainable development and offered a number of recommendations on land use development and infrastructure [4; 5].

Since the cadastral systems of different countries differed functionally in content, architecture, technical performance, and economic efficiency, there was a need to develop a concept for further development of these systems in terms of versatility and technological improvement.

The development of land relations, especially land commodification, has increased the role of a cadastre in the theory of land management. In 1980, the US National Research Council published a study entitled "The Need for a Multi-Purpose Cadastre," which described a cadastral system that would integrate cartographic and land management functions based on the use of a geodetic basis. The need to create such a system marked the beginning of a new era in the development of land administration. Now all over the world, the main focus is on the technology of creating multipurpose inventories rather than justifying the need to create them. A multipurpose cadastre is a register containing many attributes of land [6].

Modern theory of land administration defines the cadastre (cadastral systems) as a central tool of spatial infrastructure of the state and emphasizes its central role in the implementation of the paradigm of land management. These systems are multipurpose, as they include land identification, registration of rights and restrictions on land rights, support in real estate valuation and taxation, and administration of current and future land use [4; 7; 8].

Multipurpose cadastral systems support four basic functions: land tenure, land value, land use, and land development. They can also be considered as land administration systems or land-information systems (LIS). LIS is a general concept for all land-related information databases that have one thing in common: the data of these systems relate to a fixed point on, in, or below the earth's surface. LIS is a concept that seeks to integrate into a single system all types of land-related data (cadastral, infrastructural, environmental, socio-economic). Within the framework of such LIS, which requires a lot of work on coordination, standardization, organization, etc., the land cadastre plays the role of a link to which many other systems add or connect their data [4; 5; 9; 10].

The uniqueness of the cadastral potential is that 80% of the information has a spatial component and, therefore, can be associated with the land by means of a unique identifier. Thus, the cadastral layer, consisting of information on land and their affiliation, becomes the core of SDI, which includes layers of data on public infrastructure, hydrology, vegetation, topography, remote sensing data, and dozens of other data [4; 11].

International experience shows that the best option for the transition of land relations to the "land information system" stage is to create a land information system based on a cadastre. In turn, when creating a cadastral system following the defined FIG concept of cadastre, we should focus on addressing several issues. They are the creation of fiscal or legal cadastre; integrated or separate system; creation of a register of rights or a register of documents; choose the concept of common or fixed boundaries; centralized or decentralized system; self-sustaining or budget system; systematic or sporadic approaches to legalizing land rights.

We should note that a cadastre tends to integrate with the real estate registration system and transform into the cadastral accounting system and, therefore, both the cadastral accounting system and created on its basis LIS must comply with the principles of state registration of rights such as mandatory registration; consent; identification of the subject and object of law; publicity; guarantees of rights. The structural elements of LIS must also comply with the principle of legal independence and be a kind of legal register, i.e., a database (information layer) that an evidential character. The court considers the information of such databases (information layers) as evidence; it cannot be annulled other than in the manner prescribed by law [12].

Global drivers will influence the characteristics of future cadastral systems, which include instrumental accuracy, object-oriented design, 3D/4D visualization, real-time information, global connections, and organic characteristics.

Research objective. Considering the area of a parcel, the following options are distinguished: the area of the land surface based on the topography, the area of the horizontal projection of the parcel, the area of the projection of the parcel on the surface of the Earth ellipsoid and the area of the parcel image on the map projection plane (the transverse Mercator map projection). The choice of the option depends on the task. Working with maps and plans, one receives the area of the parcel image in the map projection, which is called the geodetic area. If the axial meridian passes by the parcel and the average level of the territory is considered the surface of relativity, the values of the geodetic area and the horizontal projection of the parcel almost do not differ. In other cases, it is important to know the area of the entire physical surface of the parcel. The calculation of real estate areas should be done in parallel with the evaluation of the accuracy of the results obtained. The estimated accuracy is characterized by the reliability of the area information and also serves to make correct decisions about changes in the original data when the areas are redetermined.

The total area of large territories can be determined as a simple sum of horizontal areas. However, it is more practical to determine them using surveillance aircraft (airplanes, drones, drones, etc.). The areas obtained by both methods cannot be identical, because they describe the parcels differently. Even considering topography as the average level of the terrain only partially takes into account its features. In this regard, there arises a need to study the error in determining the areas by different methods [13], since the variation in their values contributes to estimating the areas differently and thus provides a different income, which, in turn, creates a conflict of interest that may give rise to litigation.

The purpose of the work is to perform a comparative analysis of the methods of determining the area of land plots in order to choose the most optimal method for targeted practical use in various branches of the economy.

Method and/or Theory

Let us outline the methodology for determining the areas of the above options.

I. Calculation of parcel areas on the physical surface of the ellipsoid

The main methods of determining the area P_E on the surface of the ellipsoid include calculation using either a known horizontal projection or a known value of the geodetic area. The horizontal projection of the area P_h is calculated through the results of direct geodetic measurements - distances, angles, and coordinate increments reduced to the horizon plane. Let us investigate the transition from the horizontal projection of the area to its projection on the ellipsoid surface. The transition from horizontal distances of the lines d to their projections s on the surface of the ellipsoid is carried out using the following ratio:

$$\frac{d}{s} = \frac{R + H_m}{R}, \tag{1}$$

where H_m is the average line height above the ellipsoid; R is the average radius of curvature of the Earth ellipsoid.

Ratio (1) can be expressed as follows:

$$d = s + \frac{H_m}{R} \cdot s. \tag{2}$$

The Left and right parts of equation (2) are squared, with irrelevant second-order values discarded, which follows:

$$d^2 \approx s^2 + 2 \cdot \frac{H_m}{R} \cdot s^2. \tag{3}$$

Since the areas are related as squares of the line lengths, the following can be inferred:

$$P_h \approx \left(1 + 2 \cdot \frac{H_m}{R}\right) \cdot P_E. \tag{4}$$

Consequently, with the horizontal projection of the area being known, the transition to the area on the ellipsoid can be performed by the formula:

$$P_Y = P_A - 2 \cdot \frac{H_m}{R} \cdot P_Y \approx P_A - 2 \cdot \frac{H_m}{R} \cdot P_A. \tag{5}$$

Thus,

$$P_E = P_h + \delta P_H, \tag{6}$$

where

$$\delta P_H = -2 \cdot \frac{H_m}{R} \cdot P_A \tag{7}$$

is elevation correction of the parcel area to pass from the area of the horizontal projection to the area on the ellipsoid.

It is essential to examine the conditions that allow the elevation correction δP_H to be neglected. Table 1 shows the calculation of the relative values of the elevation correction $\delta P_H / P$ under different values of the height H_m and $R = 6371$ km.

Table 1 – Calculation of relative values of the elevation correction $\delta P_H / P$

H_m, m	100	300	750	1000	2000	4000	6000	8000
$\delta P_H / P$	1/31855	1/10618	1/4247	1/3186	1/1593	1/796	1/531	1/398

It is known that the correction δP_H can be neglected provided that it is 3-5 times less than the error of the area. As can be inferred from Table 1, with the relative error of the area 1/1000, the correction can be neglected for the height values up to 750m.

With the value of the area P in the transverse Mercator map projection, it is appropriate to introduce the correction [14; 15] to pass to the area on the ellipsoid surface:

$$\delta P_L = -\left(\frac{y_m}{R}\right)^2 \cdot P, \tag{8}$$

which follows

$$P_E = P - \left(\frac{y_m}{R}\right)^2 \cdot P, \tag{9}$$

where y_m is the average distance of the parcel from the axial meridian.

The conditions that require the elevation correction δP_L have been examined and the results are presented in Table 2.

With $R = 6371km$, the relative distortion of the area $\delta P_L / P$ in the transverse Mercator map projection has been calculated for different values y_m .

Table 2 – Calculation of distortion of relative area in the transverse Mercator map projection

y_m, km	25	50	100	150	200	250
$\delta P_L / P$	1/64943	1/16236	1/4059	1/1804	1/1015	1/649

According to [2], they should not exceed 1/3-1/5 of the error in the area for the projection distortions to be neglected.

Table 2 suggests that when the errors in the area are within 1/500-1/1000, the correction for the transition from the geodetic area to the area on the surface of the ellipsoid can be ignored at a distance of 100-150 km from the parcel to the axial meridian. Consequently, the ordinates y_m generally do not exceed 30 km in large cities where local coordinate systems are used, and therefore the above correction can be neglected.

There is a much more accurate formula to determine the correction for the transition from the area in the transverse Mercator map projection to the area on the surface of the ellipsoid, i.e.:

$$\delta P_L = -(1 - q_m^2) \cdot P, \tag{10}$$

where $q_m = \frac{1}{ch\left(\frac{y_m}{R_m}\right)}$; $R_m = \frac{b}{\left(1 - e^2 \cdot \sin^2 \frac{x_m}{R_E}\right)}$.

R_E is the equivalent radius ($R_E = 6367558,497m$ for the Krasovskiy ellipsoid); x_m is the average abscissa of the parcel.

The area on the surface of the ellipsoid can also be calculated using the coordinates of its vertices. For example, the area of a steroidal trapezium limited by parallels with the latitudes B_1, B_2 and meridians with the longitudes L_1, L_2 (Fig. 1) can be calculated using the formula [13; 16; 17].

$$P_E = b^2 \cdot (L_2 - L_1) \cdot \int_{B_1}^{B_2} \frac{\cos B dB}{(1 - e^2 \sin^2 B)^2}, \tag{11}$$

where b is the semi-minor axis and e is the eccentricity of the earth's ellipsoid.

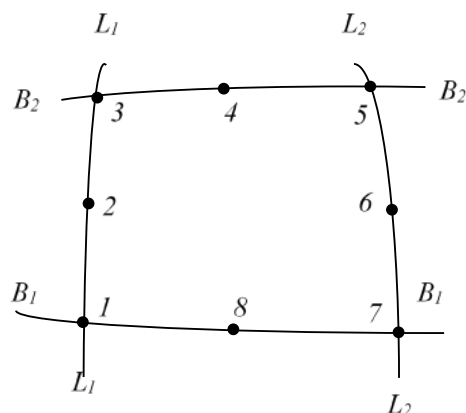


Fig. 1. Steroidal trapezoid

To perform the calculations, the integrand function (11) needs to be expanded in a series for the purpose of term-by-term integration, which follows [18; 20].

$$P_E = b^2(L_2 - L_1) \cdot \left[\sin B_2 - \sin B_1 + \frac{2}{3}e^2(\sin^3 B_2 - \sin^3 B_1) + \frac{3}{5}e^4(\sin^5 B_2 - \sin^5 B_1) + \frac{4}{7}e^2(\sin^7 B_2 - \sin^7 B_1) + \dots \right]. \tag{12}$$

There is also an approximate formula that allows calculating the area with an error of no more than $2 \cdot 10^{-5} \cdot P_E$ [18; 19].

$$P_E = c(L_2 - L_1) \cdot [\arcsin(k \cdot \sin B_2) - \arcsin(k \cdot \sin B_1)], \tag{13}$$

where $c = 74456,835$; $k = 0,163133$.

Formula (13) includes longitude expressed in degrees and area expressed in square kilometers.

The coordinates of vertices of an arbitrary polygonal parcel can be used to calculate the projection area of the parcel on the ellipsoid. Let us present formulas for calculating the area of small land parcels using coordinates in the following coordinate systems:

- planimetric rectangular coordinates x, y and heights z ;
- spatial rectangular coordinates X, Y, Z ;
- **geodetic** coordinates B, L, H .

For further calculations, let $z = H$.

Consequently, the formula for calculating the area on the ellipsoid using planimetric rectangular coordinates is the following:

$$P_E = \frac{1}{2} q_m^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^n \begin{vmatrix} x_i & y_i \\ x_{i+1} & y_{i+1} \end{vmatrix} \right). \tag{14}$$

The formula for calculating the area on the ellipsoid by spatial geocentric (quasi-geocentric) rectangular coordinates X, Y, Z is the following:

$$P_E = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \begin{vmatrix} X_i & Y_i \\ X_{i+1} & Y_{i+1} \end{vmatrix} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n \begin{vmatrix} X_i & Z_i \\ X_{i+1} & Z_{i+1} \end{vmatrix} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n \begin{vmatrix} Y_i & Z_i \\ Y_{i+1} & Z_{i+1} \end{vmatrix} \right)^2}. \tag{15}$$

The formula to calculate the area on the ellipsoid by geodetic coordinates B, L can be expressed as follows:

$$P_E = \frac{1}{2} g_m k_m \left(\sum_{i=1}^n \begin{vmatrix} B_i & L_i \\ B_{i+1} & L_{i+1} \end{vmatrix} \right). \tag{16}$$

where $g_m = M_m / \rho$; $k_m = N_m \cdot \cos B_m / \rho$;

$$M_m = \frac{a \cdot (1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 B_m)^{3/2}}; N_m = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 B_m}},$$

B_m is the average latitude of the parcel; a is the semi-major axis of the terrestrial ellipsoid.

By formulas (14) - (16), the areas on the ellipsoid surface are calculated, and therefore the height z of planimetric rectangular coordinates X, Y, Z must be equal to zero, and the spatial coordinates of each point must meet the requirement $H = 0$. To simplify the calculations, it is reasonable to discard the common first digits in the vertex coordinates or subtract the coordinates of the first vertex from them and further operate on the residuals. However, when calculating the coefficients q, g, k , it is necessary to use the value of coordinates to the full.

II. Calculation of the area of horizontal projection of the parcel

Most often, the horizontal projection area of a parcel (horizontal area) is calculated according to the results of direct geodetic measurements reduced to the horizon.

To calculate the horizontal area, with the given geodetic area of a parcel calculated from the coordinates of its vertices in the transverse Mercator map projection or measurements on the plan, it is necessary to switch from the geodetic area to the area on the ellipsoid surface, and then to the horizontal area. The transition from the geodetic area in the transverse Mercator map projection to the area on the ellipsoid surface is performed by adding the correction obtained by formula (8) to the geodetic area. To transfer to the horizontal area, a correction must be added to the result obtained according to (7):

$$\delta P_H \approx 2 \frac{H_m}{R} \cdot P_E, \tag{17}$$

where H_m is the average height of the parcel.

Thus, it follows that

$$P_h = P + \delta P_L + \delta P_H. \tag{18}$$

Let us consider how the area horizontal projection is related to the area of the physical surface of the parcel. Figure 2 shows a rectangular parcel of the area P_T with an angle of inclination ν . The lengths of the sides of the parcel are equal to S_1 and S_2 .

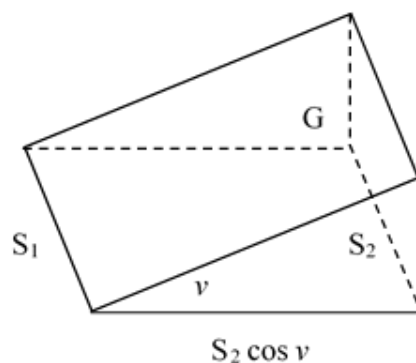


Fig. 2. Sloped parcel and its projection

The area of the tilted surface of the parcel equals $P_T = S_1 \cdot S_2$, with the area of its horizontal projection being expressed as

$$P_h = S_1 \cdot S_2 \cos \nu = P_T \cdot \cos \nu. \quad (19)$$

The difference in the areas is equal to:

$$\delta P_\nu = P_T - P_h = P_T - P_T \cdot \cos \nu = P_T \cdot (1 - \cos \nu). \quad (20)$$

Given the equality $1 - \cos \nu = 2 \sin^2 \frac{\nu}{2}$ and $P_T = P$, it follows that:

$$\delta P_\nu = 2P \sin^2 \frac{\nu}{2}. \quad (21)$$

For minor slope angles, it is possible to adopt that $\sin \nu = \nu$ (ν should be given in radians), thus

$$\delta P_\nu = P \cdot \frac{\nu^2}{2} \quad (22)$$

and

$$\frac{\delta P_\nu}{P} = \frac{\nu^2}{2}. \quad (23)$$

Formula (20) follows that

$$P_T = P_h + \delta P_\nu = P_h + P \cdot \frac{\nu^2}{2} \quad (24)$$

and

$$P_h = P_T - \delta P_\nu = P_T - P \cdot \frac{\nu^2}{2}.$$

By analyzing formulas (19) - (23), it can be concluded that the horizontal projection area of a parcel is always less than its physical surface area. This difference grows with the increase of the slope angle. The relative distortion of the area $\delta P_\nu / P_T$ depends on the slope angle. This distortion is not affected by the shape of the parcel and its location on plane G.

III. Calculation of the parcel physical surface area

Depending on the purpose of the parcel, there is a need to determine the area P_T of the physical surface of the parcel, i.e. the area of the land surface taking into account the terrain that may differ from the geodetic area by 2-5%, which is important to consider in the calculations and in drawing up land planning documents (e.g., contracts of sale of parcels) [20; 21].

After calculating the geodetic area P by coordinates of polygon vertices, the physical surface area can be found by transforming the system of equations:

$$\left. \begin{aligned} \delta P_H &= -2 \frac{H_m}{R} P_A \\ \delta P_L &= -\left(\frac{y_m}{R}\right)^2 P \\ P_T &= P_h + \delta P_\nu = P_h + P \frac{\nu^2}{2} \end{aligned} \right\}. \quad (25)$$

Therefore, the area of the physical surface area can be determined as follows:

$$P_T = \left[1 - \left(\frac{y_m}{R}\right)^2 + \frac{2H_m}{R} + \frac{1}{2} \left(\frac{\nu''}{\rho''}\right)^2 \right] \cdot P, \quad (26)$$

where v_m is the average angle of slope of the land surface on the parcel; H_m is the average height of the parcel spot; y_m is the average parcel ordinate (distance from the axial meridian); R is the Earth radius.

The formula (26) can be used for the area of the whole parcel only if the terrain is calm. If the terrain is complex, it is reasonable to divide the parcel into elementary areas with constant tilt angles, determining for each of them the geodetic area, tilt angle, height, and deviation of the axial meridian. After calculating by formula (26) the physical surface area of each site and summing them up, it is possible to find the total physical surface area of the whole parcel. It is also worth emphasizing that determining the parameters v_m, H_m, y_m is a rather complicated and time-consuming process.

With calm terrain, the area of the physical surface of a parcel can also be calculated using the coordinates of the polygon vertices. Moreover, the coordinates can be specified in any coordinate system - planimetric rectangular coordinates x, y combined with height z (27); spatial rectangular geocentric coordinates X, Y, Z (28); geodetic coordinates B, L, H , with $z = H$.

$$P_T = \frac{1}{2} \sqrt{q_m^4 \left(\sum_{i=1}^n \begin{vmatrix} x_i & y_i \\ x_{i+1} & y_{i+1} \end{vmatrix} \right)^2 + q_m^2 \left(\sum_{i=1}^n \begin{vmatrix} x_i & z_i \\ x_{i+1} & z_{i+1} \end{vmatrix} \right)^2 + q_m^2 \left(\sum_{i=1}^n \begin{vmatrix} y_i & z_i \\ y_{i+1} & z_{i+1} \end{vmatrix} \right)^2}. \quad (27)$$

$$P_T = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \begin{vmatrix} X_i & Y_i \\ X_{i+1} & Y_{i+1} \end{vmatrix} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n \begin{vmatrix} X_i & Z_i \\ X_{i+1} & Z_{i+1} \end{vmatrix} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n \begin{vmatrix} Y_i & Z_i \\ Y_{i+1} & Z_{i+1} \end{vmatrix} \right)^2}. \quad (28)$$

$$P_T = \frac{1}{2} \sqrt{g_m^2 k_m^2 \left(\sum_{i=1}^n \begin{vmatrix} B_i & L_i \\ B_{i+1} & L_{i+1} \end{vmatrix} \right)^2 + g_m^2 \left(\sum_{i=1}^n \begin{vmatrix} B_i & H_i \\ B_{i+1} & H_{i+1} \end{vmatrix} \right)^2 + k_m^2 \left(\sum_{i=1}^n \begin{vmatrix} L_i & H_i \\ L_{i+1} & H_{i+1} \end{vmatrix} \right)^2}. \quad (29)$$

Formulas (27) - (29) include the following notation [18, 21]:

$$q_m = \sqrt{1 + \frac{2z_m}{R_m} / ch\left(\frac{y_m}{R_e}\right)}; \quad R_m = b / \left(1 - e^2 \sin^2 \frac{x_m}{R_e}\right); \quad g_m = (M_m + H_m) / \rho;$$

$$k_m = (N_n + H_m) \cos B_m / \rho; \quad M_m = \frac{\alpha(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 B_m)^{3/2}}; \quad N_m = \alpha / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_m},$$

where x_m, y_m, z_m, H_m, B_m are the average parcel coordinates; a, b, e^2 are the elements of the earth's ellipsoid.

To simplify the calculations by formulas (27)-(29), let us discard the first common digits or subtract from them the coordinates of the first vertex in the vertex coordinates and further deal with the residuals:

$$\begin{aligned} x'_i &= x_i - x_0; & y'_i &= y_i - y_0; & z'_i &= z_i - z_0; \\ X'_i &= X_i - X_0; & Y'_i &= Y_i - Y_0; & Z'_i &= Z_i - Z_0; \\ B'_i &= B_i - B_0; & L'_i &= L_i - L_0; & H'_i &= H_i - H_0, \end{aligned} \quad (30)$$

where the coordinates with index 0 correspond to the coordinates of the first vertex.

In calculating the coefficients q, g, k , it is crucial to use the complete coordinate values.

Basically, the areas of the parcel are determined by coordinate differences using modern satellite geodetic instruments or with the help of electronic total stations. Let us present the formulas for calculating the physical areas of spatial triangles in the three main coordinate systems.

- in the planimetric rectangular coordinate system:

$$P_T = \frac{1}{2} \sqrt{q_m^4 \begin{vmatrix} \Delta x_1 & \Delta y_1 \\ \Delta x_2 & \Delta y_2 \end{vmatrix}^2 + q_m^2 \begin{vmatrix} \Delta x_1 & \Delta z_1 \\ \Delta x_2 & \Delta z_2 \end{vmatrix}^2 + q_m^2 \begin{vmatrix} \Delta y_1 & \Delta z_1 \\ \Delta y_2 & \Delta z_2 \end{vmatrix}^2}; \quad (31)$$

- in the spatial rectangular geocentric coordinate system:

$$P_T = \frac{1}{2} \sqrt{\begin{vmatrix} \Delta X_1 & \Delta Y_1 \\ \Delta X_2 & \Delta Y_2 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} \Delta X_1 & \Delta Z_1 \\ \Delta X_2 & \Delta Z_2 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} \Delta Y_1 & \Delta Z_1 \\ \Delta Y_2 & \Delta Z_2 \end{vmatrix}^2}; \quad (32)$$

- in the geodetic coordinate system:

$$P_T = \frac{1}{2} \sqrt{g_m^2 k_m^2 \left(\begin{vmatrix} \Delta B_1 & \Delta L_1 \\ \Delta B_2 & \Delta L_2 \end{vmatrix} \right)^2 + g_m^2 \begin{vmatrix} \Delta B_1 & \Delta H_1 \\ \Delta B_2 & \Delta H_2 \end{vmatrix}^2 + k_m^2 \begin{vmatrix} \Delta L_1 & \Delta H_1 \\ \Delta L_2 & \Delta H_2 \end{vmatrix}^2}. \quad (33)$$

In formulas (31) - (33), the indices 1 and 2 mean the coordinate differences of vertices 2-1 and 3-2, respectively. Particularly, when $\Delta z_1 = \Delta z_2 = 0$ and $q_m = 1$, formula (31) assumes the following form:

$$P = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} \Delta x_1 & \Delta y_1 \\ \Delta x_2 & \Delta y_2 \end{vmatrix}. \quad (34)$$

With $\Delta H_1 = \Delta H_2 = 0$, formula (33) assumes the following form:

$$P = \frac{m_m^2 \cdot g_m \cdot k_m}{2} \begin{vmatrix} \Delta B_1 & \Delta L_1 \\ \Delta B_2 & \Delta L_2 \end{vmatrix}, \quad (35)$$

where m_m is the scale of the TM projection obtained by the formula $m_m = ch \cdot \frac{y_m}{R}$ [21].

The coordinates of the polygon vertices can be obtained both by satellite and traditional methods. In the latter case, it is possible to lay a polygonometric course on the boundary marks, or the coordinates can be obtained by polar cross-bearing, spatial cross-bearing with the measuring of side lengths, zenith distances and horizontal angles [22].

Results of investigations.

I. Let us examine the proposed formulas (method I) by calculating the area of the same spheroidal trapezoid (Fig. 1). The coordinates of eight points located on the boundaries of this trapezoid are presented in three systems: planimetric, spatial, and geodetic coordinates (Table 3).

Table 3 – Coordinates of points on the boundaries of trapezoid

No	Coordinates					
	planimetric rectangular, m		geocentric, m		geodetic	
1	2	3	4	5	6	7
1	x	6656825.024	X	2782664.300	B	60° 00' 00"
	y	139480.191	Y	1574355.712	L	29° 30' 00"
		-	Z	5500573.593		-
2	x	6659145.050	X	2780914.563	B	60° 01' 15"
	y	139392.458	Y	1573365.758	L	29° 30' 00"
		-	Z	5501733.794		-
3	x	6661465.083	X	2779164.453	B	60° 02' 30"
	y	139304.706	Y	1572375.594	L	29° 30' 00"
		-	Z	5502893.267		-

End Table 3

1	2	3	4	5	6	7
4	x	6661531.343	X	2778306.442	B	60° 02' 30"
	y	141045.451	Y	1573891.159	L	29° 31' 52.5"
		-	Z	5502893.267		-
5	x	6661598.426	X	2777447.604	B	60° 02' 30"
	y	142786.174	Y	1575406.256	L	29° 33' 45"
		-	Z	5502893.267		-
6	x	6659278.449	X	2779196.633	B	60° 01' 15"
	y	142876.120	Y	1576398.329	L	29° 33' 45"
		-	Z	5501733.794		-
7	x	6656958.479	X	2780945.289	B	60° 00' 00"
	y	142966.047	Y	1577390.190	L	29° 33' 45"
		-	Z	5500573.693		-
8	x	6656891.339	X	2781805.209	B	60° 00' 00"
	y	141223.130	Y	1575873.186	L	29° 31' 52.5"
		-	Z	5500573.593		-

The area of the trapezoid calculated by formula (11) is considered true $P_{ict} = 16180000,9m^2$. The corrections calculated by formulas (8) and (10) have the following values $\delta P_{L1} = -7952,6m^2$, $\delta P_{L2} = -7897,0m^2$.

Table 4 presents the comparison results of areas on the ellipsoid surface, which are calculated using the geodetic areas, and the correction for them.

Table 4 – Calculation of areas on the ellipsoid by geodetic areas

Element	Correction by formula (8)		Correction by formula (10)	
	8 points	4 points	8 points	4 points
Area P_E, m^2	16179953.6	16179951.6	16180009.2	16180007.1
Deviation $\Delta = P_E - P_{real}, m^2$	-56.0	-58.0	-0.4	-2.5

The area was calculated twice: by the coordinates of all eight points and by the coordinates of only four points numbered 1, 3, 5, and 7 that fix the vertices of the trapezoid.

Table 5 shows the comparison results with the true value of the areas calculated by the coordinates of the same points, but in different systems.

Table 5 – Calculation of areas on the ellipsoid by geodetic areas

Element	Coordinates					
	planimetric rectangular		spatial rectangular		geodetic	
Number of points	8	4	8	4	8	4
Area P_E, m^2	16180009.2	16180007.1	16180008.3	16180006.0	16180010.0	16180010.0
Deviation $\Delta = P_E - P_{real}, m^2$	-0.4	-2.5	-1.3	-3.6	+0.4	+0.4

Consequently, the insignificant values of deviations of the calculated areas from the true value (Table 5) prove the quality of the formulas proposed.

II. Let us carry out the practical implementation of theoretical research (method II). Using formulas (19) - (24), calculation has been performed, with the corresponding results presented in Table 6.

Table 6 – Relative distortion of the physical area in relation to the value of the tilt angle

Slope, ν^0	1	1,3	2	3	4	5	6	7	8	9
$\delta P_v / P_T$	1/6567	1/3886	1/1642	1/730	1/410	1/263	1/182	1/134	1/103	1/81

In calculations (Table 6), the error for the slope has been considered to be significantly small provided it does not exceed ¼ of the error in the area. With the latter being 1/1000, the error for the angle of slope should not exceed 1/4000. As Table 6 suggests, if the angles of slope increase more than 1,3°, then they should be taken into account when calculating the physical area of the parcel.

III. Let us carry out the practical implementation of theoretical research (method III) and calculate the physical surface area of a pentagonal parcel. In the diagram (Fig. 3), the line a-b-c-d-e-a shows the boundary of the area divided into three triangular fragments P_1, P_2, P_3 .

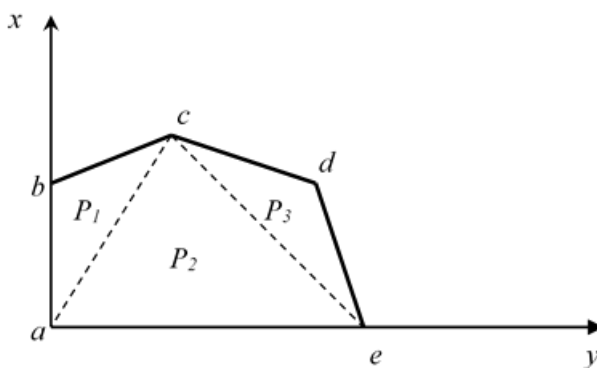


Fig. 3 Parcel diagram with a division into triangles

The coordinates of the parcel vertices a, b, c, d, e are expressed in different coordinate systems, and the areas of the parcel physical surface are calculated by formulas (27) - (29) and shown in Table 7. The calculation outcomes obtained by dividing the area into the triangles and summing their areas are presented in Table 8.

Table 7 – Calculation of physical surface areas by vertex coordinates

No	Coordinate systems					
	planimetric rectangular, m		Geocentric, m		geodetic	
1	x	7400000.00	X	2209795.74	B	66° 40' 28.31//
	y	100000.00	Y	1238188.19	L	29° 15' 45.69//
	z	1000.00	Z	5835156.84	H	1000.00
2	x	7400250.00	X	2209598.07	B	66° 40' 36.38//
	y	100000.00	Y	1238087.82	L	29° 15' 46.43//
	z	1020.00	Z	5835274.12	H	1020.00
3	x	7400150.00	X	2209612.71	B	66° 40' 32.97//
	y	100150.00	Y	1238263.70	L	29° 15' 58.34//
	z	1025.00	Z	5835236.99	H	1025.00
4	x	7400150.00	X	2209558.13	B	66° 40' 32.86//
	y	100250.00	Y	1238347.68	L	29° 16' 06.48//
	z	1000.00	Z	5835212.60	H	1000.00
5	x	7400000.00	X	2209730.27	B	66° 40' 28.14//
	y	100150.00	Y	1238323.34	L	29° 15' 57.90//
	z	1010.00	Z	5835163.86	H	1010.00
P_T	37657.55 m ²		37657.43 m ²		37657.47 m ²	

Table 8 – Calculation of areas of physical surfaces by areas of triangles

No of triangle	Coordinate system		
	planimetric rectangular	planimetric rectangular	planimetric rectangular
1	18881.33 m ²	18881.23 m ²	18881.43 m ²
2	11332.76 m ²	11332.72 m ²	11332.54 m ²
3	7767.65 m ²	7767.68 m ²	7767.77 m ²
P_T	37980.74 m ²	37980.63 m ²	37980.74 m ²

In conclusion, the calculations made in Tables 7 and 8 prove that the results of calculating the physical areas on the surface of parcels using different coordinate systems are almost identical. However, the difference between the results obtained by dividing the parcel into triangles (Table 8) and the results given in Table 1 constitutes about 1%. The reason for these discrepancies is that the formulas (27)-(29) assume that all vertices of a polygon lie in one plane, although in dividing this polygon (the parcel) into triangles, the different slope of the land surface in different places of the parcel is considered.

Recommendations and conclusions. The fact that, in our opinion, the purpose of land purchase affects its market value: in some cases, the horizontal dimensions of parcels matter; in others, the dimensions of physical surface areas do. For example, in agriculture, the horizontal area determines the number of upright plants, and the size of the physical surface area affects the amount of work on its cultivation. Therefore, it is advisable to use the areas of horizontal projection and the physical surface of the parcel in the land management, cadastre, and real estate valuation.

References

1. Baranovsky, V.D., Karpinsky, Y.O., & Lyashchenko, A.A. (2009). *Topografo-heodezychna ta kartografichne zabezpechennia vedennia derzhavnoho zemelnogo kadastru. Systemy koordynat i kartografichni proektsii [Topographic, geodetic and cartographic support of the state land cadastre. Determination of areas of territories]*. NDGIK.
2. Guiding technical material. (1993). *Kerivnyi tekhnichnyi material «Inventoryzatsiia zemel nase-lenykh punktiv (nazemni metody)» [Guiding technical material. Inventory of lands of settlements. (based on aerial photographs)]*. GUGK.
3. Verkhovna Rada of Ukraine. (2011). Podatkovyi kodeks Ukrainy [Tax Code of Ukraine], Law № 2755-VI (on December 2, 2010).
4. Enemark, S. (2010). From Cadastre to Land Governance: The role of land professionals and FIG. *Annual World Bank conference on land policy and administration* (pp. 26-27). Washington D.C. http://www.fig.net/news/news_2010/washington_april_2010/washington_pap_er_enemark_april_2010.pdf.
5. Henssen, J., & Williamson, I. (1998). Land registration, cadastre and its interaction - a world perspective. www.oicrf.org.
6. Williamson, I., Enemark, S., Wallace, J., & Rajabifard, A. (2011). *Land administration for sustainable development*. ESRI Press Academic, Redlands, California, 487.
7. Bennet, R., Williamson, I., Kalantari, M., Wallace, J. & Rajabifard, A. (2011). Cadastral Futures: Building a New Vision for the Nature and Role of Cadastres. *International Federation of Surveyors Article of the Month – June 2011*. https://www.fig.net/resources/monthly_articles/2011/june_2011/june_2011_bennett_rajabifard_et_al.pdf
8. Biletsky, B.O., Litvinov, V.A., Bespalov, V.P., Maistrenko, S.Y., Zagreb, T.O., & Khurtsilava, K.V. (2013). Praktychne zastosuvannia HIS-tehnolohii dlia planovo-kartografichnoho suprovodzhennia lisovporiadkuvannia (na prykladi «HIS-Lisproekt») [Practical application of GIS-technologies for planning and cartographic support of forest management (on the example of “GIS-Lisproekt”)]. *Matematychni mashyny i systemy – Mathematical machines and systems*, 3, 76-86.
9. Geosistema. (2005). Tsifrovaia fotogrammetricheskaya stantsiya «Del'ta». Programmnoye obespecheniye dlya oriyentirovaniya rastroykh kart i snimkov. Models dlya Windows, versiya 5.0. Rukovodstvo operatora, chast. 1 [Digital Photogrammetric Station “Delta”. Software for orientation of raster maps and images. Models for Windows, version 5.0. Operator's manual, part. 1]. http://kyrator.com.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=910:programma-models%20&catid%20=%2023%20&Itemid=130.
10. GNSS (2020). GNSS receiver South S82. User manual. (2020). https://gd-geo.ru/pdf/south/south_s82-manual.pdf.
11. Gurman, S. (2019). Fotogrammetrychne opratsyuvannia materialiv aeroznimannia iz BPLA. Praktychni aspekty [Photogrammetric processing of aerial survey materials from UAVs. *Practical aspects*]. <http://surl.li/adjgy>.
12. FIG (2014). FIG: Cadastre 2014. A vision for a future cadastral system. <http://www.fig.net/cadastre2014>.

13. Fys, M., Yurkiv, M., & Lozynskyi, V. (2021). Remote Sensing Applications: Society and Environment, 22. <https://www.researchgate.net/journal/Remote-Sensing-Applications-Society-and-Environment-2352-9385>.
14. Hubar, Yu. (2020). *Geodetic support and improvement of methods and models of real estate valuation*. Publishing House «Center of Europe».
15. Hubar, Y., Hulko, O., Khavar, Y., Vinarchyk, L. & Sai, V. (2020). Ecological and economic aspects of effective use of land resources – potential of Vinnytsia region. *Geodesy and Cartography (Warsaw)*, 69(2), 173–187.
16. Pix4Dmapper Getting Started. (2020). <https://s3.amazonaws.com/mics.pix4d.com/KB/Getting+Started+PDFs/EN/Pix4Dmapper+-+Getting+Started+-+Master+-+4.0+-+EN.pdf>.
17. Shkuratov, O., Chudovska, V., Hubar, Y., Ivakhnenko, I., Hulko, O., & Dushko, P. (2021). Evaluating the potential of organic land use in Ukraine. Scientific Papers. *Series «Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development»*, 21(3), 731–738.
18. Balandin, V.N., Bryn, M.Ya., & Kougiya, V.Ya. (2005). *Opredelenie ploshchadei zemelnykh uchastkov i inykh obektov nedvizhimosti [Determination of the areas of land plots and other real estate objects]*.
19. Balandyn, V.N., Bryn, M.Ya., Khabarov, V.F., & Yuskevych, A.V. (2003). *Sputnikovie i traditsionnie geodezicheskie izmereniya [Satellite and traditional geodetic measurements]*. Aerophoto-geodesia.
20. Gubar, Yu.P. (2011). Vyznachennia neobkhdnoi tochnosti koordynat mezhovykh znakivd-liaotsinky zemel naselenykh punktiv [Determining the required accuracy of the coordinates of boundary markers for the assessment of land settlements]. *Heodeziia, kartohrafiia iaerofotoznimannia – Geodesy, cartography and aerial photography. Interdepartmental scientific and technical coll.*, 74, 132–135.
21. Hubar, Y., Vinarchyk, L., Sai, V., & Bochkov, S. (2021). Methods to determine the area of the land plot physical surface. *GeoTerrace-2021*.
22. Marcuse, M.Yu. (2000). Influence of errors of coordinates of boundary signs and their correlation on accuracy of definition of the areas of the ground areas taking into account various constructions (serifs). *Geodesy and aerial photography*, 50-55.

Список використаних джерел

1. Топографо-геодезичне та картографічне забезпечення ведення державного земельного кадастру. Системи координат і картографічні проекції / В. Барановський, Ю. Карпінський, О. Кучер, А. Ляшенко. – Київ : НДІГК, 2009. – 92 с.
2. Керівний технічний матеріал «Інвентаризація земель населених пунктів (наземні методи)» : затв. наказом ГУГКК від 02.02.1993 № 6. – Київ, 1993. – 43 с.
3. Податковий кодекс України : Закон України від 02.12.2010 № 2755-VI.
4. Enemark S. From Cadastre to Land Governance: The role of land professionals and FIG., Annual World Bank conference on land policy and administration [Electronic resource] / S. Enemark. – Washington D.C., 2010. – Pp. 26-27. – Accessed mode: chrome-extension://efaidnbmninnkpbpcapjccgclefindmkaj/https://www.fig.net/news/archive/news_2010/washington_april_2010/washington_paper_enemark_april_2010.pdf.
5. Henssen J. Land registration, cadastre and its interaction - a world perspective [Electronic resource] / J. Henssen, I. Williamson/ – 1998. – Accessed mode: www.oicrf.org.
6. Land administration for sustainable development / I. Williamson, S. Enemark, J. Wallace, A. Rajabifard // ESRI Press Academic, Redlands. – California, 2011. – 487 p.
7. Cadastral Futures: Building a New Vision for the Nature and Role of Cadastres [Electronic resource] / R. Bennet, I. Williamson, M. Kalantari, J. Wallace, A. Rajabifard // International Federation of Surveyors Article of the Month. – June 2011. – Accessed mode: https://www.fig.net/resources/monthly_articles/2011/june_2011/june_2011_bennett_rajabifard_et_al.pdf.
8. Практичне застосування ГІС-технологій для планово-картографічного супроводження лісовпорядкування (на прикладі «ГІС-Ліспроект») / Б. О. Білецький, В. А. Литвинов, В. П. Беспалов, С. Я. Майстренко, Т. О. Загребя, К. В. Хурцилава // Математичні машини і системи. – 2013. – № 3. – С. 76-86.
9. Руководство оператора Программное обеспечение для ориентирования растровых карт и снимков Models для Windows. Версия 5.0. Руководство оператора. Часть 1 [Электронный ресурс]. – Винница, 2005. – Режим доступа: http://kyrator.com.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=910:programma-models%20&catid%20=%202023%20&Itemid=130.

- 10 GNSS (2020). GNSS receiver South S82. User manual [Electronic resource]. – 2020. – Accessed mode: https://gd-geo.ru/pdf/south/south_s82-manual.pdf.
11. Гурман С. Фотограмметричне опрацювання матеріалів аерознімання із БПЛА. Практичні аспекти [Електронний ресурс] / Гурман С. – 2019. – Режим доступу: <http://surl.li/adjgy>.
12. FIG (2014). FIG: Cadastre 2014. A vision for a future cadastral system [Electronic resource]. – Accessed mode: <http://www.fig.net/cadastre2014>.
13. Fys M. Remote Sensing Applications: Society and Environment [Electronic resource] / M. Fys, M. Yurkiv & V. Lozynskyi. – 2021. – Vol. 22. – Accessed mode: <https://www.researchgate.net/journal/Remote-Sensing-Applications-Society-and-Environment-2352-9385>.
14. Hubar Yu. Geodetic support and improvement of methods and models of real estate valuation. Monograph / Yu. Hubar – Publishing House "Center of Europe", 2020. – 326 p.
15. Ecological and economic aspects of effective use of land resources – potential of Vinnytsia region / Y. Hubar, O. Hulko, Y. Khavar, L. Vinarchyk, V. Sai // Geodesy and Cartography (Warsaw). – 2020. – Vol. 69, № 2. – Pp. 173–187.
16. Pix4Dmapper Getting Started. (2020). [Electronic resource]. – Accessed mode: <https://s3.amazonaws.com/mics.pix4d.com/KB/Getting+Started+PDFs/EN/Pix4Dmapper+-+Getting+Started+-+Master+-+4.0+-+EN.pdf>.
17. Evaluating the potential of organic land use in Ukraine / O. Shkuratov, V. Chudovska, Y. Hubar, I. Ivakhnenko, O. Hulko, P. Dushko // Scientific Papers. Series "Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development". – 2021. – Vol. 21, iss. 3. – Pp. 731–738.
18. Определение площадей земельных участков и иных объектов недвижимости : учебное пособие для СПО / В.Н. Баландин, М.Я. Брын, В.Я. Коугия. – Москва, 2005. – 112 с.
19. Спутниковые и традиционные геодезические измерения / В. Н. Баландин, М. Я. Брын, В. Ф. Хабаров, А. В. Юськевич – СПб. : Аэрогеодезия, 2003. – 112 с.
20. Губар Ю. Визначення необхідної точності координат межових знаків для оцінки земель населених пунктів. / Ю. Губар // Геодезія, картографія і аерофотознімання : міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2011. – Випу. 74. – С. 132-135.
21. Methods to determine the area of the land plot physical surface / Y. Hubar, L. Vinarchyk, V. Sai, S. Bochkov // GeoTerrace-2021, October 4-6. – Lviv, 2021.
22. Marcuse M. Yu. Influence of errors of coordinates of boundary signs and their correlation on accuracy of definition of the areas of the ground areas taking into account various constructions (serifs) / M. Yu. Marcuse // Geodesy and aerial photography. – 2000. – P. 50-55.

Отримано 23.06.23

УДК 528.4

Михайло Фис¹, Юрій Губар², Андрій Бридун³, Андрій Согор⁴

¹доктор технічних наук, професор, професор кафедри картографії та геопросторового моделювання
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: mykhailo.m.fys@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8956-2293>

ResearcherID: [AAB-9528-2020](https://orcid.org/0000-0001-8956-2293). Scopus Author ID: [36091174500](https://orcid.org/0000-0001-8956-2293)

²доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри кадастру територій
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: yurii.p.hubar@lpnu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2538-0727>

ResearcherID: [ABZ-0251-2022](https://orcid.org/0000-0003-2538-0727). Scopus Author ID: [57224950139](https://orcid.org/0000-0003-2538-0727)

³кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри картографії та геопросторового моделювання
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: andrii.m.brydun@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5634-0512>

ResearcherID: [AAC-1271-2020](https://orcid.org/0000-0001-5634-0512). Scopus Author ID: [57212560353](https://orcid.org/0000-0001-5634-0512)

⁴кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри картографії та геопросторового моделювання
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: andrii.r.sohor@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0084-9552>

ResearcherID: [ABI-6288-2020](https://orcid.org/0000-0002-0084-9552). Scopus Author ID: [57224950613](https://orcid.org/0000-0002-0084-9552)

ПОРІВНЯННЯ ТА ОЦІНКА ТОЧНОСТІ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПЛОЩ ЗЕМЕЛЬНИХ ДІЛЯНОК

Актуальність дослідження полягає в тому, що загальна площа значних територій може визначатись як проста сума горизонтальних площ, проте більш практичним є їх визначення за допомогою аерознімальних засобів (літаків, безпілотних літальних апаратів, дронів тощо). Очевидно, що застосування для визначення площ різних методів не дозволяє досягнути їх однакової точності, тому що ці методи по різному описують земельні ділянки. Навіть врахування

рельєфу у вигляді середнього рівня місцевості лише частково враховує її особливості. У зв'язку з цим і виникає необхідність дослідження похибки визначення площ різними методами, адже різниця їх значень дає різні оцінки значень площ дають різні суми грошових надходжень. Це в свою чергу створює конфлікт інтересів, що може породжувати собою судові суперечки, що на нашу думку формує актуальність статті. Здійснено дослідження методів обчислення площ земельних ділянок: безпосередньо на фізичній поверхні еліпсоїда; горизонтальної проекції земельної ділянки та фізичної поверхні земельних ділянок. Шляхом практичної реалізації підтверджено викладені теоретичні дослідження. Виконані розрахунки доводять, що результати обчислення фізичних площ поверхні земельних ділянок із використанням різних систем координат практично не відрізняються. Однак, розходження між результатами, отриманими шляхом розбиття земельної ділянки на трикутники і результатами обчислення площ фізичних поверхонь за координати вершин досягають величини приблизно 1%. Причина цих розходжень полягає у тому, що всі вершини багатокутника лежать в одній площині, а під час розбиття цього багатокутника (земельної ділянки) на трикутники враховується різний нахил земної поверхні у різних місцях земельної ділянки. Обчислення площ об'єктів нерухомості потрібно виконувати паралельно із оцінкою точності одержаних результатів. Оцінка точності характеризується достовірністю інформації про площі, а також слугує прийняття вірних рішень про зміни первісних даних при повторних визначеннях площ. Розглядаючи площу ділянки, розрізняють наступні варіанти: площа земельної поверхні з урахуванням рельєфу, площа горизонтальної проекції ділянки, площа проекції ділянки на поверхні земного еліпсоїда і площа зображення ділянки на площині картографічної проекції (проекція Гауса-Крюгера). Вибір варіанту залежить від поставленого завдання. Під час роботи з картами і планами одержують площу зображення ділянки в проекції карти, яку прийнято називати геодезичною площею. Якщо при цьому осьовий меридіан проходить біля ділянки і за поверхню відносності прийнято середній рівень території, значення геодезичної площі і горизонтальної проекції площі практично не відрізняються. В інших випадках важливим є знання площі всієї фізичної поверхні земельної ділянки. Метою роботи є виконання порівняльного аналізу методів визначення площ земельних ділянок для вибору найоптимальнішого методу для цільового практичного використання у різних галузях господарства. У роботі доведено, що під час здійснення процедури купівлі-продажу земельних ділянок на її ринкову вартість впливає мета придбання земельних ділянок: в одному випадку важливі горизонтальні розміри земельних ділянок; в інших – розміри площ фізичних поверхонь. Так, у сільському господарстві горизонтальна площа визначає кількість прямовисно стоячих рослин, а величина площі фізичної поверхні землі впливає на обсяг робіт щодо її обробітку і тому у землевпорядкуванні, кадастрі та оцінці нерухомості доцільно використовувати саме площі горизонтальної проекції та фізичної поверхні земельної ділянки.

Ключові слова: площа земельної ділянки; фізична поверхня еліпсоїда; горизонтальна проекція земельної ділянки; об'єкт нерухомості; кадастр; землеустрій; оцінка нерухомості.

Рис.: 3. Таб.: 8. Бібл.: 22.

**Юрій Цапко¹, Ольга Бондаренко², Олексій Цапко³,
Олександра Горбачова⁴, Сергій Мазурчук⁵**

¹доктор технічних наук, професор кафедри технологій та дизайну виробів з деревини
Національний університет біоресурсів і природокористування України (Київ, Україна)

E-mail: juriyts@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0625-0783>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів

Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)

E-mail: bondolya3@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8164-6473>. ResearcherID: [M-1453-2018](https://orcid.org/0000-0002-8164-6473)

³кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Український державний науково-дослідний інститут «Ресурс» (Київ, Україна),

доцент кафедри будівельних матеріалів

Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)

E-mail: alekseysapko@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2298-068X>

⁴кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій та дизайну виробів з деревини
Національний університет біоресурсів і природокористування України (Київ, Україна)

E-mail: gorbachova.sasha@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7533-5628>

⁵кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій та дизайну виробів з деревини
Національний університет біоресурсів і природокористування України (Київ, Україна)

E-mail: mazurchuk.s.m@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6008-9591>

МЕХАНІЗМ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ СПУЧЕНОГО ШАРУ ПІНОКОКСУ ПРИ ВПЛИВІ МІНЕРАЛЬНИХ РЕЧОВИН

Експериментальними дослідженнями встановлено вплив наповнювачів на роботу вогнезахисного покриття, параметри його спучення під дією температури й пригнічення, що дозволяє змінювати цей процес. У результаті термічної дії встановлено вплив наповнювачів на коефіцієнт спучування покриття на основі неорганічних та органічних речовин. Доведено, що він полягає у виникненні на поверхні матеріалу шару, який протидіє нагріванню до критичної температури та розкладанню матеріалу. Проведеними дослідженнями показано, що включення оксиду титану й гідроксиду алюмінію в кількості 5 % забезпечує досягнення найбільшого значення коефіцієнта спучення – до 47, який у 1,11 раза більше за значення коефіцієнта спучення при введенні оксиду титану, гідроксиду алюмінію та тальку в кількості 3,3 %, в 1,12 раза більше за значення коефіцієнта спучення при введенні оксиду титану й тальку в кількості 5%, а також в 1,08 раза більше за значення коефіцієнта спучення при введенні гідроксиду алюмінію та тальку в кількості 5 %. Виявлено вплив наповнювачів при дії високотемпературного теплового потоку на зміну процесу спучення вогнезахисного покриття та показано механізм кінетики дії наповнювачів, який характеризується зниженням швидкості та втрати маси. Підвищення стійкості вогнезахисту будівельних конструкцій забезпечується введенням наповнювачів при 700 °С, що призводить до утворення тугоплавких композицій, які запобігають вигоранню утвореного пінококсу.

Ключові слова: вогнестійкість, покриття, втрата маси, спучувальна здатність, температура, тугоплавкі наповнювачі, ефективність покриття.

Рис.: 4. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Деревина та вироби з деревинних матеріалів використовуються в сучасному будівництві, оскільки цей матеріал характеризується високими технологічними й декоративними показниками, екологічно чистий та має достатньо високу тенденцію щодо застосування як конструкційний матеріал. Але деревина одночасно є основним провідником поширення горіння і потребує захисту від дії джерел займання.

У зв'язку з цим велика увага приділяється вирішенню проблеми забезпечення вогнестійкості будівель і конструкцій, виконаних з деревини. Збільшити ступінь безпечної експлуатації споруд, де використовуються матеріали й вироби з деревини, припустимо за допомогою її захисного оброблення від вогню. Суть захисту деревини являє собою надання їй змоги опиратися впливу полум'я, розповсюдженню полум'я площиною, у протидії термоокислюванню деструкції та гальмуванню процесу займання.

Постановка проблеми. Одним із традиційних напрямів захисту від джерела вогню є зниження ймовірності загоряння матеріалів із деревини, а також обмеження його за часом дії й потужності шляхом поверхневого захисту спеціальними засобами, що мають забезпечити необхідну межу вогнестійкості та знизити швидкість поширення полум'я в умовах пожежі [1; 2].

Тому в будівництві прискореними темпами ведеться розробка новітніх якісних засобів вогнезахисту деревини, які на сьогодні мають не тільки гарантувати необхідну вогнестійкість деревини, а і зберігати її параметри експлуатації й забезпечувати довговічність.

Сучасні методи вогнезахисту деревини базуються на використанні покриттів, які являють собою складні системи органічних і неорганічних компонентів та спучуються. Проте вони при довготривалій дії полум'я здатні до послідовного вигорання й відповідно зниження вогнезахисної ефективності та потребують додавання речовин, здатних утворити більш стійкий спучений теплоізолювальний шар пінококсу. У зв'язку з цим і встановлюється потреба в проведенні досліджень у цьому напрямку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вогнезахист конструкцій із деревини полягає в забезпеченні на поверхні захисних теплоізоляційних екранів, що здатні витримати високу температуру від дії вогню пожежі. Крім того, вогнезахист дозволяє сповільнити прогрівання матеріалу та зберегти свої функціональні властивості в період заданого часу, що тим самим дозволяє перевести деревину до важкогорючих матеріалів [3].

Звичайні неорганічні покриття й вогнезахисні склади на основі алюмосилікатних речовин містять зв'язану воду, здатну під час нагрівання випаровуватися та протидіяти перенесенню тепла до деревини. При цьому як зв'язуючі речовини застосовують портландцемент, глиноземистий цемент, натрієве рідинне скло та в'язучі речовини [4]. Ці матеріали жорсткі, мають незначну еластичність й при дії температурно-вологісних коливань осипаються, що призводить до зниження естетичних показників та ефективності вогнезахисту [5]. Натомість створені покриття на основі неорганічних та органічних речовин спроможні до забезпечення на поверхні, яка захищається, спученого шару коксу. Це великою мірою знижує процеси теплопередачі [6].

Ефект від використання вогнезахисних покриттів на основі органічних речовин показано в роботі [7]. За рахунок дії антипіренів, газо- та коксоутворювачів можливо вплинути на формування спінюючого шару пінококсу. Однак підвищення стійкості, щільності та міцності досягається внаслідок модифікування органічного покриття полімерними речовинами [8]. Проте ці результати досліджень спрямовані на створення полімерно-неорганічних вогнезахисних покриттів, які не забезпечать вогнестійкість протягом тривалого часу та підвищують димоутворювальну здатність будівельних конструкцій, а також є надто дорогими.

Експериментальними дослідженнями в роботі [9] виявлено, що при додаванні наповнювачів (оксидів, гідроксидів, боратів) до органо-неорганічних покриттів відбувається зміна структури коксового шару та безпосередньо процесу спучення покриття, але не встановлено їх вплив на теплопровідність утвореного шару пінококсу.

У роботі [10] досліджено синергічну дію поліфосфату амонію та тригідрату оксиду алюмінію як вогнезахисних компонентів для епоксидного вогнезахисного матеріалу, армованого природними волокнами. Показано також, що не постійно неармовані склади не можуть забезпечити при зміні температури якісний опір полум'ю.

Вплив структури деревини на довговічність вогнезахисних властивостей прозорого вогнестійкого покриття із застосуванням прискореного гіротермічного старіння встановлено в роботі [11]. За допомогою морфологічного аналізу та тесту на вогонь проводили аналіз ефекту старіння. У результаті проведених експериментів показано, що після 21 дня старіння вогнезахисні складові послідовно випадають на поверхню покриття. При цьому покриття втрачає спроможність до збільшення, а обвуглений шар показує пластинчасту структуру низької міцності. Покриття зменшило вогнестійкість на 43,48 % (від 23 хв до 13 хв).

У роботі [12] досліджено вогнезахисний засіб TW (FRTW) з вмістом ефіруфосфату-поліетиленгліколю (PEAG) з гарними оптичними властивостями та вогнестійкістю. При проведенні термогравіметричного аналізу TW/PEAG відбувається зменшення втрати

маси на 60 % і збільшення залишків пінококсу у 2,5 раза, у порівнянні з даними природної деревини. Це забезпечує підвищену термічну стабільність. Пікова швидкість тепловідділення, загальне тепловідділення та теплота згорання вогнезахисного засобу TW (FRTW) були знижені на 82,4, 84,3 і 80,8 % до показників, які отримані при використанні вогнезахисного засобу на основі епоксидної смоли. Про підвищення вогнезахисних характеристик TW/PEAG також свідчать обмежувальний кисневий індекс і експериментальні результати займистості. Висока вогнестійкість TW/PEAG пов'язана з вмістом ефіромфосфату-поліетиленгліколю, який забезпечив утворення теплоізоляційного шару вуглецю та знизив виділення тепла. Також TW/PEAG показав значні механічні властивості, що полягають в міцності на розрив – 153,6 МПа та модулі пружності – 2,2 ГПа. Однак не говориться про механізм дії покриття та його руйнування з часом.

Тому важливим питанням є встановлення спучувальної здатності покриттів при довготривалій дії температур та впливі компонентів, які входять до їх складу, їх ваги у забезпеченні вогнестійкості та розробці сучасних, надійних, об'єктивних методів оцінювання процесу спучення, що визначають необхідність проведення досліджень у цьому напрямі.

Метою дослідження є встановлення впливу на спучувальну здатність вогнезахисного покриття на основі органічних і неорганічних речовин наповнювачів, а також розроблення методів оцінювання процесу спучення та встановлення стійкості до дії високої температури отриманих композицій.

Сировинні матеріали та методи досліджень. У процесі проведення досліджень як сировинний матеріал використовували органо-неорганічну систему, яка складається з поліфосфату амонію (ПФА), меламіну, пентаеритриту (ПЕР) та в'язучого на основі ПВА-дисперсії, наповнювачів – діоксиду титану, тальку, гідроксиду алюмінію і магнію та їхніх сумішей.

Зразки покриттів для експерименту виготовляли на основі органо-неорганічної системи, що містить 18...20 % ПФА, 12...14 % меламіну, 10...12 % ПЕР, 16 % ПВА-дисперсії та воду. Отриману масу перемішували, вводили наповнювачі у кількості 10 % та наносили на стальну пластину товщиною 0,5...0,6 мм (рис. 1).



Рис. 1. Зразок покриття на стальній пластині

Джерело: розроблено авторами.

Зовнішній вигляд та структуру покриття суттєво не змінюють наповнювачі.

Для дослідження процесу структуроутворення органо-неорганічної композиції та з метою отримання її елементного складу використовували один із сучасних спектроскопічних методів дослідження речовини – рентгенофлуоресцентний аналіз. Метод РФА заснований на зборі та подальшому аналізі спектра, що виникає при опроміненні досліджуваного зразка рентгєнівським випромінюванням [13].

Відповідно до вимог [14] проводили термогравіметричний аналіз. Виконували термогравіметричне дослідження процесів деструкції в динамічному режимі з метою визначення області температур, за яких термічна деструкція деревини відбувається найбільш інтенсивно. Для цього застосовували обладнання із використанням ТА (термічного аналізу) з модулем ТГА (термогравіметричного аналізу) – Q-1500 D. У всіх дослідах маса зразка становила 190 мг, швидкість нагрівання – 5 градусів на хвилину, зразок порівняння – порошок α -корунду, матеріал тиглів – алунд, чутливість гальванометрів: DTA – 250 мкВ, DTG – 500 мкВ.

Результати обговорення. За даними РФА (рис. 2, крива 1) фіксуються дифракційні сплески водонерозчинного поліфосфату амонію II типу – $(\text{NH}_4)_m(\text{HPO}_4)_n$ $d = 0,939; 0,781; 0,696; 0,605; 0,566; 0,557; 0,534; 0,482; 0,486; 0,457; 0,4221; 0,389; 0,374; 0,349; 0,312; 0,307; 0,265; 0,260; 0,251; 0,248; 0,237; 0,223; 0,211; 0,201; 0,187; 0,176; 0,172; 0,168; 0,160; 0,155; 0,152$ нм.

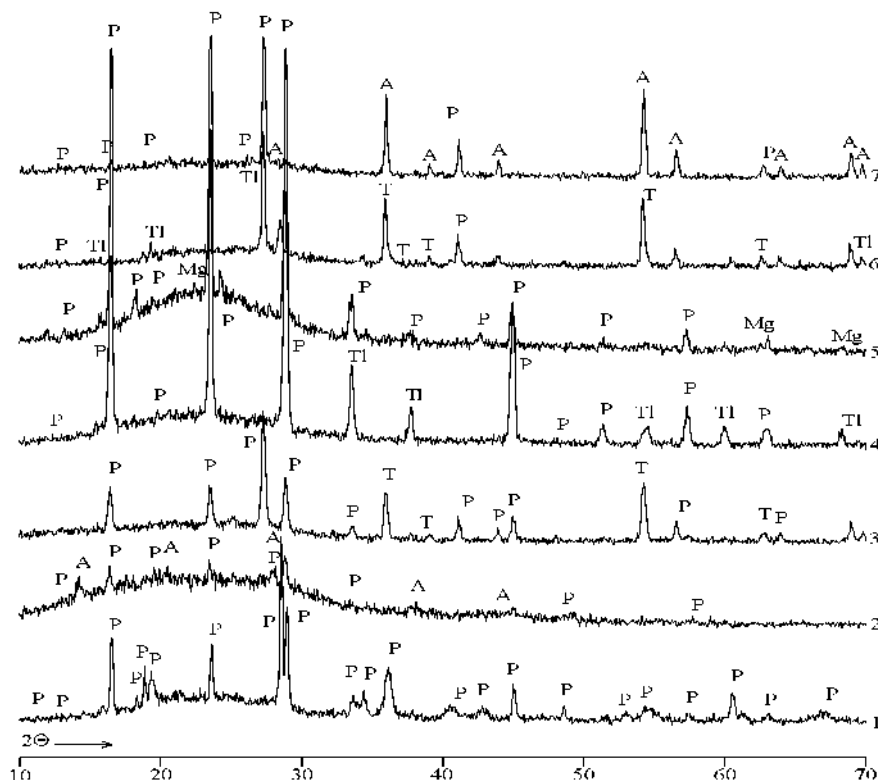


Рис. 2. Рентгенограми органо-неорганічної вогнезахисної композиції:

1 – органо-неорганічне; 2 – органо-неорганічне+ $\text{Al}(\text{OH})_3$ (10%);

3 – органо-неорганічне+ TiO_2 (10%); 4 – органо-неорганічне+тальк (10%);

5 – органо-неорганічне+ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (10%); 6 – органо-неорганічне+ TiO_2 (5%)+тальк (5%);

7 – органо-неорганічне+ TiO_2 (5%)+ $\text{Al}(\text{OH})_3$ (5%)

Джерело: розроблено авторами.

Дифракційні сплески пентаеретриту та меламіну на дифрактограмі відсутні. Їх наявність підтверджується даними ДТА по ряду ендоефектів, характерних для цих складових (рис. 3, крива 1).

Для доведення даних досліджень був проведений відповідний термогравіметричний аналіз, який продемонстрував залежність втрати маси для даних композицій (рис. 3). На рис. 4 показано зразки пінококсу.

При проведенні досліджень встановлена ефективність використання наповнювачів разом із неорганічними та органічними речовинами як вогнезахисних покриттів, зокрема:

- здійснено дослідження процесу спучення вогнезахисних покриттів, визначено зміну температури та кінетику розкладу зразків при термічній дії за запропонованим способом дослідження кінетики спучування покриттів, значення якого полягає у впливі теплового потоку за певний проміжок часу на зразок, вимірюванні температури на зворотній поверхні та перед зразком і встановленні теплоізоляційних властивостей;

- випробування на модельних зразках покриттів органо-неорганічних покриттів з вмістом наповнювачів показали, що покриття на основі органо-неорганічних речовин при дії високої температури утворює значний коефіцієнт спучення, проте з часом йде процес вигорання пінококсу та зменшення ефекту спучення.

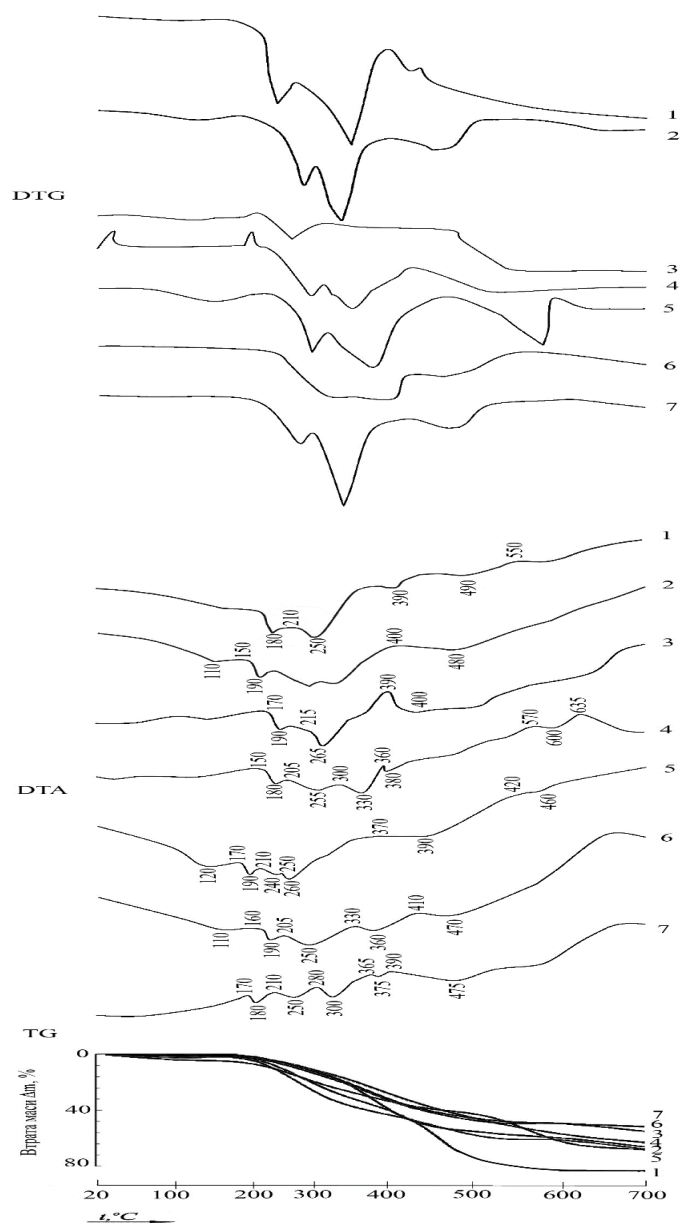


Рис. 3. Дериwатограми органо-мiнеральних вогнезахисних композицiй:
 1 – органо-неорганiчне; 2 – органо-неорганiчне+Al(OH)₃ (10%);
 3 – органо-неорганiчне+TiO₂ (10%); 4 – органо-неорганiчне+тальк (10%);
 5 – органо-неорганiчне+Mg(OH)₂(10%); 6 – органо-неорганiчне+TiO₂ (5%)+тальк(5%);
 7 – органо-неорганiчне +TiO₂(5%)+Al(OH)₃ (5%)

Джерело: розроблено авторами.

Натомiсть утворенню тугоплавких композицiй, що запобiгають вигоранню пiнококсу i проходженню високої температури до матерiалу, запобiгає додавання до органо-неорганiчної системи покриття наповнювачiв.

Так, на зазначенiй кривiй фiксується екзоэффект У дiапазонi температур (+) 60...70 °С, який пояснює часткове окислення (осмолення) пентаеритриту. При збiльшеннi температури відбувається часткова деструкцiя пентаеритриту, про що свiдчить наявнiсть ендоефектiв на кривiй ДТА при температурах: (-) 255, 300 i 350 °С, якi описують хiмiчні перетворення даної складової, а саме, проходження стадii пiролізу з утворенням метанолу, формальдегiду з видiленням води та подальшою деструкцiєю в напрямку утворення акролену, вуглекислоти та смоляного залишку з синтезом альфаметилакролену.

Одночасно з цим процесом відбувається деструкція ПВА-дисперсії – ендоефект при температурі (-) 200 °С, який пов'язаний з виділенням оцтової кислоти та утворенням подвійних зв'язків у атомах вуглецю. Збільшення температури дії призводить до термоокислення ПВА-дисперсії екзоэффект при температурі (+) 400 °С і терморозпаду меламіну, який характеризується значним газовиділенням, що призводить до утворення поризованого шару пінококсу неупорядкованої структури (рис. 3, а).

Процес коксоутворення аналогічно проходить і для інших композицій, але дещо зі своєю специфікою. Так, введення до складу органо-неограничної композиції 10 % $\text{Al}(\text{OH})_3$ $d = 0.309; 0.248; 0.229; 0.204; 0.169; 0.162; 0.145$ нм (рис. 1, крива 2) призводить до збільшення величини коефіцієнта спучення за рахунок двохступеневої дегідратації гідроаргіліту: ендоефекти в діапазоні температур (-) 250...300 і 500...550 °С (рис. 2, крива 2). Подальше збільшення температури впливу сприяє додатковому виділенню парів води зі структури гідроксиду та сприяє поліморфному переходу $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ і утворенню ортофосфатів алюмінію різних структурних типів з ефектом армування поризованого шару пінококсу, екзоэффект при температурі (+) 800 °С (рис. 3, б). Внаслідок проходження цих процесів структура пінококсу ущільнюється, зміцнюється за рахунок утворення більш дрібних пор порівняно з попереднім типом структури (рис. 3, а). В органо-неорганічній вогнезахисній композиції, що містить 10 % TiO_2 (рис. 1, крива 3) окрім фаз поліфосфату амонію фіксуються дифракційні сплески, які характерні для TiO_2 ($d = 0,2929; 0,249; 0,168; 0,154$ нм). На кривій РФА не фіксуються дифракційні відображення, які були б характерними для фосфатів титану.

Ймовірно, що фосфати титану виду $\text{Ti}(\text{OH})_2(\text{HPO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ і $\text{Ti}(\text{HPO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ утворюються в результаті твердофазової реакції між TiO_2 та продуктом часткової дефосфізації фосфату амонію $(\text{HPO}_3)_n$. При підвищенні температури від 300 до 600 °С на кривій ДТА відмічено ендоефект (-) 600 °С, який характерний для початку дегідратації вище зазначених фаз з утворенням безводних високотемпературних фосфатів титану (рис. 2, крива 3), які значно підвищують термоопір шару пінококсу (рис. 3, в). Макроструктура шару пінококсу складається з глобул більших розмірів порівняно з макроструктурою композиції, що вміщує 10% $\text{Al}(\text{OH})_3$.

При введенні до складу органо-неограничної композиції 10% тальку на кривій РФА (рис. 1, крива 4) фіксуються дифракційні сплески, які є характерними для цього мінералу $d = 0,266; 0,238; 0,175; 0,171; 0,159; 0,155$ нм. Дегідратація тальку в напрямку утворення енстатиту проходить при температурі 930...950 °С. Енстатит реагує з частково дефосфізованим $(\text{HPO}_3)_n$ з утворенням силікофосфату магнію. Ця фаза є достатньо температуростійкою й значно підвищує температуростійкість шару пінококсу. Макроструктура пінококсу дещо схожа на макроструктуру базової композиції, але відрізняється від неї своєю нерозривністю (рис. 3, з).

Введення до 10% гідроксиду магнію принципово не змінює формування макроструктури шару пінококсу (рис. 3, д). Дегідратація $\text{Mg}(\text{OH})_2$ $d = 0,47; 0,179; 0,149$ нм (рис. 1, крива 5) відбувається в діапазоні температур 400...550 °С з утворенням MgO з подальшою його взаємодією з $(\text{HPO}_3)_n$ в напрямку утворення фосфату магнію, як високотемпературної фази, що зміцнює структуру шару пінококсу та підвищує його стійкість до дії високих температур. Макроструктура шару пінококсу лускоподібна (рис. 3, д).

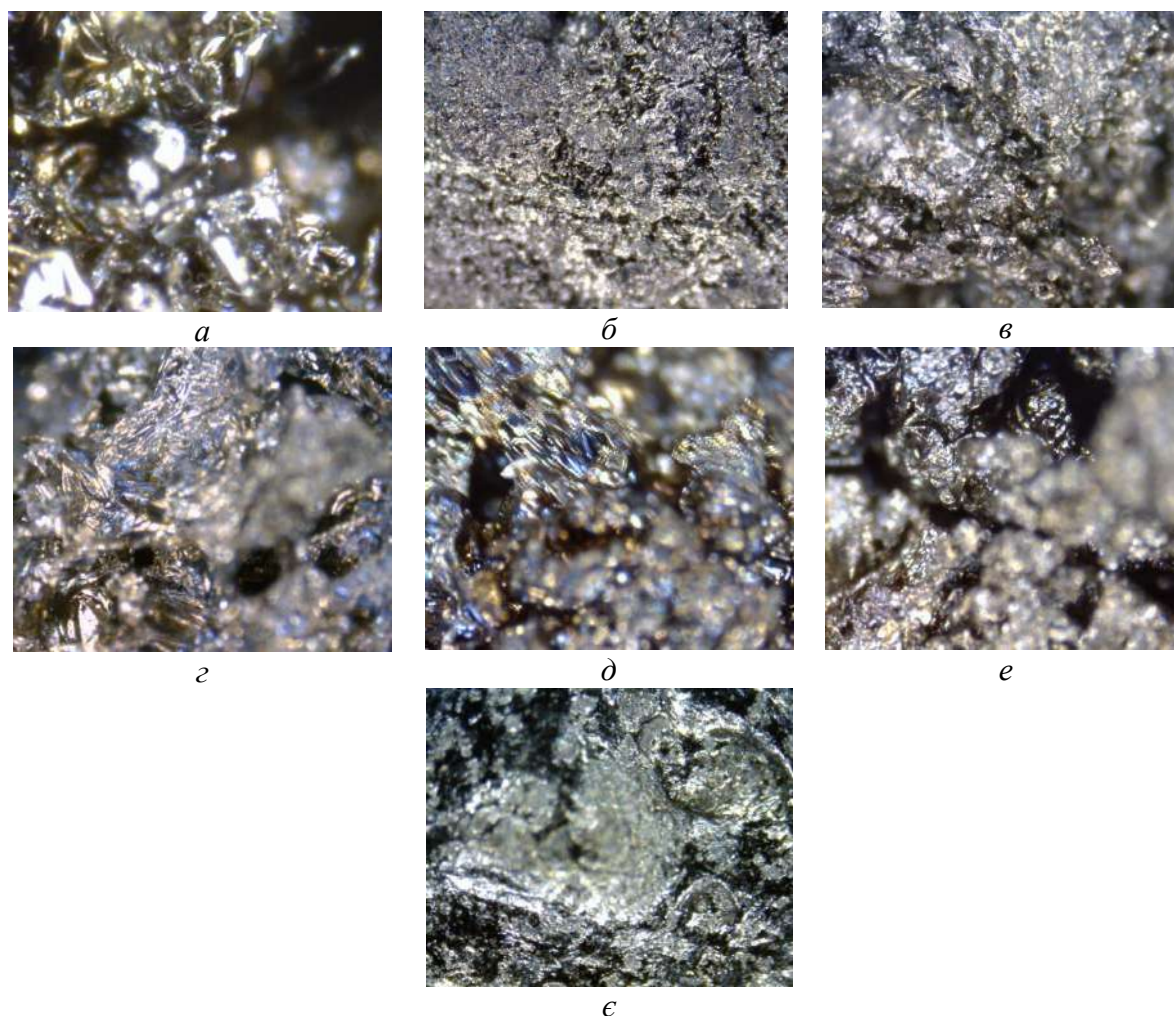


Рис. 4. Цифрові фотографії шару пінококсу після спучення при температурі 500 °С:
 а – органо-неорганічне; б – органо-неорганічне + $Al(OH)_3$ (10%); в – органо-неорганічне + TiO_2 (10%); г – органо-неорганічне + тальк (10%); д – органо-неорганічне + $Mg(OH)_2$ (10%); е – органо-неорганічне + TiO_2 (5%) + тальк (5%); є – органо-неорганічне + TiO_2 (5%) + $Al(OH)_3$ (5%) (збільшення фотографій у 20 разів)

Джерело: розроблено авторами.

Сумісне введення неорганічних добавок діоксиду титану та тальку в кількості 5 % не призводить до суттєвої зміни фазового складу пінококсу. На кривій РФА (рис. 1, крива б) фіксуються дифракційні сплески фосфату амонію, діоксиду титану ($d = 0,293; 0,249; 0,168; 0,154$ нм) і тальку ($d = 0,688; 0,33; 0,238; 0,190; 0,176; 0,142$ нм). Макроструктура шару пінококсу стає щільнішою за рахунок її армування титаномагнієвими фосфатами (рис. 3, е).

На наш погляд, найбільш доцільним є введення в склад органо-неорганічної композиції суміші діоксиду титану з гідроксидом алюмінію в кількості по 5 % кожної. На кривій РФА (рис. 1, крива 7) досить суттєво вирізняються дифракційні сплески, які характерні для поліфосфату амонію та гідроксиду алюмінію $d=0,309; 0,248; 0,229; 0,204; 0,169; 0,162; 0,145$ нм. Дифракційні сплески для діоксиду титану характеризуються меншою інтенсивністю $d=0,292; 0,262; 0,249; 0,2017; 0,168; 0,154$ нм. При збільшенні температури в складі продуктів можливе утворення змішаних титаноалюмінієвих фосфатів, які відрізняються від титаномагнієвих значно вищою термостійкістю. Макроструктура шару пінококсу подібна композиції, що вміщує 10% гідроксиду алюмінію, але відрізняється від неї більшим ступенем упорядкованості (рис. 3, є).

Визначено, що включення мінеральних наповнювачів до складу органо-неорганічної системи в кількості 10 % забезпечує збільшення коефіцієнта спучення від 30 до 36,7, що в 1,5...1,84 рази більше від значення коефіцієнта спучення органо-неорганічної композиції без наповнювачів оптимального складу. Включення до складу органо-неорганічної системи до 10 % TiO_2 забезпечує зменшення коефіцієнта спучення в 1,74...2,13, порівняно з вищенаведеними добавками та в 1,16 рази, порівняно з композицією без наповнювачів, однак суттєво збільшує термічну стійкість утвореного пінококсу.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У результаті проведених досліджень показано, що введення оксиду титану та гідроксиду алюмінію в кількості 5 % сприяє досягненню найбільшого значення коефіцієнта спучення – до 47, який у 1,11 рази більше за значення коефіцієнта спучення при введенні оксиду титану, гідроксиду алюмінію та тальку в кількості 3,3 %, в 1,12 рази більше за значення коефіцієнта спучення при введенні оксиду титану й тальку в кількості 5 %, а також у 1,08 рази більше за значення коефіцієнта спучення при введенні гідроксиду алюмінію та тальку в кількості 5 %.

Встановлено, що при високій температурі органо-неорганічне покриття здатне до значної втрати маси. Так, при 700°C включення наповнювачів призводить до утворення тугоплавких композицій, які протидіють вигоранню утвореного пінококсу. При цьому збільшується ефективність вогнезахисту будівельних конструкцій.

На основі фізико-хімічних методів досліджень показано, що введення в склад органо-неорганічної композиції суміші діоксиду титану з гідроксидом алюмінію в кількості по 5 % кожної призводить до збільшення коефіцієнта спучення, упорядкованості структури шару пінококсу, підвищення його термостійкості за рахунок дегідратації змішаних титаноалюмінієвих фосфатів.

Подальші дослідження будуть направлені на теоретичне та експериментальне вивчення процесів горіння матеріалів із деревини, а також встановлення взаємозв'язку між властивостями й складовими засобів захисту.

Список використаних джерел

1. Tsapko, Yu. Effect of a flame-retardant coating on the burning parameters of wood samples / Yu. Tsapko, O. Bondarenko, A. Tsapko // *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*. – 2019. – Vol. 2, No10 (98). – Pp. 49-54. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.163591.
2. Tsapko, Yu. Establishment of heat-exchange process regularities at inflammation of reed samples / Yu. Tsapko, A. Tsapko, O. Bondarenko // *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*. – 2019. – Vol. 1, No10 (97). – Pp. 36-42. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156644.
3. Neue Wege: Reaktive Brandschutzbeschichtungen für Extrembedingungen / S. Krüger, G. J. G. Gluth, M. B. Watolla, M. Morys, D. Häßler, B. Schartel // Berlin, Bautechnik. – 2016. – Vol. 93, Is. 8. – Pp. 531-542.
4. Tsapko Yu. Establishment of the mechanism and fireproof efficiency of wood treated with an impregnating solution and coatings / Yu. Tsapko, A. Tsapko // *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*. – 2017. – Vol. 3, No 10 (87). – Pp. 50-55.
5. Heat and Sound Insulation Material Prepared Using Plant Raw Material / V. G. Babashov, A. S. Bepalov, A. V. Istomin, N. M. Varrik // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2017. – Vol. 58(2). – Pp. 208-213.
6. Effects of Complex Flame Retardant on the Thermal Decomposition of Natural Fiber / Na Xiao, Xue Zheng, Shuping Song, Junwen Pu // *United States: BioResources*. – 2014. – Vol. 9, No 3. – Pp. 4924-4933.
7. The effect of synthetic and natural fire-retardants on burning and chemical characteristics of thermally modified teak (*Tectona grandis* L. f.) wood / M. Gaff, F. Kačík, M. Gašparík, L. Makovická Osvaldová, H. Čekovská // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 200. – Pp. 551-558.
8. Zhao P. Flame retardancy and thermal degradation properties of polypropylene/wood flour composite modified with aluminum hypophosphite/melamine cyanurate / P. Zhao, C. Guo, L. Li // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2018. – Pp. 1-9.

9. Carosio, F. Ultra-Fast Layer-by-Layer Approach for Depositing Flame Retardant Coatings on Flexible PU Foams within Seconds / F. Carosio, J. Alongi // *Acs applied materials & Interfaces. – Elettronico.* – 2016. – Vol. 8 (10). – Pp. 6315-6319.
10. Khalili P. Synergistic of ammonium polyphosphate and alumina trihydrate as fire retardants for natural fiber reinforced epoxy comp / P. Khalili, K.Y. Tshai, D. Hui, I. Kong // *Composites Part B: Engineering.* – 2017. – Vol. 114. – Pp. 101-110.
11. Experimental study on hygrothermal accelerated aging effects of transparent fire resistive wood structure coatings / T. Zhang, H. Huang, X. Ge, Z. Zhang, P. Li // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2022. – № 2194 (1). – 012038. DOI:10.1088/1742-6596/2194/1/012039.
12. Highly fire-retardant optical wood enabled by transparent fireproof coatings / T. Chu, Y. Gao, L. Yi, Q. Huang, Z. Wang // *Advanced Composites and Hybrid Materials.* – Vol. 5 (3). – 2022. – Pp. 1-9. DOI:10.1007/s42114-022-00440-3.
13. Sprang, H. A. Fundamental parameter methods in XRF spectroscopy / H. A. Sprang // *Advances in X-ray Analysis.* – 2000. – Vol 42. – Pp. 1-11.
14. Broido, A. A simple sensitive graphical method of treating thermogravimetry analyse data / A. Broido, J. Polym. // *Sci.* – 1969. – Part A, Vol. 7, No 2. – Pp. 1761-1773.

References

1. Tsapko, Yu., Bondarenko, O., & Tsapko, A. (2019). Effect of a flame-retardant coating on the burning parameters of wood samples. *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*, 2(10(98)), 49-54. doi:10.15587/1729-4061.2019.163591.
2. Babashov, V.G., Bepalov, A.S., Istomin, A.V., & Varrik, N.M. (2017). Heat and Sound Insulation Material Prepared Using Plant Raw Material. *Refractories and Industrial Ceramics*, 58(2), 208-213.
3. Krüger, S., Gluth, G.J.G., Watolla, M.B., Morys, M., Häßler, D., & Schartel, B. (2016). Neue Wege: Reaktive Brandschutzbeschichtungen für Extrembedingungen. *Berlin, Bautechnik*, 93(8), 531-542.
4. Tsapko, Yu., & Tsapko, A. (2017). Establishment of the mechanism and fireproof efficiency of wood treated with an impregnating solution and coatings. *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*, 3(10(87)), 50-55.
5. Tsapko, Yu., Kyrycyok, V., Tsapko, A., Bondarenko, O., & Guzii, S. (2018). Increase of fire resistance of coating wood with adding mineral fillers. *MATEC Web of Conferences*, 230(02034), 1-6. doi:10.1051/mateconf/201823002034.
6. Xiao, Na, Zheng, Xue, Song, Shuping, Pu, & Junwen (2014). Effects of Complex Flame Retardant on the Thermal Decomposition of Natural Fiber. *United States: BioResources*, 9(3), 4924-4933.
7. Gaff, M., Kačík, F., Gašparík, M., Makovická Osvaldová, L., & Čekovská, H. (2019). The effect of synthetic and natural fire-retardants on burning and chemical characteristics of thermally modified teak (*Tectona grandis* L. f.) wood. *Construction and Building Materials*, 200, 551-558.
8. Zhao, P., Guo, & C., Li, L. (2018). Flame retardancy and thermal degradation properties of polypropylene/wood flour composite modified with aluminum hypophosphite/melamine cyanurate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1-9.
9. Carosio, F., & Alongi, J. (2016). Ultra-Fast Layer-by-Layer Approach for Depositing Flame Retardant Coatings on Flexible PU Foams within Seconds. *Acs applied materials & Interfaces. Elettronico*, 8(10), 6315-6319.
10. Khalili, P., Tshai, K.Y., Hui, D., & Kong, I. (2017) Synergistic of ammonium polyphosphate and alumina trihydrate as fire retardants for natural fiber reinforced epoxy comp. *Composites Part B: Engineering*, 114, 101-110.
11. Zhang, T., Huang, H., Ge, X., Zhang, Z., & Li, P. (2022). Experimental study on hygrothermal accelerated aging effects of transparent fire resistive wood structure coatings. *Journal of Physics: Conference Series*, 2194(1), 012038. doi:10.1088/1742-6596/2194/1/012039.
12. Chu, T., Gao, Y., Yi, L., Huang, Q., & Wang, Z. (2022). Highly fire-retardant optical wood enabled by transparent fireproof coatings. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 5(3), 1-9. doi:10.1007/s42114-022-00440-3.
13. Sprang, H.A. (2000). Fundamental parameter methods in XRF spectroscopy. *Advances in X-ray Analysis*, 42, 1-11.
14. Broido, A. (1969). A simple sensitive graphical method of treating thermogravimetry analyse data. *J. Polym. Sci. Part A.*, 7(2), 1761-1773.

**Yuriy Tsapko¹, Olga Bondarenko², Alexey Tsapko³,
Alexandra Gorbachova⁴, Sergey Mazurchuk⁵**

¹Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technologies and Design of Wood Products
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv Ukraine)

E-mail: juriyts@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0625-0783>

²PhD of Technical Sciences, Associate professor of the Department of Building Materials
Kyiv National University of construction and architecture (Kyiv Ukraine)

E-mail: bondolya3@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8164-6473>. **ResearcherID:** [M-1453-2018](https://orcid.org/0000-0002-8164-6473)

³PhD of Technical Sciences, Senior Research Fellow

Ukrainian State Research Institute "Resource" (Kyiv Ukraine),

Associate professor of the Department of Building Materials

Kyiv National University of construction and architecture (Kyiv Ukraine)

E-mail: aleksejtsapko@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2298-068X>

⁴PhD of Technical Sciences, Associate professor of the Department of Technologies and Design of Wood Products
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv Ukraine)

E-mail: gorbachova.sasha@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7533-5628>

⁵PhD of Technical Sciences, Associate professor of the Department of Technologies and Design of Wood Products
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv Ukraine)

E-mail: mazurchuk.s.m@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6008-9591>

MECHANISM STRUCTURE FORMATION OF A FOAMED FOAM LAYER UNDER THE INFLUENCE OF MINERALS

The studies have established the effect of fillers on the performance of the fireproof coating, the parameters of its swelling under the influence of temperature and inhibition, which makes it possible to influence this process. The effect of fillers on the coefficient of swelling of coatings based on inorganic and organic substances during thermal exposure was investigated. It is proved that it consists in the creation of a layer on the surface of the material that prevents heating to a critical temperature and decomposition of the material. Experimental studies have confirmed that the introduction of titanium oxide and aluminum hydroxide in the amount of 5% contributes to the achievement of the highest value of the coefficient of swelling - up to 47, which is 1.11 times higher than the value of the coefficient of swelling when aluminum hydroxide is introduced, titanium oxide and talc in the amount of 3.3%, 1.12 times higher than the value of the coefficient of swelling when titanium oxide and talc in the amount of 5% were added, and 1.08 times higher than the value of the coefficient of swelling when aluminum hydroxide and talc in the amount of 5% were added. The influence of fillers under the action of high-temperature heat flow on the change in the process of swelling of the fireproof coating was established and the mechanism of the kinetics of the fillers' action, characterized by a decrease in speed and mass loss, was determined. Thus, at 700 °C, the introduction of fillers leads to the formation of refractory compositions that prevent the burnout of the resulting foam coke, which increases the efficiency of fire protection of building structures. On the basis of physicochemical research methods, it is shown that the introduction of a mixture of titanium dioxide and aluminum hydroxide in the amount of 5% each into the composition of the organic-inorganic composition leads to an increase in the coefficient of swelling, orderliness of the structure of the foam coke layer, and an increase in its heat resistance due to the dehydration of mixed titanium-aluminum phosphates.

Keywords: fire resistance; coating; weight loss; swelling capacity; temperature; refractory fillers; coating efficiency.

Fig.: 4. **References:** 14.

Оксана Гера

кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії та землеустрою

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (Івано-Франківськ, Україна)

E-mail: geraoksana@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6670-2820>. Researcher ID: [K-2209-2017](https://orcid.org/0000-0001-6670-2820)

ВПЛИВ МОРФОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЛЬЄФУ НА ПЛОЩУ ПОВЕРХНІ ЗЕМЕЛЬНИХ ДІЛЯНОК ЛІСОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У роботі апробовано використання некомерційних даних дистанційного зондування Землі для визначення площ поверхні земельних ділянок. Запропоновано алгоритм отримання даних місії SRTM, генерації цифрових моделей рельєфу для подальшого визначення морфометричних параметрів рельєфу та обчислення площі поверхні ділянок. Для досліджень обрано п'ять лісовкритих ділянок на території України. Встановлено залежність величини відхилення площі поверхні земельної ділянки від площі її горизонтальної проекції, від пересіченості рельєфу.

Ключові слова: матеріали дистанційного зондування Землі; цифрова модель рельєфу (ЦМР); площа поверхні ділянки; землі лісогосподарського призначення; ухил рельєфу; пересіченість.

Табл.: 1. Рис.: 3. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Як відомо, земельна ділянка характеризується такими основними атрибутами: цільове призначення, місце розташування та координати поворотних точок, нормативна грошова оцінка (НГО) та площа. Метою наших досліджень є глибше вивчення останнього кількісного показника. Незаперечним є той факт, що земля була й буде особливо цінним об'єктом цивільно-правових операцій. У світлі скасування мораторію на обіг земель товарного сільськогосподарського призначення в Україні починаючи з 2021 року, стратегічно важливо мати в розпорядженні актуальні ставки НГО та площі земельних ділянок, визначені з достатньою точністю.

Постановка проблеми. У цілому для всіх категорій земель справедливі твердження, що точне значення площі ділянок потрібні для ведення обліку земель та внесення даних до державного земельного кадастру (ДЗК); а також для встановлення реальних розмірів земельного податку чи орендної плати. Для земель лісо- та сільськогосподарського призначення площа також визначає обсяги обробітку та одержаної продукції. Важливо зазначити, що аналіз нормативної документації щодо здійснення геодезичних та землепорядних робіт виявив відсутність регламентованих показників точності обчислення площ земельних ділянок. Крім того, немає вказівок щодо методики визначення площі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перелічені прогалини послугували основою для багатьох наукових досліджень. У [1] встановлено значення середньої квадратичної помилки обчислення площі земельної ділянки залежно від кількості контурних точок та її геометричної конфігурації. Розрахунок значень допустимих середніх квадратичних похибок площ ділянок за межами населених пунктів та рекомендації щодо доповнень вимог нормативних документів здійснено у праці [2].

У перелічених вище роботах площа земельних ділянок визначається через формулу Гаусса, де аргументами виступають прямокутні координати поворотних точок меж ділянки. Відповідно точність визначення площі є функцією точності визначення координат таких точок. У такому разі кривизна поверхні земної поверхні не враховується. Дослідження [3] стосуються спроби переходу від плоских прямокутних координат до геодезичних координат на еліпсоїді з метою зменшення впливу викривлення площ.

Обчислення площ аналітичним способом із використанням формули Гаусса цілком справедливе для ділянок незначних площ, які переважають у власності фізичних та юридичних осіб. Однак для земельних ділянок площею десятки та сотні гектарів необхідно брати до уваги такий фактор як рельєф. Огляд публікацій у вказаному напрямку свідчить про зацікавленість фахівців цим питанням.

Зокрема у [2] розглянуто вісім районів Дніпропетровської області, де значні простори придатні для вирощування сільськогосподарських культур. Для всіх районів сформовано цифрові моделі рельєфу, описано особливості рельєфу, обчислено геодезичну та фізичну площу. Автори використовують термін «геодезична» – для позначення площі проєкції ділянки на горизонтальну площину, а «фізична» відповідно для позначення площі реальної поверхні. У середньому різниця вказаних площ по восьми районах становила 0,2 %. Навіть на рівнинній території, поверхня земельної ділянки геодезичною (юридичною) площею 1000 га реально на 2 га більша. Запропоновано методика визначення площі великих земельних ділянок із врахуванням величини кутів нахилу рельєфу.

У роботі [4] сконцентровано увагу на врахуванні характеру рельєфу земельної ділянки лісогосподарського призначення (рівнинний, нахилений, пересічений) для визначення її площі. Запропоновано математичний апарат для обчислення площі та проведено відповідні розрахунки для обраних зразків земної поверхні. Результати підтвердили гіпотезу щодо впливу рельєфу на значення площі поверхні та коректність застосування підбраного математичного підходу.

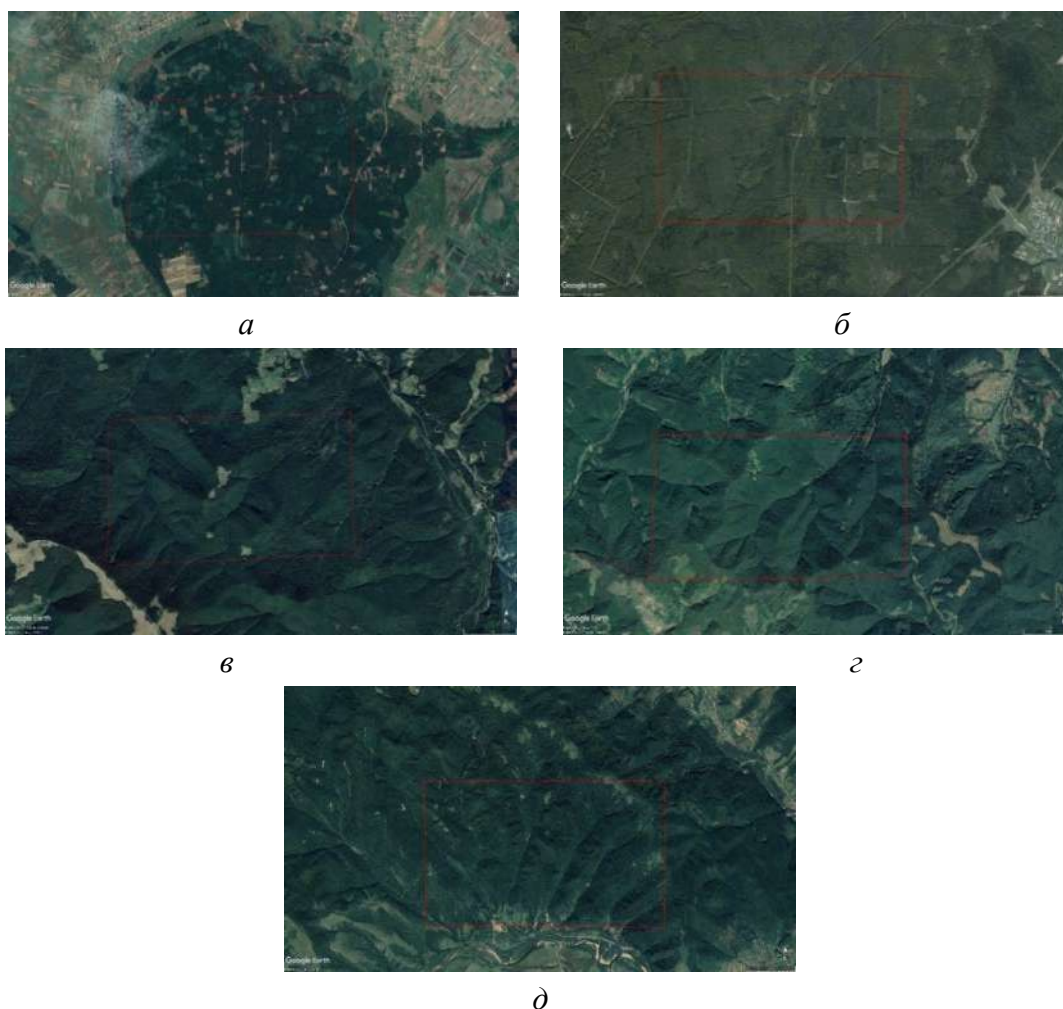
Виділення недосліджених частин загальної проблеми. На основі наведеного вище аналізу літературних джерел, за мету покладено встановлення можливості використання даних дистанційного зондування Землі для генерації цифрових моделей рельєфу вибраних ділянок з метою оцінки їхньої площі.

Параметри рельєфу більшою мірою вносять розбіжності у площі ділянок лісогосподарського призначення. Адже очевидно, що різниця площ поверхні та її горизонтальної проєкції вагома за умови значного кута нахилу рельєфу і/або його високої пересіченості. Ділянки з такими параметрами переважно не придатні для рільництва (хоча, серед с/г угідь можна розглядати пасовища для сінокоси). Тема досить актуальна, адже в Україні та інших країнах облік землі (та оподаткування) встановлюється за геодезичною площею (горизонтальною проєкцією). В американському дописі [5] поставлено запитання чи дійсно один акр горбистої місцевості містить більше землі, ніж один акр рівнинної. Для розуміння пояснюють, що для того, щоб вкрити один акр землі штату Вермонт потрібна більша ковдра, ніж для одного акру землі штату Канзас. Цікаве питання і для Великобританії, де обмежені просторові ресурси. На ділянці зі значним ухилом можна випасати більше овець, отримуючи кращі прибутки, ніж на рівнозначній за горизонтальною площею рівнинній ділянці.

Мета дослідження: встановити кількісно розходження площі поверхні земельної ділянки та площі її горизонтальної проєкції на прикладі лісовкритих ділянок значних розмірів; перевірити можливість використання безкоштовних супутникових даних як вихідних для розрахунків; зробити висновок щодо доцільності встановлення такого кількісного показника та його впливу на облік та управління земельними ресурсами.

Виклад основного матеріалу. За даними Державного агентства лісових ресурсів України, лісистість держави становить 15,9 % (2019 р.), Україна займає 9-е місце в Європі за площею лісів та 6-е місце за запасами деревини. Лісові ресурси – відносно відновні, адже інтенсивність їхнього господарського використання перевищує швидкість їхнього відновлення. Важливо здійснювати строгий облік цих ресурсів. Значення площ лісогосподарських земельних ділянок фігурує під час планування заліснення територій; під час визначення втрат деревостоїв, наприклад, після сходження лавин чи лісових пожеж; для розрахунків обсягів виконаних робіт лісниками тощо.

Для вибору заліснених ділянок для дослідження ми скористались безкоштовним сервісом Google Earth (дата отримання космічних знімків: 2005-2020 рр.). Обрано п'ять ділянок прямокутної форми, розмірами 4400*2600 м (рис. 1). Попередньо потрібно налаштувати параметри, вибрано ортогональний вигляд зображення, картографічну проєкцію – Універсальна поперечна проєкція Меркатора. Ділянки збережено у форматі даних *.kmz, який розпізнається багатьма ГІС.



*Рис. 1. Ділянки л/г призначення, джерело даних – Google Earth:
а – ділянка поблизу с. Деревок, Волинська область; б – ділянка поблизу смт Брошнів-Осада, Івано-Франківська область; в – ділянка поблизу смт Ворохта, Івано-Франківська область; г – ділянка поблизу с. Ліпа, Івано-Франківська область; д – ділянка поблизу с. Верхня Стинава, Львівська область*

Для завантаження просторових даних на обрані ділянки, використано програмне забезпечення Global Mapper. Доступні для завантаження дані для території більшості земної кулі з таких космічних джерел: Aster GDEM (Global Digital Elevation Model) та SRTM (Shuttle radar topographic mission).

Доцільність використання даних SRTM та Aster GDEM для території України розглянуто у праці [6]. Продемонстровано можливість їхнього використання для моделювання задач землеустрою, моделювання гідрологічної мережі, аналізу зони покриття радіочастотних вишок, моделювання задач будівництва (планування попередніх трас лінійних споруд – дорожньої мережі, трубопроводів тощо), моделювання зон затоплення внаслідок повеней та паводків [7].

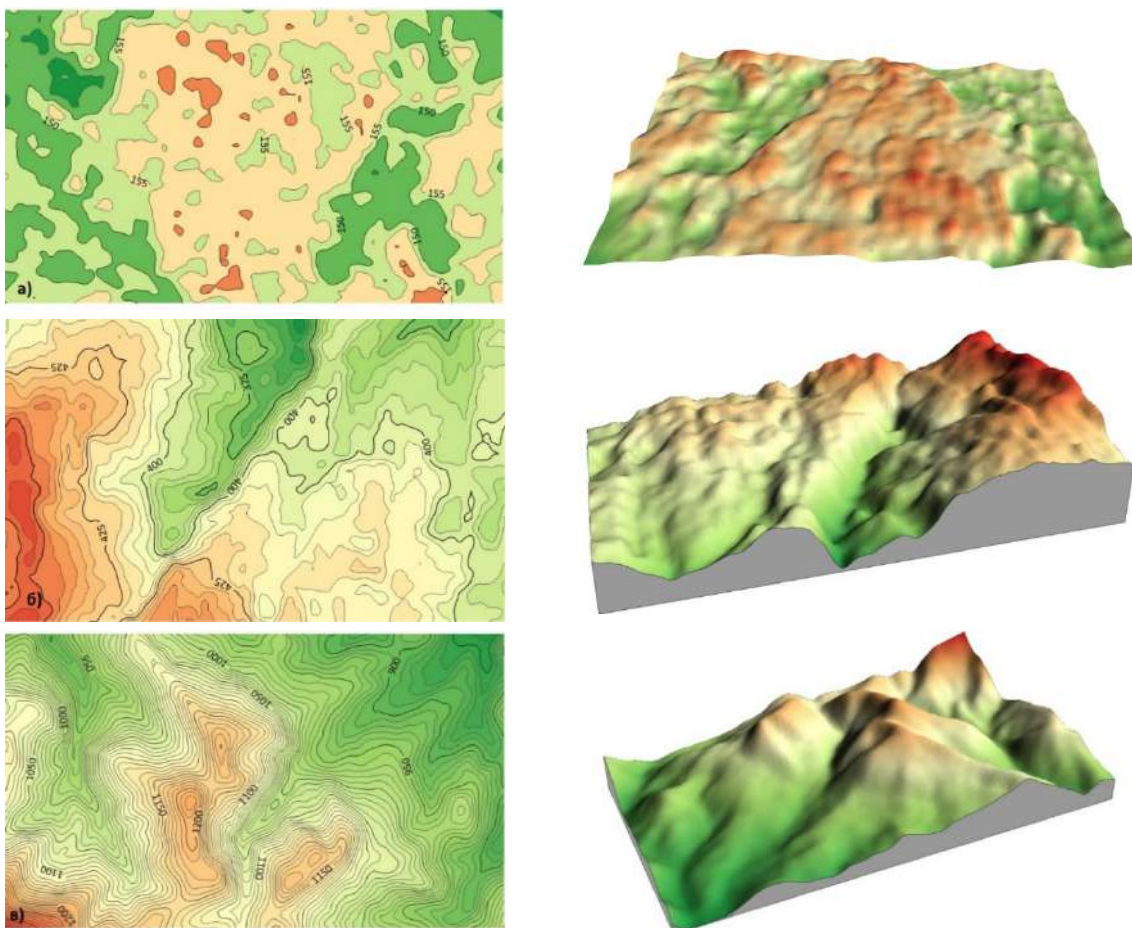
SRTM (Shuttle radar topographic mission) – це радарне інтерферометричне знімання поверхні Землі, здійснене у лютому 2000 р. радіолокаційними сенсорами SIR-C та X-SAR з борту космічного апарату «Шаттл». Дані SRTM поширюються у вигляді сіток із розміром комірки 1 кутова секунда, а також 3 кутові секунди.

Дані з меншим просторовим розрізненням (SRTM1) доступні виключно для території США, на іншу поверхню Землі доступні тільки трисекундні дані (SRTM3). Файл (SRTM3) являє собою матрицю з 1201×1201 значень, яка може бути імпортована в різні програми побудови карт і ГІС [8].

Цифрова модель рельєфу ASTER GDEM, випущена в червні 2009 року (перша версія), згенерована на основі даних сенсора ASTER супутника Terra. Сенсор має можливість здійснення стереоскопічного знімання уздовж смуги польоту за допомогою двох телескопів, що знімають у надир і назад в ближньому інфрачервоному діапазоні з роздільною здатністю 15 м. Охоплення ASTER GDEM простягається від 83 градусів північної широти до 83 градусів південної широти, покриваючи 99 % світового суходолу. Розмір чарунки сітки: 1"×1" (30×30 м).

Для створення ЦМР ASTER GDEM використовувалася автоматична обробка всього архіву даних ASTER, що нараховує 1,5 млн знімків. У 2011 році створена поліпшена версія ЦМР – ASTER GDEM Version 2: додано нові знімки, виправлено помилки попередньої версії. Виконана корекція аномалій, спричинених відсутністю даних, за рахунок додавання 350000 нових знімків. Для заміни некоректних даних використано інші ЦМР: SRTM, NED (National Elevation Dataset; USGS), CDED (Canada digital elevation data), Alyaska DEM.

За допомогою програмного забезпечення Global Mapper для ділянок, обраних для досліджень, завантажено масиви просторових даних точок у форматах *. dem, *. XYZ Grid. Наступне опрацювання рельєфу ділянок можливе у багатьох ГІС та САПР, зокрема відповідно Surfer та AutoCAD Civil 3D. У кожному випадку згенеровано регулярну сітку висот з кроком по осях абсцис та ординат 50 м (4717 вузлових точок). На рис. 2 наведено зображення рельєфу п'яти ділянок дослідження, у вигляді контурних та 3D карт. Візуалізацію виконано у програмному пакеті Surfer 23.2.202.



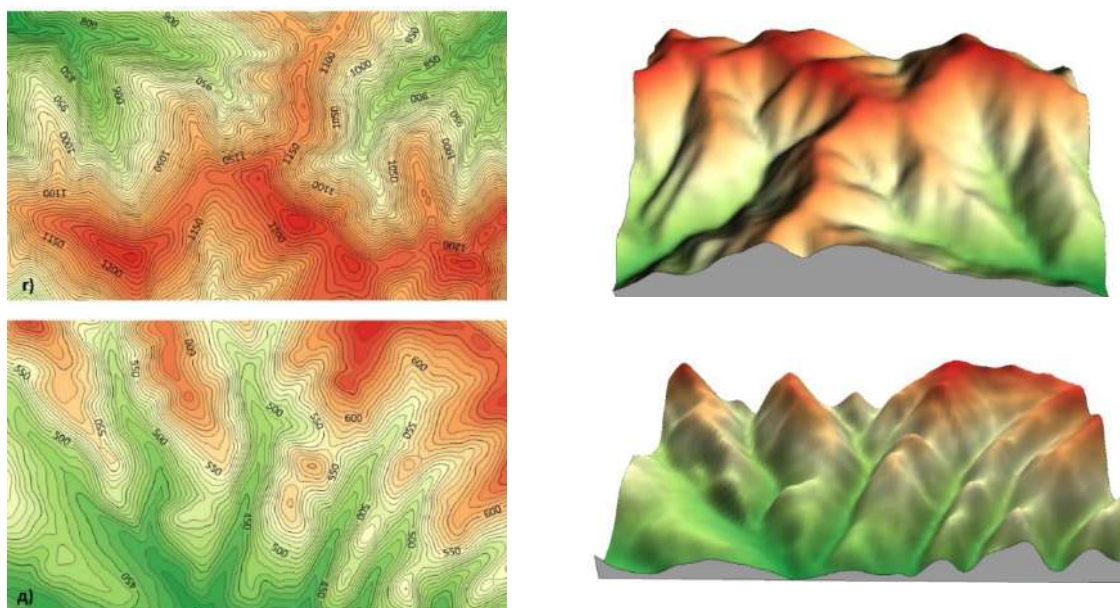


Рис. 2. Цифрові моделі рельєфу ділянок дослідження

Джерело: розроблено автором.

Оскільки розміри всіх ділянок 4400×3600 м, то площа проєкції на горизонтальну площину кожної становить 1144 га. Параметри цифрових моделей рельєфу ділянок зацікавлення, а саме координати (у проєкції UTM), мінімальні та максимальні значення відміток, перепад висоти, максимальний та середній ухил рельєфу на ділянці, а також значення фізичної площі поверхні, – визначено та зведено для порівняння в таблицю.

Таблиця – Порівняння параметрів рельєфу ділянок дослідження

Ділянка / Параметр	Ділянка А	Ділянка Б	Ділянка В	Ділянка Г	Ділянка Д
Розташування	Волинська обл., поблизу с. Деревок	Івано-Франківська обл., поблизу смт Брошнів-Осада	Івано-Франківська обл., поблизу смт Ворохта	Івано-Франківська обл., поблизу с. Липа	Львівська обл., поблизу с. Верхня Стинава
Діапазон значень X, м	380710 – 385110	288300 – 292700	316400 – 320800	691000 – 695400	685500 – 689900
Діапазон значень Y, м	5730600 – 5733200	5436500 – 5439100	5345330 – 5347930	5421000 – 5423600	5444000 – 5446600
Крок сітки, м	50	50	50	50	50
Мін. відмітка, м	142,57	350,06	835,94	715,34	399,03
Макс. відмітка, м	163,66	460,02	1338,11	1249,83	687,94
Перепад висот, м	21,09	109,96	502,17	534,49	288,91
Макс. ухил, %	15	31	74	84	60
Середній ухил, %	3,8	5,7	26,9	38,2	25,2
Площа горизонтальної проєкції ділянки, м ² (га)	11440000 (1144)	11440000 (1144)	11440000 (1144)	11440000 (1144)	11440000 (1144)
Площа поверхні, м ² (га)	11451511 (1145,15)	11470591 (1147,06)	11907737 (1190,77)	12318295 (1231,83)	11860537 (1186,05)
Різниця значень м ²	11511	30591	467737	878295	420537
га	1,15	3,06	46,77	87,83	42,05
%	0,1	0,3	4,1	7,7	3,7

Джерело: розроблено автором.

З таблиці видно, що для зазначених земельних ділянок фізична площа поверхні більша від площі горизонтальної проєкції ділянки на 1,15 – 87,83 га, або від 0,1 до 7,7%. Очевидно причиною досить широкого діапазону відхилення значення площ є різний характер рельєфу вибраних ділянок землі лісгосподарського призначення. Аналізуючи параметри, першою відмінністю, яка значно виділяється, є перепад висот місцевості. Однак для ділянок в) та г), у яких схожі значення перепаду висот (відповідно 502 і 534 м), отримано різні значення збільшення площі поверхні – на 46,77 і 87,83 га. Водночас ділянки в) та д), маючи різницю у перепаді висот майже у два рази, характеризуються приблизно однаковим значенням площі поверхні. Подальший аналіз вказує, що обидві ділянки мають однаковий середній ухил рельєфу. Можна припустити прямопропорційну залежність між значенням середнього ухилу (крутизни) рельєфу та збільшенням площі поверхні земельної ділянки порівняно з площею її горизонтальної проєкції (рис. 3).

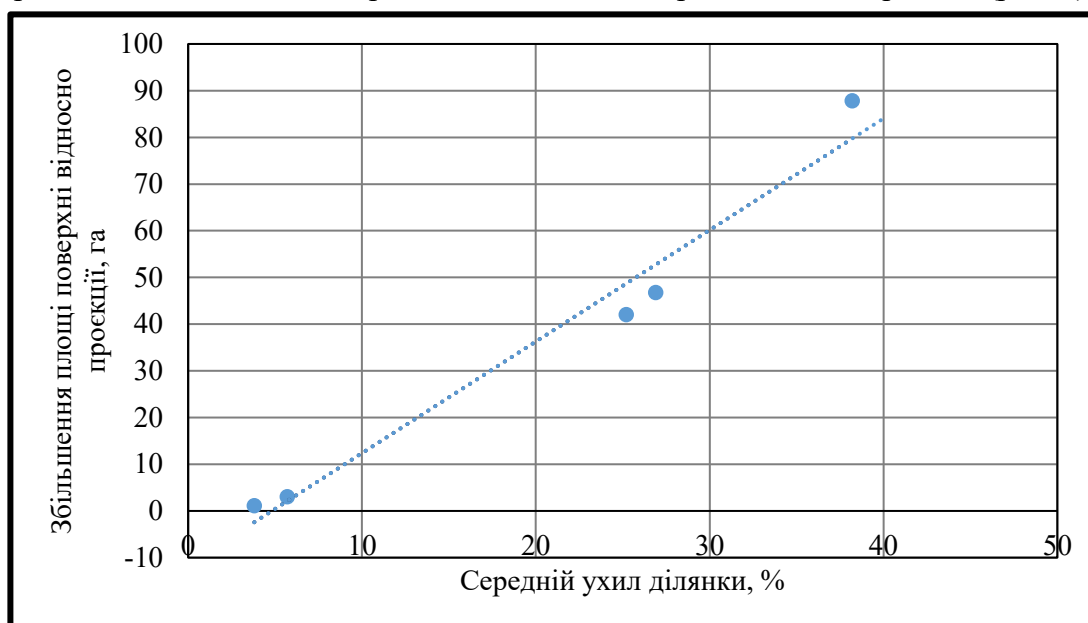


Рис. 3. Залежність збільшення площі поверхні ділянки від середнього ухилу рельєфу
Джерело: розроблено автором

Висновки. Площа поверхні, тобто реальна площа земельної ділянки, може значно відрізнитись від площі горизонтальної проєкції ділянки. Практично отримано такі значення різниці площ: 0,1-7,7 % на основі дослідження п'яти ділянок. Площа поверхні залежить від морфометричних параметрів рельєфу, а саме ухилу або крутизни, та його пересіченості. Рекомендовано враховувати для великих ділянок сільськогосподарського та лісгосподарського призначення площу її поверхні, вносити окремим параметром в дані земельного кадастру. Для підвищення точності обчислення площі поверхні потрібно використовувати ЦМР з меншим кроком сітки. Для генерації таких ЦМР можна застосовувати матеріали аерофотознімання або знімання з використанням БПЛ.

Список використаних джерел

1. Дутчин М. Дослідження точності визначення площ земельних ділянок з врахуванням кількості контурних точок та їх розташування / М. Дутчин, І. Біда, Г. Мельниченко // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2009. – Вип. I (17). – С. 301-308.
2. Рябчій В. В. Визначення допустимих значень середніх квадратичних похибок площ земельних ділянок за межами населених пунктів / В. В. Рябчій, М. В. Трегуб // Геодезія, картографія і аерофотознімання – 2011. – Вип. 74. – С. 136-141.

3. Радов С. Визначення площ ділянок земного еліпсоїда за плоскими прямокутними координатами в проекції Гаусса / С. Радов, О. Косогова // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2011. – Вип. II (22). – С. 112-115.

4. Рудий Р. Визначення площ земельних ділянок у гірських районах / Р. Рудий // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2011. – Вип. I (21). – С. 208-210.

5. Snyder M. Does an Acre of Hilly Land Contain More Land Than an Acre of Flat Land? / Michael Snyder [Electronic resource] / Michael Snyder. – Access mode: https://northernwoodlands.org/articles/article/does_an_acre_of_hilly_land_contain_more_land_than_an_acre_of_flat_land.

6. Процик М. Т. Методи фотограмметричного та картографічного супроводу багаторівневої системи моніторингу ерозійних ґрунтових процесів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.24.01 “Геодезія, фотограмметрія та картографія” / М. Т. Процик. – Львів, 2012. – 24 с.

7. Зацерковний В. І. Аналіз підходів щодо створення цифрових моделей рельєфу / В. І. Зацерковний, Н. В. Руль, Л. В. Плічко, С. В. Кривоберець // Технічні науки та технології. – 2017. – № 1 (7). – С. 87-97.

8. Мехедов Є. В. Принципи побудови мап рельєфу для наземної навігації / Є. В. Мехедов // ScienceRise. – 2018. – № 11. – С. 46-49.

References

1. Dutchyn, M., Bida, I., & Melnychenko, H. (2009). Doslidzhennia tochnosti vyznachennia ploshch zemelnykh dilianok z vrakhuvanniam kilkosty konturnykh tochok ta yikh roztashuvannia [Research on the accuracy of determining the area of land plots, taking into account the number of contour points and their location]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnystva – Modern achievements of geodetic science and production*, I (17), 301-308.

2. Riabchii, V.V., & Trehub, M.V. (2011). Vyznachennia dopustymykh znachen serednykh kvadratnykh pokhybok ploshch zemelnykh dilianok za mezhamy naselenykh punktiv [Determination of admissible values of the mean squared errors of the areas of land plots outside of the settlements]. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznmannia – Geodesy, cartography and aerial photography*, 74, 136-141.

3. Radov, S., Kosohova, & O. (2011). Vyznachennia ploshch dilianok zemnoho elipsoida za ploskymy priamokutnymy koordynatamy v proektsii Haussa [Determining the areas of the Earth's ellipsoid by flat rectangular coordinates in the Gaussian projection]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnystva – Modern achievements of geodetic science and production*, II (22), 112-115.

4. Rudyi, R. (2011). Vyznachennia ploshch zemelnykh dilianok u hirskykh raionakh [Determining the area of land plots in mountainous regions]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnystva – Modern achievements of geodetic science and production*, I (21), 208-210.

5. Michael Snyder (2008, June 1). *Does an Acre of Hilly Land Contain More Land Than an Acre of Flat Land?*.

https://northernwoodlands.org/articles/article/does_an_acre_of_hilly_land_contain_more_land_than_a_n_acre_of_flat_land.

6. Protsyk, M.T. (2012). *Metody fohrammetrychnoho ta kartohrafichnoho suprovodu bahatorivnevoi systemy monitorynhu eroziinykh gruntovykh protsesiv [Methods of photogrammetric and cartographic support of a multi-level system of monitoring soil erosion processes]* [PhD dissertation, Lviv Polytechnic National University].

7. Zatserkovnyi, V.I., Rul, N.V., Plichko, L.V., & Kryvoberets, S.V. (2017). Analiz pidkhodiv shchodo stvorennia tsyfrovykh modelei reliefu [Analysis of approaches to the creation of digital models of the terrain]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (1(7)), 87-97.

8. Mekhedov, Ye.V. (2018). Pryntsypy pobudovy map reliefu dlia nazemnoi navihatsii. [Principles of construction of relief maps for terrestrial navigation]. *ScienceRise*, 11, 46-49.

Отримано 05.06.23

Oksana Gera

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: geraoksana@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6670-2820>. Researcher ID: [K-2209-2017](https://orcid.org/0000-0001-6670-2820)

**INFLUENCE OF THE RELIEF MORPHOMETRIC PARAMETERS
ON THE SURFACE AREA OF THE FORESTRY LAND PLOTS**

A plot of land is characterized by the following main attributes: purpose, location and turning points coordinates, regulatory monetary value and area. The exact value of the plot area is required for keeping land data and entering information into the State Land Cadastre; as well as to determine the real amount of land tax or rent. For forest and agricultural lands, the area also determines the amount of cultivation and the obtained products.

Based on the analysis of literature sources, the established goal was to check the possibility of using Earth remote sensing data to generate digital relief models of plots in order to estimate their area. An important task was to establish the quantitative difference between the surface area of the land plot and the area of its horizontal projection using the example of large forested parcels.

Five sites were selected for research, which are located in the Volyn, Lviv and Ivano-Frankivsk regions of Ukraine. Using Google Earth, Global Mapper, and Surfer software, digital relief models of the objects were generated and visualized. At the next stage, the main relief parameters of the sites, as well as the values of the areas of their surfaces, were determined. It was established that for the specified land plots, the physical surface area is larger than the area of its horizontal projection by 1.15-87.83 hectares or from 0.1 to 7.7 %.

Therefore, the surface area depends on the morphometric parameters of the relief, namely the steepness and its roughness. For large parcels of agricultural and forestry purposes, it is recommended to take into account the area of their surfaces; to enter it as a separate parameter in the land cadastre. To increase the accuracy of the surface area calculation, it is necessary to use a digital terrain model with a smaller grid step. To generate such DEMs, we can use aerial photography materials.

Keywords: Remote Sensing materials; digital elevation model; land plot surface area; relief steepness and roughness.

Table: 1. Fig.: 3. References: 8.

Андрій Колесников¹, Михайло Замула²

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри хімії та екології

Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)

E-mail: kolesnikov_himek@ogasa.org.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8737-0933>, ResearcherID: [IRZ-3809-2023](https://orcid.org/IRZ-3809-2023)

²здобувач ступеня доктора філософії, аспірант кафедри міського будівництва та господарства

Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)

E-mail: zamulamichailodaba@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0029-3758>, ResearcherID: [IRZ-3909-2023](https://orcid.org/IRZ-3909-2023)

НЕРУЙНІВНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСІВ ТУЖАВЛЕННЯ І ТВЕРДІННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ КРУПНИМ НАПОВНЮВАЧЕМ

У статті розглянуто проблему неруйнівного контролю процесів тужавлення та твердіння композиційних матеріалів з крупним заповнювачем, де використання пенетраційних методів неможливе й робити висновки про стадії процесів тужавлення можливо лише за непрямыми ознаками. Наведено порівняльну характеристику неруйнівних методів, заснованих на вимірі електричних властивостей, на дослідженні екзотермічних процесів і, відповідно, швидкості поширення ультразвукових імпульсів у в'язучому тісті. Показано, що за основний метод, зручно прийняти ультразвуковий, що дозволяє ефективно відобразити як початок, так і кінець тужавлення.

Ключові слова: неруйнівний контроль, терміни тужавлення, швидкість ультразвуку.

Рис.: 9. Табл. 1. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. Розглянута задача є актуальною, оскільки стандартизована пенетраційна методика дослідження багатьох матеріалів із великими частинками наповнювача (і заповнювача) як на основі модифікованих гіпсових в'язучих, так і на основі цементу, не спрацьовує і повинна бути або принципово модифікована або замінена непрямыми методами, застосовними як основа для експрес-методів контролю твердіння зразків і конструкцій у будівельній практиці.

Новизна опублікованого матеріалу полягає в розроблених методиках вимірювання, пристосованих до завдань будівельного матеріалознавства, в елементах порівняльної структурно-орієнтованої інтерпретації отриманих результатів, у переході від результатів фізичних вимірювань до шкали термінів тужавлення.

Об'єктом дослідження є енергоефективний композиційний матеріал підвищеної водостійкості на гіпсовій основі з комбінованим крупнозернистим наповнювачем. Предметом дослідження є можливість визначення термінів тужавлення щодо зміни фізичних властивостей матеріалу.

Постановка проблеми. Одним із напрямів будівельного матеріалознавства є розвиток науки про композиційні матеріали в теоретичному та прикладному напрямку. Перспективним напрямком є використання багатокомпонентних сумішей, як матричного матеріалу, так і в ролі наповнювачів. Зокрема, як композиційні матеріали для основ під підлоги зручно використовувати композиційний матеріал на основі гіпсового матричного матеріалу з посиленою водостійкістю та суміші наповнювачів, кожен з яких забезпечує посилення одного з важливих для цільового використання композиту властивості – теплоізоляційного або звукоізоляційного [1] (рис. 1). При використанні відповідного композиційного матеріалу важливим завданням є підбір такого складу, який би забезпечував можливість практичної роботи з ним – укладання та формування.



Рис. 1. Приклад структури багатокомпонентного матеріалу з крупним наповнювачем

Контролювати відповідні властивості в разі композиту середньої та високої наповненості досить важко, оскільки пенетраційні методи не спрацьовують – індентори пенетраційних приладів стандартизованих методів (голка Віка, пластометр) блокуються частинками наповнювача. Таким чином, для вимірювання термінів тужавлення (ПТ - початку тужавлення, КТ - кінця тужавлення) необхідно або суттєво змінити масштаби вимірювальної установки (щоб локальні структурно-механічні властивості композиту «усереднювалися» у разі індентора значних розмірів), або переходити до непрямих вимірів. Слід зазначити також, що непрямі вимірювання можуть надати додаткову інформацію про стан композиту, що твердне. У роботі розглядаються другий шлях дослідження, із широкого арсеналу непрямих методів обрані такі, які порушують структуру композиту, що твердне, найменшим чином.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У процесі структуроутворення в мінеральних в'язучих та композитах на їх основі відбуваються фізико-хімічні зміни, що характеризуються різними просторовими масштабами. Змінюються багато фізичних властивостей в'язучого тіста, прямо чи опосередковано пов'язані зі структурою – міцність, в'язкість, пластична міцність, температура, швидкість поширення звукових та ультразвукових коливань, електричні характеристики [2]. Усі наведені характеристики можуть бути використані як індикаторні для визначення термінів тужавлення, при цьому ряд властивостей відображають зміни станів в'язучого тіста більш яскраво й контрастно.

Для визначення термінів тужавлення використовують непрямі методи віскозиметрії, вимірювання електричних характеристик та швидкості проходження ультразвукових коливань [3]. Реалізація цих методів в інженерній практиці потребує вирішення проблеми надійної ідентифікації термінів тужавлення за експериментальними результатами. Один із найбільш перспективних методів контролю термінів тужавлення композитів з частинками заповнювача [4] заснований на вимірі швидкості ультразвуку.

Інтерес представляє порівняння кількох методів оцінки стану композиційного в'язучого тіста, що твердне, з метою визначення термінів тужавлення та особливостей режимів формування та обробки матеріалів досліджуваної групи.

Виділення не досліджених раніше частин загальної проблеми. Попередній аналіз інформаційних джерел дозволив виявити деякі проблеми щодо визначення термінів тужавлення в наповнених композиційних матеріалах:

1. Терміни тужавлення, що є умовними величинами, недостатньо чітко пов'язуються зі структурними змінами в матеріалі під час тужавлення.
2. Невизначені процедури вимірювання термінів тужавлення для високо наповнених композитів.
3. Недостатньо розроблені непрямі методи визначення строків тужавлення та твердіння матеріалу у формі зразків та виробів.
4. Недостатньо розроблений порівняльний аналіз змін структурних властивостей композитів під час тужавлення та його фізичних характеристик.

Мета статті. Метою роботи є порівняння непрямих неруйнівних методів контролю процесів структуроутворення композитів як із практичних позицій діагностики стану в'язучого тіста та визначення термінів тужавлення, так і з теоретичного погляду для змістовної інтерпретації процесів структуроутворення композиційного в'язучого тіста. Відповідними завданнями є:

1. Короткий розгляд апаратного оформлення, методик вимірювання, характерних особливостей одержуваних результатів у формі кривих структуроутворення для композитів на основі гіпсу.
2. Структурно орієнтована інтерпретація даних, одержуваних для модельних сумішей та композиційних матеріалів.

3. Порівняння наведених методів неруйнівного контролю, їх інформативності та переважної сфери застосування.

4. Вибір одного з методів як основного, опорного для практичного дослідження процесів структуроутворення та визначення термінів тужавлення матеріалів цільової категорії, що розглядається, та їм подібних.

Виклад основного матеріалу. Нижче розглянуто деякі спрощені за експериментальним оформленням методи дослідження композиційного в'язучого тіста – термічний, два електричних – дослідження зміни електропровідності та діелектричних втрат, та ультразвуковий, заснований на вимірі швидкості проходження ультразвукових імпульсів через в'язуче тісто, що твердіє.

Тепловиділення вимірювалося на основі стандартизованої методики [5] за допомогою калориметра для в'язучих речовин на основі хормель-копелевих термопар (рис. 2), що являють собою різновид діатермічного калориметра [6].

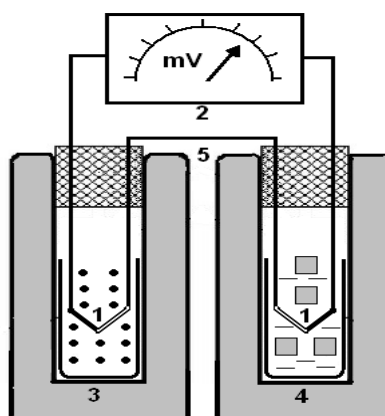


Рис. 2. Калориметр для дослідження екзотермічних ефектів твердіння в'язучих та композитів:

- 1 – диференціальна термопара; 2 – потенціометр; 3 – ємність з в'язучим тістом;
4 – ємність порівняння з водокрижаною сумішшю ($t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$);
5 – ємності з теплоізоляційного матеріалу (пінополістиролу) з пробками

Основним елементом установки для дослідження діелектричних втрат у в'язучому матеріалі був електронний діелькометр-вологомір ВЕБ-3, вихідне призначення якого – вимірювання вологості деревини різних сортів відповідно до калібрувальних графіків. Вологомір є малопотужним генератором високої частоти. Сила струму, що протікає через мікроамперметр, та його показання, знаходяться у відомій функціональній залежності від вологості випробуваного матеріалу.

Електропровідність композитної суміші вимірювалася на змінному струмі, щоб уникнути поляризації електродів, методом амперметра та вольтметра за допомогою установки, схема якої показана на рисунку 3.

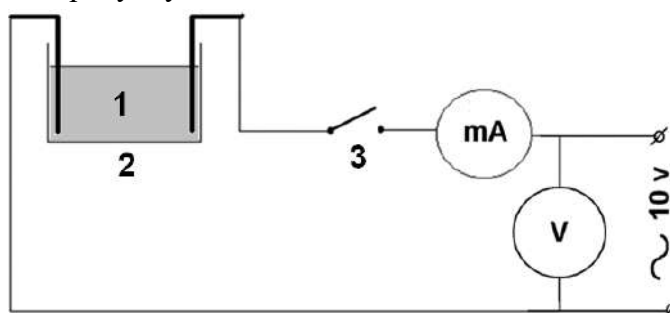


Рис. 3. Схема вимірювання електропровідності матеріалу:

- 1 – суміш, що досліджується, 2 – комірка для вимірювання, 3 – електричний ключ

На вхід за допомогою стандартного блоку живлення подавалася стабілізована змінна напруга частотою 50 Гц. Для вимірювання були сконструйовані та використані кілька варіантів комірок: циліндрична з двома мідними пуансонами, прямокутна, плоска та коміррка з рухомих електродом. Деякі конструкції комірок показані на рисунку 4. При дослідженні матеріал електрода вважався інертним.

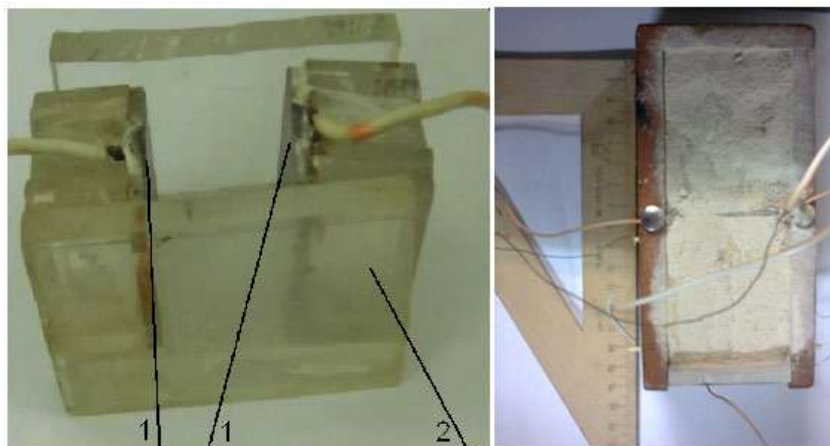


Рис. 4. Конструкції вимірювальних комірок:
1 – електроди; 2 – корпус

На підставі вимірювань обчислювалася питома електропровідність (сименс на метр) композиту за формулою (1):

$$\sigma = G \frac{L}{S} = \frac{I}{U} \frac{L}{S}, \tag{1}$$

де L – довжина провідного об’єму, S – площа його перерізу, I, U – показання амперметра і вольтметра відповідно [7].

Вимірювальна установка для ультразвукового дослідження складається з п’єзоелектричних перетворювачів (передавача та приймача), контейнера для зразків, наповненого композиційним в’язучим тістом на основі гіпсу, приладів для ультразвукового контролю конструкцій УК-10ПМС або УК-14П. У ході випробування згенерований ультразвуковий імпульс пропускається через матеріал (рис. 5).



Рис. 5. Ультразвукова установка (а)
та ультразвукові прилади КК-10ПМС та УК-14П (відповідно b, c)

Вимірюється час проходження ультразвукового імпульсу через композиційний матеріал з макроскопічними неоднорідностями 5-10 мм зернами і гранулами заповнювача, що забезпечують високі тепло- і звукоізоляційні властивості. Результати вимірювань відображаються у вигляді кривих зміни часу проходження ультразвукових імпульсів та розрахункової швидкості ультразвуку в процесі структуроутворення в’язучого або композиту на його основі.

Результати дослідження та їх інтерпретація. Для якісного зіставлення результатів вимірювання фізичних властивостей був обраний типовий за фізичними характеристиками варіант композиційного складу, виконано нормуюче перетворення кожної з величин – діелектричних втрат, екзотермічного ефекту, електропровідності та швидкості ультразвукових імпульсів, згідно із загальним співвідношенням (2):

$$X' = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}. \quad (2)$$

Отримані величини з метою зіставлення розміщувалися на одному графіку (рис. 6). Послідовна інтерпретація отриманих залежностей суттєво полегшує перехід до цільових величин – термінів тужавлення композиційного в'язучого.

Типові нормовані характеристики композиційного в'язучого, що твердне

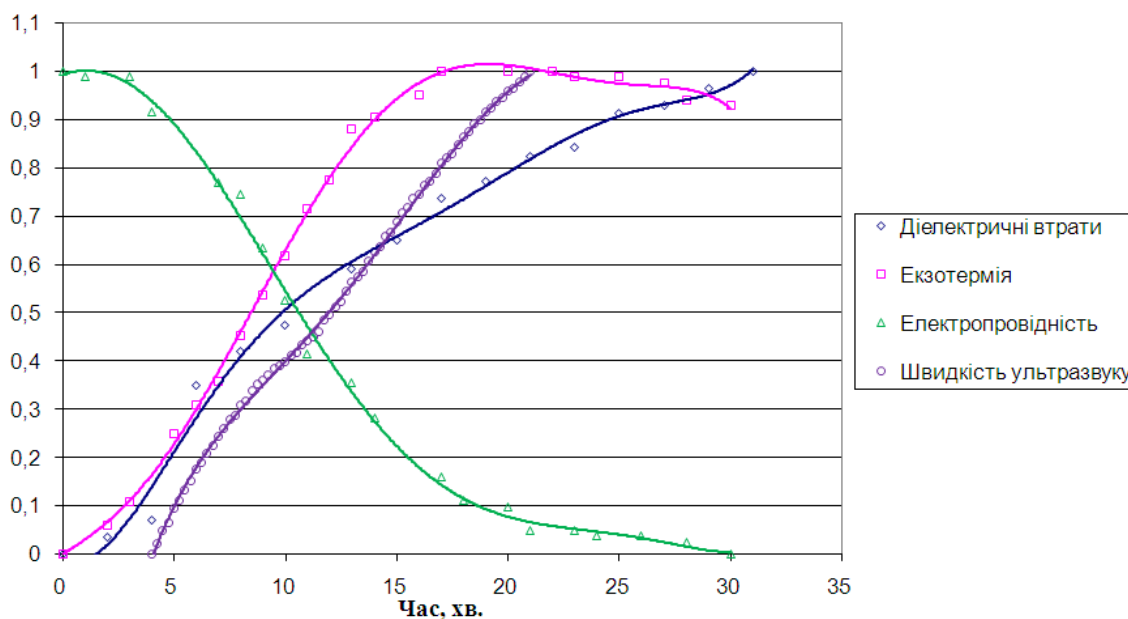


Рис. 6. Порівняльний графік фізичних властивостей композиційного в'язучого тіста, що твердіє

Зміна діелектричних втрат. Оскільки йдеться про вимірювання на високих частотах (~ 100 КГц), внесок у значення діелектричних втрат, пов'язаної з втратою потужності у в'язучому тісті, меншою мірою обумовлений явищами провідності за рахунок вільного руху іонів, більшою мірою – за рахунок конформаційних змін структури адсорбційних шарів частинок, що знаходяться у в'язучому тісті, а також руйнування та утворення водневих зв'язків. Можна запропонувати досить грубу модель – діелектричні втрати та перебіг їх змін обумовлений головним чином станом молекул води. Тоді процес зміни діелектричних втрат із часом можна розглянути, як двостадійний процес. На першому етапі вільна вода переходить у зв'язану адсорбовану на межах розділу частково гідратованого мінерального компонента (рис. 6, 0-10 хв). Водночас відбувається гідратація в'язучого з переважанням топохімічної реакції. У точці зламу (рис. 6, 10 хв) переважна більшість води залишається в адсорбованій формі, далі відбувається процес гідратації всередині зерен в'язучого. Усі ці процеси відбуваються всередині капілярно-пористої структури матеріалу, що сформувалася. У точці зламу (10 хв) відбувається часткове завершення гідратації гіпсу, у реакцію вступають мінерали цементного каменю та пуцоланічна добавка.

Таким чином, завдяки зростанню ефективної в'язкості та формуванню водневих зв'язків з атомами кисню молекули води зв'язуються з мінеральними компонентами міцніше, конформаційні зміни і трансформація скелета водневих зв'язків відбуваються більш

важко, вони «не встигають» за змінами електричного поля, в результаті чого зростає величина діелектричних втрат. Схематична інтерпретація описаних вище процесів структуроутворення показано на рис. 7.

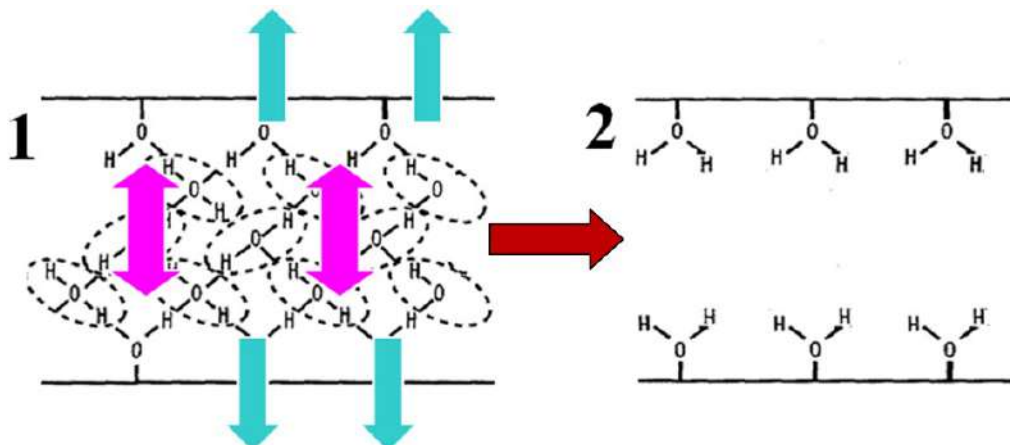


Рис. 7. Схематична інтерпретація зміни діелектричних втрат при твердінні:
1 – стадія 1; 2 – стадія 2

Зміна електропровідності. Електропровідність на змінному струмі низької частоти обумовлена переміщенням іонів та зміною у часі їх концентрації. Зниження концентрації іонів OH^- обумовлено пуцоланічною активністю добавок, що застосовуються для стабілізації гіпсо-цементних сумішей (зола, шлак). Основним внеском у зміну електропровідності є перенасичення розчину, що формується на перших хвилинах, і зменшення ефективного вільного об'єму розчину, що проводить, в результаті зростання новоутворень. На інтервалі 15-20 хв унаслідок участі вільної води у процесах гідратації (рис. 7) відбувається можлива зміна механізму передачі заряду. Якщо на ранніх термінах гідратовані іони переміщалися в об'ємі вільної води, що заповнює капілярно-пористу структуру матеріалу, після зазначеного терміну ймовірний механізм передачі заряду – естафетний, що відбувається за участю шарів зв'язаної води на внутрішній поверхні пористої структури. Зміна механізму перенесення іонів обумовлена, ймовірно, фактичним злам на графіку електропровідності (рис. 6) при 15-20 хв.

Термічні ефекти Дослідження, що протікають у процесі структуроутворення аналізованих композитів, дозволяє виявити кілька процесів, що частково перетинаються в часі, кожному з яких відповідають характерні ділянки графіків тепловиділення (рис. 6). Початкові стадії твердіння (0-4 хв) та відповідні ділянки графіка відповідають стадії початку тужавлення – стадії адсорбції води на поверхні частинок, початку топохімічної реакції гідратації гіпсу. Ділянка кривої (4-14 хв) відповідає протіканню гідратації гіпсової компоненти, що супроводжується тепловиділенням. На цих етапах починає гідратуватися цемент і входить у реакцію зола. Наступні етапи (15-30 хв) характеризуються слабким тепловиділенням. Тут гідратації піддається переважно мінерали цементу і проявляється пуцоланічна активність вапна. Одночасно відбувається формування кластера частинок композиту, пов'язаних кристалізаційними контактами.

Швидкість ультразвуку. Швидкість ультразвуку стрибкоподібно зростає при формуванні провідної перколяційної структури (переважно кістяка перколяційного кластера). До цього стрибка швидкість ультразвуку мала (1-3 хв), Прилад не спрацьовує. Цей факт дозволяє приблизно ототожнити різке зростання швидкості при початку тужавлення з моментом першого спрацьовування ультразвукової установки (4-5 хв, рис. 6). Кінець тужавлення немає різких, стрибкоподібних проявів. Для його виявлення використовуються порівняльні методи або дослідження більш тонких властивостей графіка швидкості ультразвуку – його кривизну $k(x)$ або радіус кривизни [8] (рис. 8). Структурні переходи при цьому відповідають перетину графіком кривизни осі абсцис та обертання кривизни в нуль.

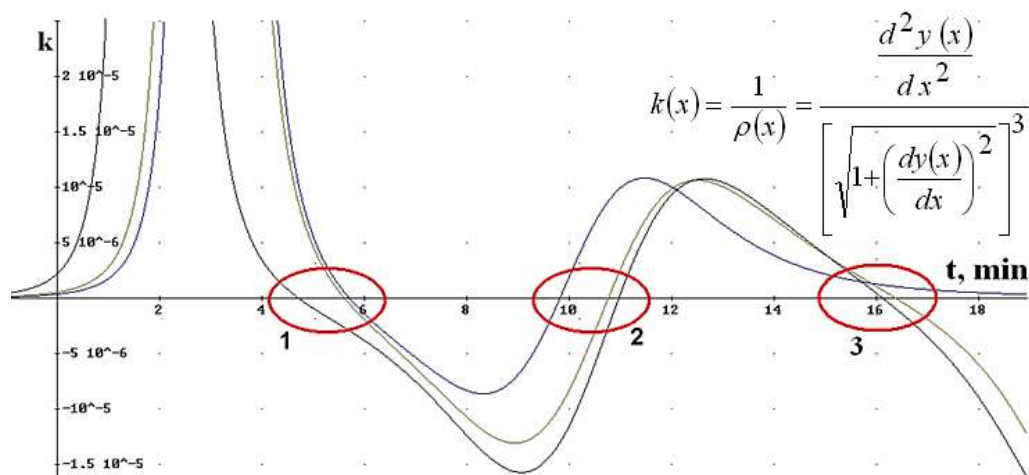


Рис. 8. Кривизна графіків швидкості ультразвукових імпульсів як функція часу процесу твердіння:
1, 2, 3 – області структурних переходів у матеріалі

Зі структурних уявлень і деяких понять теорії перколяції [9; 10] особливості зміни швидкості ультразвуку інтерпретуються в такий спосіб. Ієрархічна структура композиційного матеріалу, при спрощеному розгляді, може бути піддана системному «перетину» на мезоскопічному масштабному рівні, в результаті чого формується мережева модель, вузлами якої є кластери ~ 30 частинок (0,2 мм), через які ультразвуковий імпульс здатний поширюватися як через єдине ціле. Власне моделлю композиту, що твердіє, є динамічна мережева структура з вузлів розглянутої природи і зв'язків, що реалізуються кристалізаційними (фазовими) контактами. Переходи, що спостерігаються в ультразвукових експериментах можуть бути інтерпретовані в термінах топологічної структури мережі, що росте. Для першого переходу (початку тужавлення) досить легко вказати структурну інтерпретацію – у відповідний момент часу з відокремлених один від одного кластерів, які часто мають фракталоподібний характер, формується єдина провідна структура – перколяційний (поєднуваний) кластер, що забезпечує проходження ультразвукового сигналу між протилежними сторонами зразка. У момент утворення такого кластера спостерігається перше спрацьовування вимірювального приладу (рис. 6, 4 хв). Поряд зі структурою «червоного» кістяка, що забезпечує провідність, формуються також «мертві кінці» та інші однозв'язані компоненти, що не беруть участь у формуванні властивостей, пов'язаних з провідністю. Наприкінці тужавлення спостерігається формування провідного кістяка, що обріс одно- і двозв'язаними елементами, що займають весь об'єм зразка. Така розгалужено-сітчаста структура, що займає весь об'єм, формується на момент кінця тужавлення (рис. 6, 10 хв). На цьому етапі структурні зміни не закінчуються, продовжуються гідратаційні процеси та структуроутворення. Розгалужено-сітчаста структура, що включає велику кількість однозв'язаних компонентів, зокрема, «мертвих кінців», перетворюється на сітчасту – однозв'язані компоненти трансформуються в 2- та 3-зв'язані; тривимірна мережа, що відображає структуру каменеподібного тіла, формується майже повністю. Трансформації основної кількості однозв'язаних структур у 2- і 3-зв'язані та їх входження до складу провідного кістяка відповідає третій перехід (рис. 6, 15 хв). Таким чином, третій перехід відповідає затвердінню та остаточному формуванню каменеподібного тіла з переважаючими пружними характеристиками.

Порівняльний аналіз неруйнівних методів. Перший етап аналізу застосовності розглянутих методів – зведення основних якісних змін на єдину часову шкалу (рис. 9) та таблицю.

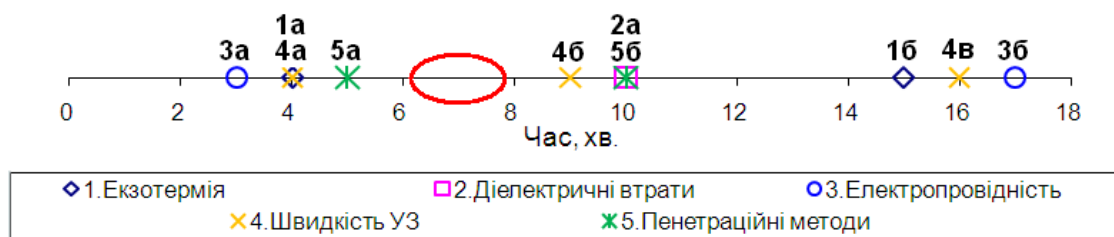


Рис. 9. Якісні зміни характеристик досліджуваного композиту в єдиній часовій шкалі: 1а – 5б – позначення якісних змін, перша цифра відповідає номеру властивості

Червоним еліпсом на рис. 9 позначено інтервал «технологічного» кінця тужавлення. Пояснення наведені в таблиці.

Таблиця – Якісні зміни характеристик досліджуваного композиту

№	Позначення	Час від замішування, хв	Змістовна інтерпретація	Ступінь вираженості
1	3а	3	Перехід до лінійного режиму падіння електропровідності через перехід до стабілізації рівня пересичення розчину	Середня
2	1а	4	Перехід до лінійного термічного режиму та постійної швидкості реакції гідратації. ПТ за термічним критерієм	Середня
3	4а	4	Утворення кластера частинок вихідного композиту, що охоплює, і новоутворень, проникних для ультразвуку. Перше спрацювання УЗ установки. ПТ за швидкістю ультразвуку	Яскрава
4	5а	5	ПТ матричного матеріалу (стандартний тест Віка)	Яскрава
5	4б	9	Обростання кластера новоутворень, що охоплює, «мертвими кінцями». Перехід значення кривизни графіка швидкості ультразвуку через 0. КТ за швидкістю ультразвуку	Середня
6	2а	10	Зниження кількості "вільної" води, зменшення рухливості скелета водневих зв'язків. Виникнення перегину графіку діелектричних втрат. КТ за критерієм діелектричних втрат	Яскрава
7	5б	10	КТ матричного матеріалу, що визначається стандартними методами	Яскрава
8	1б	15	Закінчення основних екзотермічних процесів, пов'язаних із гідратацією	Яскрава
9	4в	16	Формування двозв'язаних фрагментів кластера, що охоплює, з однов'язаних «мертвих кінців», закінчення затвердіння. Перехід кривизни графіка ультразвуку через 0	Не яскрава
10	3б	17	Зміна механізму провідності. Перехід до передачі іонів за шарами зв'язаної води	Яскрава

Дослідження даних таблиці проводилося за кількома критеріями. Оскільки цільовими є структурно-механічні характеристики, що забезпечують можливість укладання та обробки матеріалу, увага приділялася насамперед методам, що дозволяють отримати чіткі, яскраві якісні зміни спостережуваних характеристик, близькі до термінів тужавлення, що визначаються для матричного матеріалу, без частинок наповнювачів, за допомогою стандартизованих методів (випробування за допомогою приладу Віка). Слід зазначити суб'єктивність поняття термінів тужавлення (це, взагалі кажучи, умовні величини) для композитів досліджуваного класу. Ці терміни відрізняються при вимірі різними методами за різними критеріями. Надійним є одночасне застосування кількох методів.

Вибір методів неруйнівної діагностики композиційного матеріалу. Розглянуті дані дозволяють вибрати як основний ультразвуковий метод, що дає чіткий критерій початку тужавлення. Однак кінець твердіння проявляється не так чітко і вимагає додаткової обробки отриманої залежності – вивчення кривизни кривої графіка швидкості ультразвуку. Тому може бути рекомендована пара "швидкість ультразвуку - діелектричні втрати". Якщо

прийняти допустимим аналіз складних властивостей експериментальних кривих, то для визначення термінів тужавлення перспективні також графіки електропровідності та екзотермії. Використання цих даних спільно з диференціально-геометричними методами (аналіз кривизни та радіуса кривизни кривих) становлять інтерес для майбутніх досліджень.

Список використаних джерел

1. Моделирование эксплуатационных характеристик теплозвукоизолирующего композита / А. В. Колесников, В. Я. Керш, Т. В. Ляшенко, М. А. Замула // Моделивання та оптимізація будівельних композитів : матеріали міжнар. семінару. – Одеса, 2020. – С.78-80.
2. Гранковский И. Г. Структурообразование в минеральных вяжущих системах / И. Г. Гранковский. – Киев : Наукова думка, 1984. – 300 с.
3. Ultrasonic Control of the Formation of Gypsum Binders / V. Kersh, A. Kolesnikov, N. Xlytsov, A. Foshch // Actual Problems of Engineering Mechanics (APEM 2019) : 6th International Conference – 2019. – Vol. 968. – Pp. 122-127.
4. Ієрархія структурних змін пи твердінні композитів за результатами виміру швидкості ультразвуку / В. Я. Керш, А. В. Колесников, М. А. Замула., О. О. Маковецька // Актуальні проблеми інженерної механіки : IX Міжнар. конф. – Одеса, 2022. – С. 57-62.
5. Wang K. Developing a Simple and Rapid Test for Monitoring the Heat Evolution of Concrete Mixtures for Both Laboratory and Field. Federal Highway Administration / K. Wang. – Iowa : Iowa State University, 2008. – 46 p.
6. Хеммингер В. Калориметрия. Теория и практика / В. Хеммингер. – Москва : Химия, 1990. – 176 с.
7. Ратинов В. Б. До питання про теорію твердіння мінеральних в'язучих речовин / В. Б. Ратинов, Л. Я. Забезжинський, Т. І. Розенберг // Збірник праць НДІЗБ. – 2007. – Вип. 1. – С. 3-4.
8. Соломатов В. И. Полимерные композиционные материалы в строительстве / В. И. Соломатов, А. И. Бобрышев, К. Г. Химмлер. – Москва : Стройиздат, 1988. – 308 с.
9. Тарасевич Ю. Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы : учеб. пособие / Ю. Ю. Тарасевич. – Москва : Едиториал УРСС, 2002. – 112 с.

References

1. Kolesnykov A.V., Kersh V.Ya., Lyashenko T.V., & Zamula M.A. (2020). Modelyrovanye ekspluatatsyonnykh kharakterystyk teplozvukoyzolyruyuschego kompozyta [Modeling of operational characteristics of a heat- and sound-insulating composite]. *Modeliuvannia ta optymizatsiia budivelnykh kompozytiv: materialy mizhnarodnogo seminaru – Modeling and optimization of building composites: materials of the International. seminar* (pp.78-80).
2. Grankovskyi, Y.G. (1984). *Strukturoobrazovanie v myneralnykh viazhuschykh systemakh* [Structure formation in mineral binders]. Naukova dumka.
3. Kersh, V., Kolesnikov, A., Xlytsov, N., & Foshch, A. (2019). Ultrasonic Control of the Formation of Gypsum Binders / V. Kersh // Actual Problems of Engineering Mechanics 6th International Conference. “Actual Problems of Engineering Mechanics” (APEM 2019), 968, 122-127.
4. Kersh, V.Ya., Kolesnykov, A.V., Zamula, M.A., & Makovetska, O.O. (2022). Ієрархія структурних змін пи твердінні композитів за результатями виміру швидкості ультразвуку [Hierarchy of structural changes during hardening of composites according to the results of ultrasound speed measurements]. *IX Mizhnarodna konferentsiia «Aktualni problemy inzhenernoi mekhaniky» – Actual problems of engineering mechanics: IX International. conf.* (pp. 57-62).
5. Wang, K. (2008). *Developing a Simple and Rapid Test for Monitoring the Heat Evolution of Concrete Mixtures for Both Laboratory and Field. Federal Highway Administration*. Iowa: Iowa State University.
6. Khemmynger, V. (1990). *Kalorymetriia. Teoriia i praktika* [Calorimetry. Theory and practice]. Khimiia.
7. Ratynov, V.B., Zabezhinskii, L.Ya., & Rozenberg, T.I. (2007). Do pytannya pro teoriyu tverdinnya mineral'nykh v'yazhuchykh rehovyn [To the question of the theory of hardening of mineral binders]. *Zb. prats NDIZB – Proceedings of the Scientific Research Institute, 1*, 3-4.
8. Solomatov, V.I., Bobryshev, A.I., & Khimmler, K.G. (1988). *Polimernye kompozitsionnye materialy v stroitelstve* [Polymer composite materials in construction]. Stroizdat.
9. Tarasevych, Yu.Yu. (2002). *Perkoliatsiia: teoriia, prilozheniia, algoritmy* [Percolation: theory, applications, algorithm]. Editorial, URSS.

Andrey Kolesnikov¹, Mykhailo Zamula²

¹PhD, Associate Professor of the Department of Chemistry and Ecology,
Odessa State Academy of Construction and Architecture (Odessa, Ukraine)

E-mail: kolesnikov_himek@ogasa.org.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8737-0933>. ResearcherID: [IRZ-3809-2023](https://orcid.org/IRZ-3809-2023)

²Graduate Student of the Department of Urban Construction and Economy,
Odessa State Academy of Construction and Architecture (Odessa, Ukraine)

E-mail: zamulamichailodaba@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0029-3758>. ResearcherID: [IRZ-3909-2023](https://orcid.org/IRZ-3909-2023)

NON-DESTRUCTIVE METHODS FOR CONTROLLING THE SETTING PROCESS OF BUILDING COMPOSITE MATERIALS WITH COARSE AGGREGATES

The article deals with the problem of non-destructive control of the processes of setting and hardening of composite materials, for which coarse filler granules or mixtures of fillers of different granulometric composition are used. Since the use of standardized penetration methods in the cases under consideration becomes impossible, it is possible to draw conclusions about the stages of the processes of structure formation of a composite binder dough only by indirect signs. In such a study, methods are preferable that least disturb the structure of the hardening composite, up to non-contact ones. The article provides a comparative description of several such methods. Two of them are based on the measurement of electrical responses associated with structure formation, the other two are based on the study of exothermic processes and, accordingly, the propagation velocity of ultrasonic pulses in a hardening binder dough. For a typical sample of the studied material, the time dependences of the corresponding physical characteristics are constructed. Qualitative changes in the course of these curves are compared with the boundaries of the stages of the structure formation process. The main qualitative changes in the time dependences of physical properties are interpreted from the standpoint of structural transformations occurring in the material. The measurement results are considered both from a theoretical standpoint, related to the interpretation of changes in the structure and properties of the hardening binder dough, and from an applied standpoint, focused on determining the setting time of the material, which is important for the technology of its application. Changes in physical characteristics are reduced to a single scale, which improves the accuracy of determining the setting time. It is shown that the main method, adequate to the problem under consideration, is conveniently taken to be ultrasonic, which makes it possible to effectively display both the beginning and the end of setting. The remaining methods seem to be complementary, allowing a more thorough study of the processes during the completion of the setting. The considered research methods are also applicable to conventional materials, and some of them, with minimal modification, to hardening samples and products in the practice of building production.

Key words: non-destructive testing, hardening time, ultrasound speed.

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

Олексій Терещук¹, Віктор Мовенко², Юлія Щербак³

¹кандидат технічних наук, доцент, директор навчально-наукового інституту архітектури, дизайну та геодезії, професор кафедри геодезії, картографії та землеустрою

Національний університет Чернігівська політехніка (Чернігів, Україна)

E-mail: olexter1957@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6433-9351>. ResearcherID: [H-4540-2016](https://orcid.org/0000-0001-6433-9351)

²старший викладач кафедри геодезії, картографії та землеустрою

Національний університет Чернігівська політехніка (Чернігів, Україна)

E-mail: viktor.movenko@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3395-3476>

ResearcherID: <http://www.researcherid.com/rid/H-2364-2016>

³викладач кафедри геодезії, картографії та землеустрою

Національний університет Чернігівська політехніка (Чернігів, Україна)

E-mail: shch.yu15@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3439-3792>. ResearcherID: [H-4199-2016](https://orcid.org/0000-0002-3439-3792)

ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ КРЕМЕНЧУЦЬКОГО ВОДОСХОВИЩА ТА ШЛЯХИ ЇХ ПОДОЛАННЯ

У цій роботі, на основі даних спостережень за екологічним станом Кременчуцького водосховища, руйнуванням його берегів, зменшенням глибин на значних територіях, розглядаються пропозиції щодо поліпшення екологічного стану водосховища, створення штучних територій, поступового зниження його глибин з метою зменшення ділянок з критично малими глибинами та повернення затоплених ділянок до земель житлової та громадської забудови, рекреації, лісового фонду, транспорту, енергетики, промисловості, сільського господарського та природоохоронного призначення.

Ключові слова: Кременчуцьке водосховище; екологічний стан; навколишнє середовище; річка Дніпро; Дніпровський басейн.

Рис.: 13. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Останніми роками все більшу стурбованість викликає у населення земної кулі сучасний екологічний стан навколишнього середовища. Зростають виклики, пов'язані із зміною клімату, таненням льодовиків, всесвітнім потеплінням, що потребує вжиття нагальних заходів та швидкого реагування всіх держав території Землі. Зважаючи на вищевикладене, доцільним є всебічне дослідження та контроль показників водних ресурсів (водосховищ, озер, річок): ступеню забруднення через руйнування берегів водосховищ та річок; зменшення глибин водних об'єктів, що викликає погіршення якісних характеристик води, яка використовується для різних потреб (у т. ч. водопостачання та водовідведення) населення; загального екологічного стану.

Постановка проблеми. Комплексний моніторинг екологічного стану річок Дніпровського басейну підтверджує необхідність проведення термінових заходів спрямованих на поліпшення екологічного стану навколишнього середовища (в тому числі і сучасних водосховищ), що сприятиме поліпшенню стану водосховищ, а також дозволить використовувати звільнені землі для інших цілей [1-3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. При підготовці статті були розглянуті останні публікації та звіти у відкритому доступі, присвячені проблемам моніторингу екологічного стану водних об'єктів [4-7].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проблеми поліпшення екологічного стану річок та водосховищ України потребують значних фінансових та матеріальних вкладень, а також нових підходів та пропозицій для вирішення цих питань. Саме тому запропоновані авторами шляхи вирішення даних проблем є достатньо актуальними та своєчасними. [8-10].

Постановка завдання. Мета даної роботи – проаналізувати екологічний стан Кременчуцького водосховища та запропонувати шляхи його покращення.

Виклад основного матеріалу. Згідно відомостей Регіонального офісу водних ресурсів, річкова мережа Полтавщини утворена: однією великою річкою – Дніпро, яка в межах області має протяжність близько 145 км, восьма середніми річками загальною довжиною 1360 км (Сула – 213 км, Оржиця – 89 км, Удай – 129 км, Псел – 350 км, Хорол – 241 км, Ворскла – 226 км, Оріль – 80 км, Мерла – 28 км) та 1771 малою річкою, струмками і водотоками (11501 км). Загальна довжина малих річок (понад 10 км) становить 3596 км, в області їх нараховується 137.

У південно-західній частині Полтавської області проходить своєю течією р. Дніпро, більша частина вод якої зарегульована Кременчуцьким та Кам'янським водосховищами, а повний об'єм зарегульованої в них води складає 13520 та 2450,94 млн м³ відповідно.

Основні водні джерела області – Кременчуцьке та Кам'янське водосховища, річки Сула, Ворскла, Псел, Оріль та їх притоки. Кременчуцьке водосховище утворене після побудови Кременчуцької ГЕС у 1959-1961 р. р. Його довжина складає 149 км, ширина 28 км, глибина: максимальна 28 м, середня 6 м. Площа території Кременчуцького водосховища складає 225 тис. га, площі мілководь (до двох м) 18 %. Нормальний підпірний рівень (у верхньому б'єфі ГЕС) – 81 м. Об'єми: повні – 13,5 км³, корисні – 8,9 км³. Довжини берегових ліній складають 800 км, дамби і берегоукріплення – 145,3 км [4; 5].

У результаті будівництва Кременчуцької ГЕС було затоплено долину р. Дніпро загальною площею близько 280 тис. га, завдовжки 148 км, шириною до 28 км. Під водою зникли давні острови Королевець, Богун, Корчуватий та 212 населених пунктів (рис. 1).

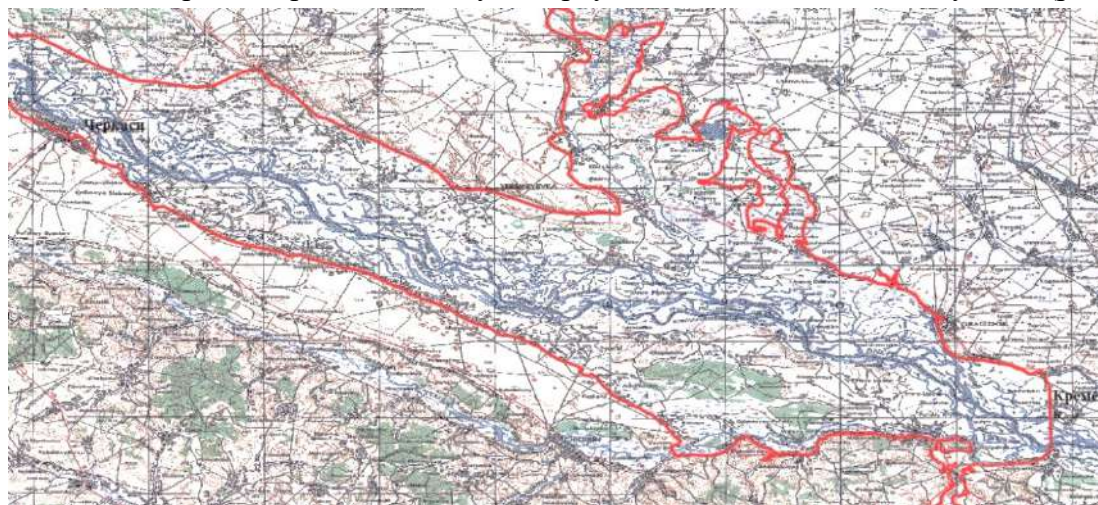


Рис. 1. Межі затопленої території Кременчуцького водосховища (зображено на карті 1941 року видання)

У сучасних умовах на погіршення екологічного стану Кременчуцького водосховища впливають наступні чинники:

❖ **Природні:**

- глобальне потепління Землі, підвищення середньорічної температури повітря, а отже, і температури води;
- гідрометеорологічні, зниження середньорічної кількості опадів;
- ерозія ґрунтів на водозабірній площі, руйнування берегів, утворення мілководь.

❖ **Антропогенні:**

- забруднення стічними водами:
 - ✓ скиди неочищених та недостатньо очищених промислових і комунально-побутових стічних вод та потрапляння через систему міської каналізації у водні джерела;
 - ✓ надходження із забудованих територій і сільгоспугідь забруднюючих речовин у процесі поверхневого стоку води;
- видобуток підземних вод для господарсько-питного водопостачання, сільського господарства та виробничо-технічних цілей.

З 2011 року в Україні стрімко зростає **температура** теплого періоду року та денної температури, ріст якої більш інтенсивний ніж ріст температур в зимовий та нічний періоди. Кожне наступне десятиріччя, починаючи із 1991 року, було теплішим попереднього: 1991–2000 рр. – на 0,5 °С, 2001–2010 рр. – на 1,2 °С, 2011–2019 рр. – на 1,7 °С (рис. 2).

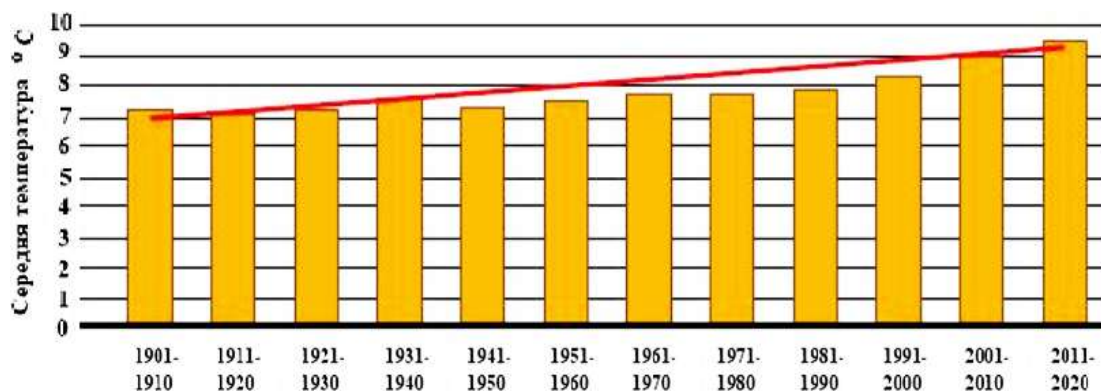


Рис. 2. Динаміка зміни середньорічної температури повітря в Україні

Серед багатьох чинників **діоксид вуглецю**, оксид карбону, вуглекислий газ, CO_2 — тривка **хімічна сполука**, яка негативно впливає на глобальне потепління Землі (рис. 3).

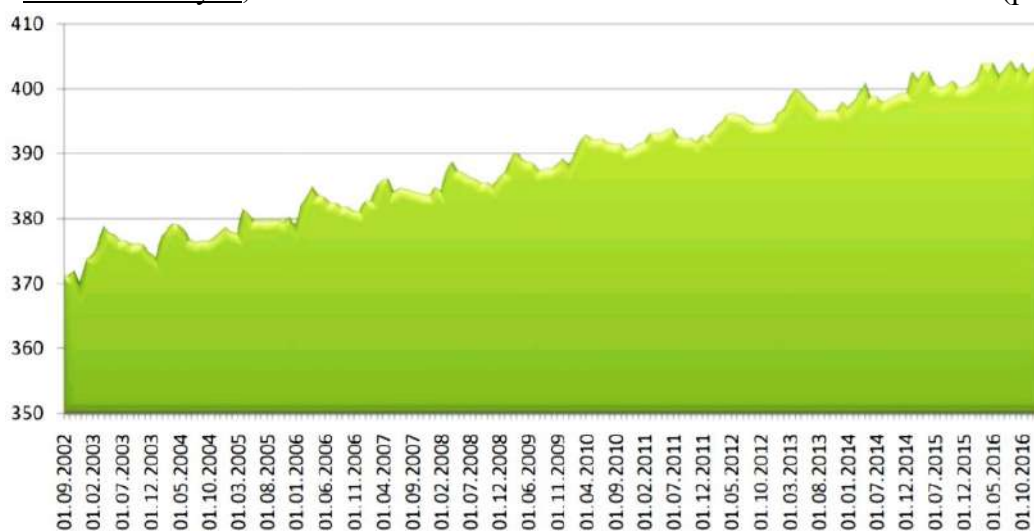


Рис. 3. Динаміка концентрації CO_2 на території України

Середньорічна температура приземного шару повітря в Україні за останні 20 років зросла приблизно на $2\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 4).

Тривалі посухи та дефіцит атмосферних опадів призвели до поступового повсюдного **зниження рівнів ґрунтових вод** на території України, зокрема на прилеглих до Кременчуцького водосховища територіях, рівні ґрунтових вод на яких знизились у середньому на $0,25\text{--}1,0\text{ м}$.

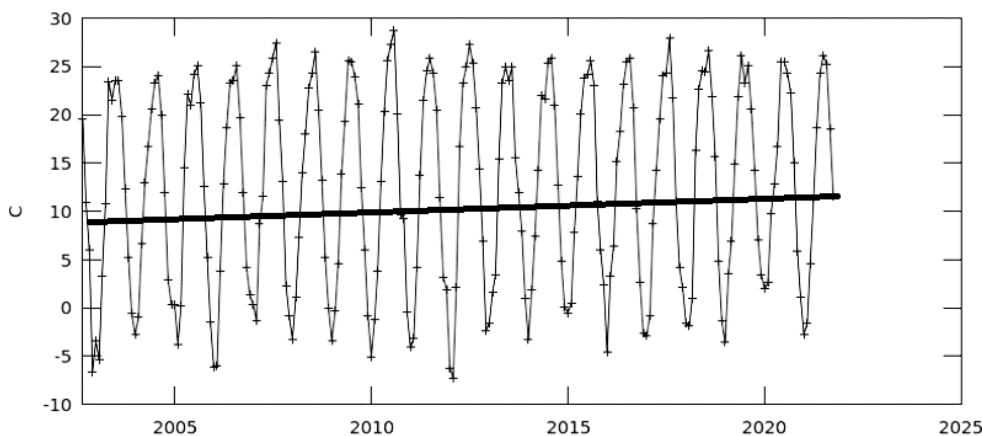


Рис. 4. Динаміка зміни середньорічної температури приземного шару повітря в Україні

Примітка. Аналіз вмісту CO_2 в середовищі та динаміку зміни температури здійснювали за допомогою супутникового моніторингу Землі на платформі Giovanni компанії NASA.

Вищенаведені чинники сприяли утворенню мілководь. **Мілководдя** – місце водойми, певна її частина з низьким рівнем води та невеликою глибиною (до 2 м). Від 5 до 32 % мілководдя займають зарості вищої водної і наземної рослинності. Ці зони характеризуються уповільненими течіями, зниженням турбулентного перемішування, більшим прогріванням (рис. 5).

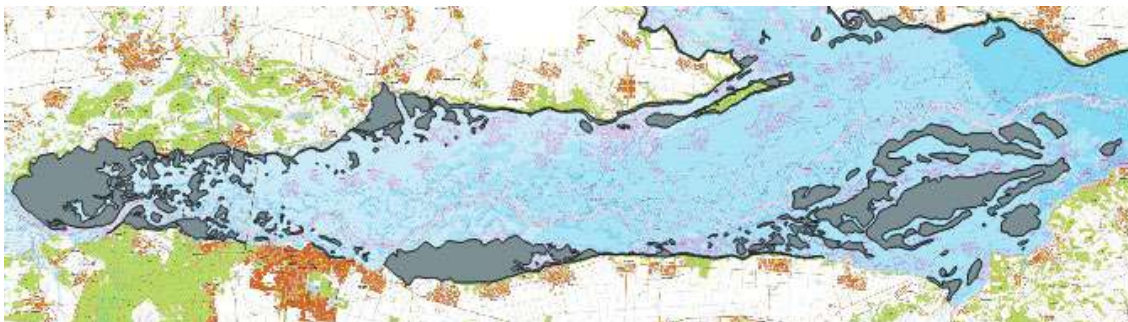


Рис. 5. Схематичне відображення мілководь Кременчуцького водосховища

На мілководдях широко розповсюджено явище цвітіння води. Цвіте близько 70 відсотків площі водойми, особливо в нижній частині та затоках (рис.6). У результаті надмірного цвітіння погіршуються умови життєдіяльності організмів у водоймах та якісні характеристики води. Розповсюдження цвітіння зумовлюється наступними факторами:

- уповільнення течії у руслі р. Дніпро (перші водосховища було побудовано на річці ще в 20-х роках ХХ століття), перетворення стрімкої ріки на каскад водосховищ призвело до екологічних наслідків;
- зростання температури у водних об'єктах, викликане глобальною зміною клімату;
- надлишок у стічних водах промислових, аграрних підприємств та населених пунктів сполук фосфору, нітрогену, заліза, кремнію та органічних речовин;
- використання в сільськогосподарському виробництві органічних та мінеральних добрив зумовлює забруднення фосфором.

Шар цвітіння води може сягати до 10-15 см завтовшки, що призводить до задухи риби та її загибелі.



Рис. 6. Явище «цвітіння» води Кременчуцького водосховища

Для контролю за «цвітінням» води використовують Індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – кількісний показник активної (здатної до фотосинтезу) біомаси. Зазвичай він називається просто вегетаційний індекс. Цей показник найчастіше всього використовується при вирішенні задач, в яких застосовуються кількісна оцінка рослинного

покриву. На сьогодні NDVI є найбільш вживаним індексом у агросфері. Завдяки супутниковим або аерофотознімкам з'являється можливість спостерігати тенденції зміни стану полів, без необхідності виїзду на місце. Також можливо використовувати вегетаційний індекс для моніторингу розповсюдження водоростей, що спричиняють «цвітіння» води.

Індекс розраховується за сталою формулою, яка враховує всі можливі перешкоджаючі фактори: відбиваюча здатність ґрунту, поглинання світла водяними парами в атмосфері. Численні доопрацювання призвели до того, що в результаті розрахунків можна отримати найточніші дані. Таким чином, на точність обчислень впливає лише якість супутникового або аерофотознімку.

Взагалі ж, розрахунок NDVI на основі фотознімків є досить корисним і зручним інструментом для моніторингу стану насаджень, водоростей, оскільки цей індекс показує не лише загальний стан, а й стадію розвитку рослинних культур і ураженість захворюваннями.

Станом на сьогодні в Україні розрахунки NDVI застосовуються рідко, бо хоча це й не нова технологія, проте вона вимагає досить складних процедур. Проте використання індексу NDVI дає змогу відслідковувати розвиток водоростей на Кременчуцькому водосховищі (рис. 7).

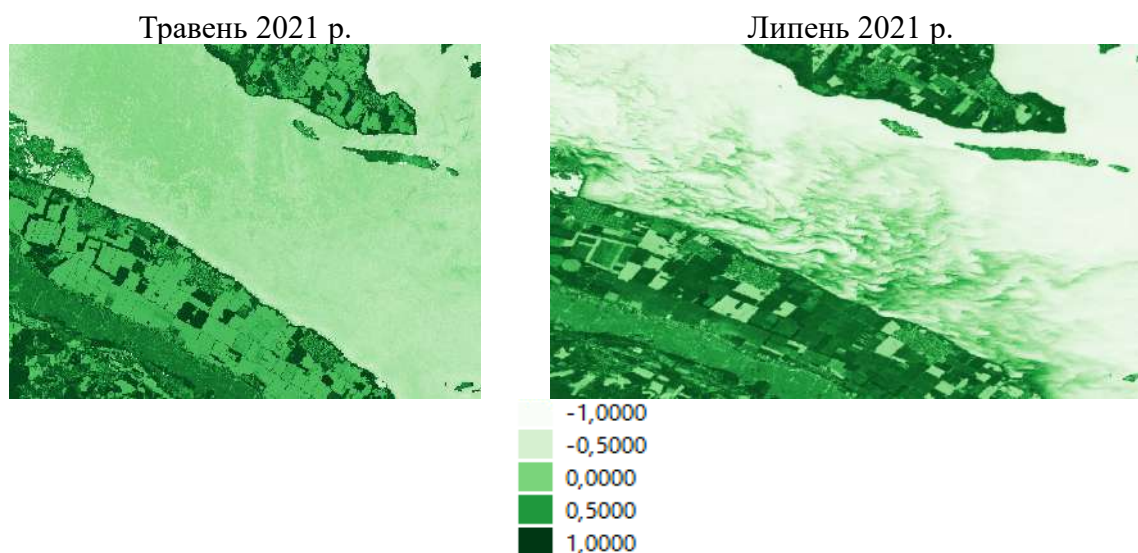


Рис. 7. Розрахунок вегетаційного індексу NDVI водойми (діапазон від -1,0 до 1,0) на супутниковому знімку Sentinel 2, канали 11-8-4 (Ресурси для скачування знімків EO Browser, USGS Earth Explorer)

На берегах Кременчуцького водосховища поширено розвиток ерозійних процесів, їх висота складає 30–40 м, урвисті. Берегова лінія піщана, головним чином проходить попід кручами, розділеними ярами. На рис. 8 наведені фото узбережжя Кременчуцького водосховища.

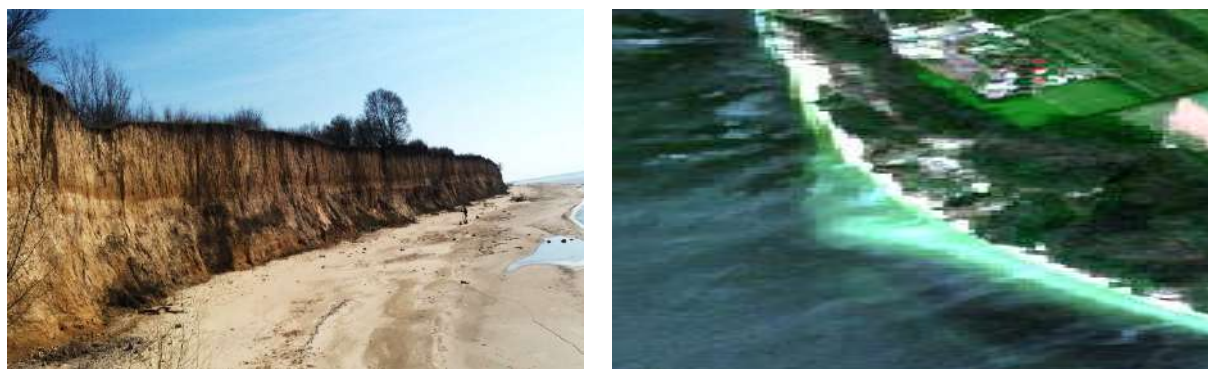


Рис. 8. Ерозія берегів Кременчуцького водосховища:

- фото узбережжя
- на супутниковому знімку Sentinel (Ресурс для скачування знімків USGS Earth Explorer)

Розвиток зсувів та абразій ґрунтових порід на берегах Кременчуцького водосховища спричинений постійним впливом хвиль та води. **Зсув** – порушення природної рівноваги залягання верств гірських порід із розривом їх суцільності і переміщенням у горизонтальному або близькому до нього напрямі. **Абразія** — процес руйнування берегів (океанів, морів, водосховищ, озер) та знесення гірських порід у береговій зоні хвилями і прибою. При абразії берегів штучних водосховищ, руйнування називають **переробкою берегів** (рис. 9).

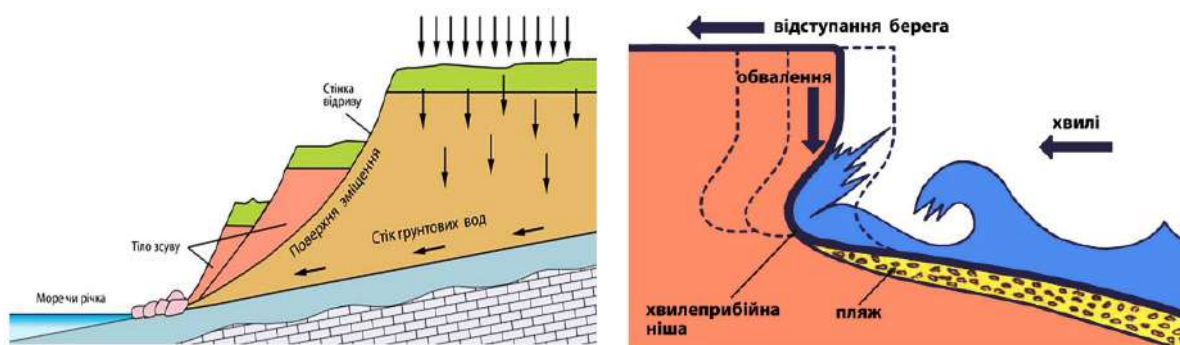


Рис. 9. Явища зсувів та абразій

- зсув породи
- абразія берегів

З метою боротьби з явищами зсувів та абразій, застосовуються гідротехнічні методи берегоукріплення: кам'яні накиди, шпори, штучні піщані пляжі і примиви, банкети і буни, та їх поєднання. Критично важливо на даному етапі захистити береги Кременчуцького водосховища, оскільки щорічно вода забирає 2-7 м берега. Майже третина берегів (43,9 км) потребує термінових заходів, а для укріплення всіх небезпечних ділянок необхідне залучення фінансування не менше мільярда гривень [11; 12]. На рис. 10 наведений проект берегоукріплювальних заходів на Кременчуцькому водосховищі, виконаних в районі с. Мозоліївка Глобинського району у 2020 р. (вартість берегоукріплення 1 км складає близько 30 млн грн).

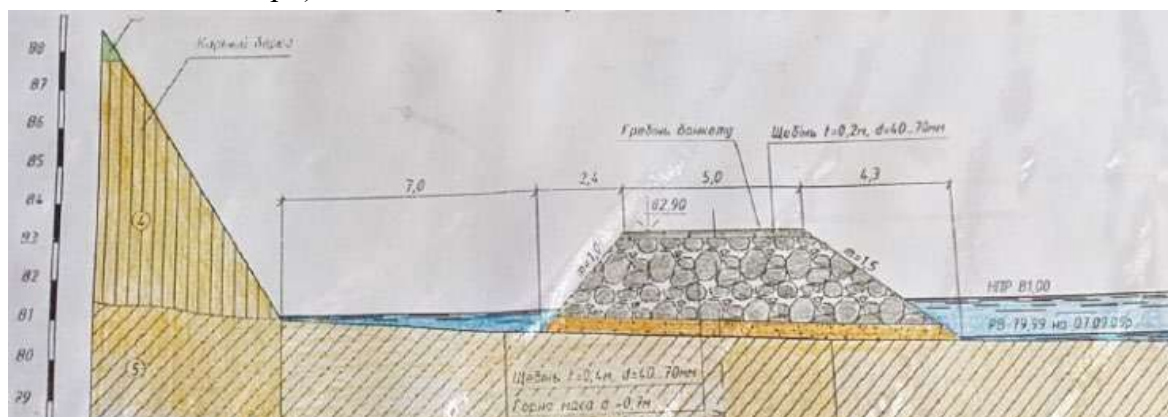


Рис. 10. Берегоукріплення Кременчуцького водосховища в районі с. Мозоліївка

Крім виконання берегоукріплювальних робіт на Кременчуцькому водосховищі, автори пропонують побудувати насипні і наливні острови та півострови, канали. Такий підхід забезпечить поглиблення дна Кременчуцького водосховища, суттєво поліпшить екологічний стан вод і вивільнить для господарчого використання тисячі гектар рекультивованих земель. Застосування вказаних прийомів поширене у світовій практиці та забезпечить створення нових територій для різноманітних цілей. На рис. 11 та 12 наведені приклади побудови штучних островів, ділянки на яких користуються великим попитом.

Нині формуванням штучного суходолу зайняті вчені гідрологи і будівельники багатьох країн світу. Міста Сінгапур, Роттердам, Гонконг, Санкт-Петербург, Миколаїв, Черкаси, Херсон, Монако, Дубай і багато інших вбачають перспективи розвитку в наливних

територіях. Аналіз дослідження глибин частини Кременчуцького водосховища показує ряд існуючих ділянок мілководдя, які доцільно ревіталізувати шляхом меліорації, осушення, будівництва суходолу за рахунок намиву і відсипання та виконати відведення таких земель для рекреації, житлової і громадської забудови, транспорту, енергетики, лісового фонду тощо.



Рис. 11. Архіпелаг, який включає в себе три "пальми" - Джумейра, Джебель Алі і Пальма Дейра (ОАЕ, Дубай, Персійський залив)



Рис. 12. Архіпелаг з 13 штучних островів Дуррат-Аль-Бахрейн (Бахрейн, Персійський залив)

Автори пропонують побудувати намивні і насипні острови, півострови та канали, що надасть можливість, поглибивши дно Кременчуцького водосховища, істотно не тільки поліпшити екологічний стан вод, але і відвести у господарче використання тисячі гектар рекультивованих земель (рис. 13). Проект досягає соціальних, екологічних та комерційних цілей, в рамках побудови насипно-намивного комплексу Яремівські кучугури (на територіях затоплених сіл Тимченки та Вереміївка (історична назва до 1917 р. Яремівка), з виділенням забудованого півострова Яремівській та архіпелагу намивних островів різного цільового призначення: сонячні електростанції, вітроенергетичні станції, житлові комплекси та бази відпочинку, портові, транспортні та спортивні споруди, яхтбази, вітроломні лісові насадження, рибогосподарські об'єкти. Необхідно на державному рівні розробити державну програму реконструкції водосховища, яка маючи екологічний та соціальний напрям повинна визначити розміщення, характеристики, види ревіталізованих територій і спосіб освоєння.

Науково обґрунтований проект будівництва Яремівського комплексу забезпечить технічну і екологічну стійкість споруд, їх екологічність та естетичність, економічну виваженість проектних рішень та безпечність об'єкта. До затоплення на вказаній території знаходились хвойні ліси і піщані кучугури (горби), має піщане дно, тому запропонована територія придатна для забудови і освоєння.

Технологічно вважається за доцільне контури нових масивів висипати камінням створивши дамби, виконати осушення території, геологічні, археологічні та гідрологічні вишукування, побудувати канали і дренаж, передбачити водні і транспортні шляхи сполучення.

Згідно з генпланом забудови, ділянки під будівлі і споруди не відсипати, а побудувати для них свайні пояси і каркасні основи, запроектувати цокольні поверхи і підготувати до намиву лише прибудинкові території, землі загального та рекреаційного користування, призначені під заліснення, а також промислового і транспортного освоєння.

Піщані намивні ґрунти товщиною 5-6 метрів, формують багат шарову надійну основу (кут внутрішнього тертя 28-36, модуль деформації 28,0-35,0 МПа); а саме:

I-го шару: вище рівня водної поверхні 3-4 метри, що стане щільним і не просідатиме;

II-го шару: піску 1,5-2 м – залишатиметься водонасиченим і пухким багато років, необхідно прошивати свайними поясами;

III-го шару: дна водосховища де можуть залягати торф, глина і інші основи, що будуть просідати ще багато років (1,5-4 метри);

IV-го шару: алювіальних пісків, що забезпечують стійкість територій.

Намивний ґрунт (пісок) з дна водосховища, повинен забиратися з підводних кар'єрів з віддалених ділянок, які будуть визначені згідно математично високотехнічної моделі, які необхідно побудувати з врахуванням перспективних водних шляхів, та необхідністю будівництва зимувальних ям для риби.

Намивні ґрунти з свайними поясами та залізобетонними каркасами, мають високу прогнозовану несучу здатність.

Використання цегельно-монолітних технологій з поставкою більшості будівельних матеріалів з дна водосховища «плавучими пилесосами» сформує транспортно-доступну акваторію і прокладають водні шляхи, та сприятимуть формуванню водних течій.

На державному рівні вбачається необхідним направлення на указані цілі для інженерної, транспортної та соціальної забудови частину бюджетних коштів.

Необхідно передбачити заліснення території вітроломними захисними насадженнями, особливо з північно-західної сторони, та будівництво доріг державного значення, мостів, причалів, річпорту.

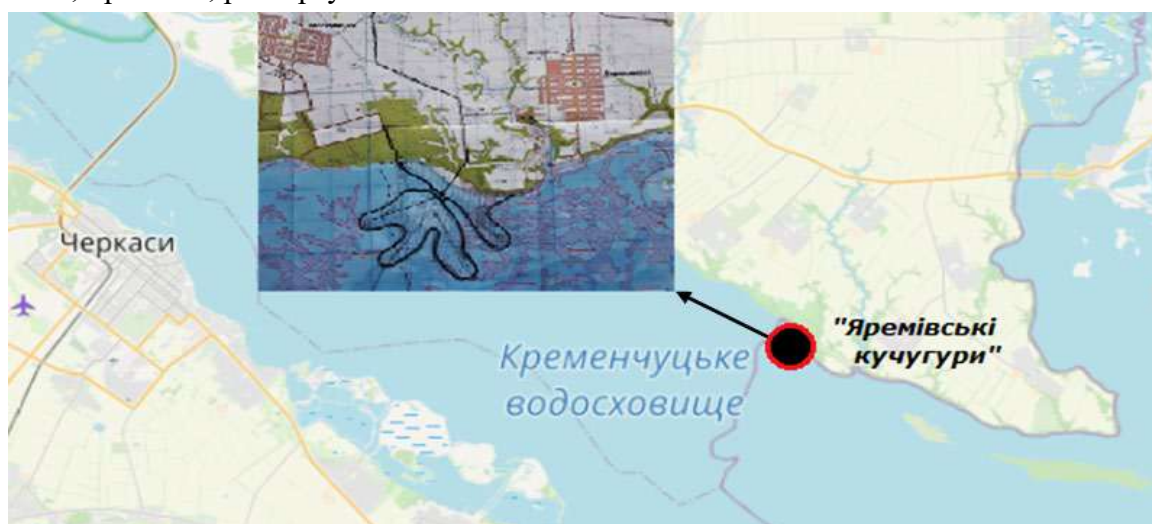


Рис. 13. Схема-пропозиція побудови насипно-намивного комплексу «Яремівські кучугури» на мілководді Кременчуцького водосховища

Проблемним питанням залишається неврегульованість правових питань щодо рекультивації мілководної частини водосховища з поновлення суходолу і повернення долини Дніпра в попередній стан. Необхідно внести в Земельний і Водний кодекси правові норми щодо умов припинення існування частини водного об'єкту і зміну їх цільового призначення та відведення земель в інші категорії (землі житлової і громадської забудови, лісгосподарського призначення, рекреації, транспорту, енергетики, промисловості, сільськогосподарського призначення, природо-заповідного та іншого природоохоронного призначення тощо). У результаті капітального будівництва та рекультивації шляхом будівництва каналів і дренажу із земель водного фонду можливо створити привабливі урбанізовані території.

Висновки.

1. Вирішення екологічних проблем штучних водосховищ вимагає невідкладних дій щодо їх реконструкції шляхом берегоукріплення, поглиблення, зменшення площ затоплень, рекультивації мілководь, створення штучних островів та їх подальшого використання.

2. Будівництво комплексу «Яремівські кучугури» на осушених мілководдях дозволить повернути у використання тисячі гектарів корисних земель та створити урбанізовані території.

3. Поступове зниження рівня штучних водосховищ сприятиме зменшенню їх площ та ліквідації мілководь.

4. Виконання запропонованих рішень щодо реконструкції, як Кременчуцького так і інших водосховищ, призведе до поліпшення їх екологічного стану на шляху до підвищення благополуччя українців.

Список використаних джерел

1. Водний кодекс України 6 черв. 1995 р. № 213/95-ВР // Відомості Верховної Ради України. – 1995. – № 24.
2. Земельний кодекс України 25 жовт. 2001 р. № 2768-III // Відомості Верховної Ради України. – 2002. – № 3-4.
3. Про охорону навколишнього природного середовища [Електронний ресурс]: Закон України 25 черв. 1991 року № 1264-XII – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>.
4. Екологічний паспорт Полтавської області [Електронний ресурс] // Департамент екології та природних ресурсів Полтавської обласної державної адміністрації. (2020 р.). – Режим доступу: <http://eco.adm-pl.gov.ua>.
5. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Полтавській області за 2020 рік. [Електронний ресурс] // Департамент екології та природних ресурсів Полтавської обласної державної адміністрації. – Режим доступу: <http://eco.adm-pl.gov.ua>.
6. Екологічні основи управління водними ресурсами [Електронний ресурс] : навч. посіб. / А. І. Томільцева, А. В. Яцик, В. Б. Мокін та ін. – Київ : Інститут екологічного управління та збалансованого природокористування, 2017. – Режим доступу: <http://dea.edu.ua/img/source/Book/4.pdf>.
7. Василенко, О. А. Раціональне використання та охорона водних ресурсів : навч. посіб. / О. А. Василенко, Л. Л. Литвиненко, О. М. Квартенко. – Рівне : НУВГП, 2007.
8. Левківський С. С. Раціональне використання та охорона водних ресурсів / С. С. Левківський. – Київ : Либідь, 2006.
9. Рябець, К. А. Екологічне право України : навч. посіб. / К. А. Рябець. – Київ : Центр учбової літератури, 2009.
10. Волосяцький Б. І. Інженерна геодезія. Геодезичні роботи для проектування і будівництва водогосподарських та гідротехнічних споруд : навч. посіб. / Б. І. Волосяцький – Львів : Львівська політехніка, 2003. – 144 с.
11. Глотов В. М. Аналіз результатів визначення об'ємів змиву берегової лінії русла ріки Десна / В. М. Глотов, О. І. Терещук, В. І. Мовенко // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва : зб. наук. праць Захід. геодезичного товариства УТГК. – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2010. – Вип. 1(19). – С. 210-215.
12. Терещук О. І. Гідрологічний режим та екологічний стан р. Десна в межах Чернігівської області / О. І. Терещук, В. І. Мовенко // Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землепорядкування – європейський досвід : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. – Чернігів : ЧДІЕ, 2014. – Вип. 10. – С. 62-71.

References

1. Vodnyi kodeks Ukrainy [Water Code of Ukraine] No. 213/95-VR (June 6, 1995). *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy – Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine*, 24.
2. Zemelnyi kodeks Ukrainy [Land Code of Ukraine] No. 2768-III (October 25 2001). *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy – Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine*, (3-4).
3. Verkhovna Rada of Ukraine (June 25, 1991). Pro okhoronu navkolyshnoho pryrodnoho sere dovyyshcha [On environmental protection], Law of Ukraine № 1264-XII.
4. Departament ekolohii ta pryrodnykh resursiv Poltavskoi oblasnoi derzhavnoi administratsii [Department of ecology and natural resources of the Poltava regional state administration]. (2020). *Ekolohichnyi pasport Poltavskoi oblasti [Environmental passport of the Poltava region]*. <http://eco.adm-pl.gov.ua>.
5. Departament ekolohii ta pryrodnykh resursiv Poltavskoi oblasnoi derzhavnoi administratsii [Department of ecology and natural resources of the Poltava regional state administration]. (2020). *Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho sere dovyyshcha v Poltavskii oblasti za 2020 rik [Regional report on the state of the natural environment in the Poltava region for 2020]*. <http://eco.adm-pl.gov.ua>.
6. Tomiltseva, A.I., Yatsyk, A.V., & Mokin, V.B. (2017). *Ekolohichni osnovy upravlinnia vodnyimi resursami [Ecological fundamentals of water resources management]*. Instytut ekolohichnoho upravlinnia ta zbalansovanoho pryrodokorystuvannia. <http://dea.edu.ua/img/source/Book/4.pdf>.

37. Vasylenko, O.A., Lytvynenko, L.L., & Kvartenko, O.M. (2007). *Ratsionalne vykorystannia ta okhorona vodnykh resursiv [Rational vikoristannya and protection of water resources]*. NUVHP.
8. Levkivskiy, S.S. (2006). *Ratsionalne vykorystannia ta okhorona vodnykh resursiv [Rational vikoristannya and protection of water resources]*. Lybid.
9. Riabets, K.A. (2009). *Ekolohichne pravo Ukrainy [Ecological law of Ukraine]*. Tsentр uchbovoi literatury.
10. Volosetskiy, B.I. (2003). *Inzhenerna heodeziia. Heodezychni roboty dlia proektivannia i budivnytstva vodohospodarskykh ta hidrotekhnichnykh sporud [Engineering geodesy. Geodetic robots for the design and life of water resources and hydrotechnical spores]*. Vydavnytstvo "Lvivska politekhnika".
11. Hlotov, V.M., Tereshchuk, O.I., & Movenko, V.I. (2010). Analiz rezultativ vyznachennia obiemiv zmyvu berehovoї linii rusla riky Desna [Analysis of the results of delineation of the river bank line of the Desna]. *Zbirnyk naukovykh prats Zakhidnoho heodezychnoho tovarystva UTHK "Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Current achievements of geodetic science and virobnytstva: zb. Sciences. work Zahid. geodetic partnership UTGC, 1(19), 210–215. Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika"*.
12. Tereshchuk, O.I., & Movenko, V.I. (2014). Hidrolohichniy rezhym ta ekolohichniy stan r. Desna v mezhakh Chernihivskoi oblasti [New achievements of geodesy, geoinformatics and land ordering - European report: materials of the international. sci.-pract. conf.]. *Materialy mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii „Novitni dosiahnennia heodezii, heoinformatyky ta zemlevporiadkuvannia – yevropeiskyi dosvid” – New achievements of geodesy, geoinformatics and land ordering - European report: materials of the international. sci.-pract. conf., 10, 62-71. Vydavnytstvo Chernihivskoho derzhavnogo instytutu ekonomiky i upravlinnia.*

Отримано 24.04.23

UDC 502.175(282.247.324)

Oleksiy Tereshchuk¹, Viktor Movenko², Yulia Shcherbak³

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Director of Education and Research Institute of Construction, Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: olexter1957@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6433-9351>. ResearcherID: [H-4540-2016](https://orcid.org/H-4540-2016)

²Senior Lecturer of Department of Geodesy, Cartography and Land Management Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: viktor.movenko@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3395-3476>
ResearcherID: <http://www.researcherid.com/rid/H-2364-2016>

³Lecturer of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management Chernihiv National University of Technology (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: shch.yu15@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3439-3792>. ResearcherID: [H-4199-2016](https://orcid.org/H-4199-2016)

PROBLEMS OF ECOLOGICAL CONDITION OF KREMENCHUK RESERVOIR AND WAYS OF OVERCOMING THEM

In recent decades, the problems of the ecological state of the environment increasingly concern the modern population of the globe. The growing threat of global warming, melting glaciers, and climate change require emergency measures in all states of the Earth's territory.

Comprehensive monitoring of the ecological state of the rivers of the Dnieper basin confirms the need for urgent measures aimed at improving the ecological state of the environment (including modern reservoirs), which will contribute to the improvement of the state of reservoirs, as well as allow the use of vacated land for other purposes.

Analysis of the latest research and publications devoted to the problems of monitoring the ecological state of water bodies confirms the need for further development of solutions to the problems of modern water reservoirs.

The purpose of this work is to analyze the ecological condition of the Kremenchug Reservoir and propose ways to improve it.

This paper, based on observations of the ecological condition of the Kremenchug reservoir, the destruction of its shores, reducing depths in large areas, considers proposals to improve the ecological condition of the reservoir, create artificial areas, gradually reduce its depths to reduce areas with critically shallow depths. Flooded areas to lands of housing and public buildings, recreation, forestry, transport, energy, industry, agriculture and environmental protection

Keywords: Kremenchug reservoir; ecological condition; environment; Dnipro river; Dnieper basin.

Fig.: 13. References: 12.

**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:

- **60 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам потрібна паперова версія журналу);
- **40 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. моб.: (0462) 665-225

E-mail: tst.technical.sj@gmail.com

**Відповідальність за матеріали, наведені у статті, несе автор.
Неправильно оформлені автором стаття та супровідні документи,
що не відповідають зазначеним вимогам, розглядатися не будуть.**

*Редакція розглядає надходження публікації та супровідних документів
як згоду дописувача (ів) щодо передачі авторського права на використання твору
(тиражування, розповсюдження тощо).*

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 2(32)

Відповідальний за випуск
Технічний редактор, відповідальна за випуск
Редактор

С. П. Сапон
Н. В. Мороз
О. С. Смелова

Підписано до друку 28.03.2023. Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. – 48,59.
Тираж 100 пр. Замовлення № 16/23.

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.